

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللَّهُمَّ صَلِّ عَلَى مُحَمَّدٍ وَآلِ مُحَمَّدٍ وَعَجِّلْ فَرَجَهُمْ

فیزیک (۳)

رشته‌های ریاضی و فیزیک – علوم تجربی

راهنمای معلم

پایه دوازدهم

دوره دوم متوسطه

دانلود سوالات آزمون

راهنمای کامل آزمون



وزارت آموزش و پرورش

سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

- نام کتاب: راهنمای معلم فیزیک (۳) - پایه دوازدهم دوره دوم متوسطه - 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، ۶ و ۷) - احمد احمدی (فصل ۲) - محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر (فصل‌های ۳ و ۴) (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) - جواد صفری (مدیر هنری) - الهه یعقوبی‌نیا (صفحه‌آرا) - فاطمه رئیسیان فیروزآباد (رسم) - زهره برهانی زرنندی، رعنا فرج‌زاده درویی، شاداب ارشادی، سپیده ملک‌ایزدی و راحله زادفتح‌اله (امور آماده‌سازی)
- نشانی سازمان: تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)
تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
وبگاه: www.chap.sch.ir و www.irtextbook.ir
- ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)
تلفن: ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۳۷۵۱۵-۱۳۹
- چاپخانه: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
- سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ اول ۱۳۹۸

شابک ۳-۲۴۲۴-۵-۹۶۴-۹۷۸

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.
امام خمینی «قُدَسَ سرُّه»

کلیه حقوق مادی و معنوی این کتاب متعلق به سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی وزارت آموزش و پرورش است و هرگونه استفاده از کتاب و اجزای آن به صورت چاپی و الکترونیکی و ارائه در پایگاه‌های مجازی، نمایش، اقتباس، تلخیص، تبدیل، ترجمه، عکس برداری، نقاشی، تهیه فیلم و تکثیر به هر شکل و نوع، بدون کسب مجوز از این سازمان ممنوع است و متخلفان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

فهرست

فصل ۱: حرکت بر خط راست ۱

- ۱-۱- شناخت حرکت ۵
- ۲-۱- حرکت با سرعت ثابت ۲۰
- ۳-۱- حرکت با شتاب ثابت ۲۵
- ۴-۱- سقوط آزاد ۳۸
- راهنمای پاسخیابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ۴۲

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای ۵۵

- ۱-۲- قوانین حرکت نیوتون ۶۰
- ۲-۲- معرفی برخی از نیروهای خاص ۶۹
- ۳-۲- تکانه و قانون دوم نیوتون ۸۴
- ۴-۲- حرکت دایره‌ای یکنواخت ۹۰
- ۵-۲- نیروی گرانشی ۹۷
- راهنمای پاسخیابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ۱۰۱

فصل ۳: نوسان و موج ۱۱۳

- ۱-۳- نوسان دوره‌ای ۱۱۸
- ۲-۳- حرکت هماهنگ ساده ۱۱۸
- ۳-۳- انرژی در حرکت هماهنگ ساده ۱۲۵
- ۴-۳- تشدید ۱۳۱
- ۵-۳- موج و انواع آن ۱۳۶
- ۶-۳- مشخصه‌های موج ۱۴۰
- راهنمای پاسخیابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ۱۸۴

فصل ۴ : برهم کنش های موج ۱۹۵

- ۱-۴ بازتاب موج ۱۹۹
- ۲-۴ شکست موج ۲۰۷
- ۳-۴ پراش موج ۲۱۸
- ۴-۴ تداخل امواج ۲۳۴
- راهنمای پاسخ یابی پرسش ها و مسئله های فصل ۴ ۲۶۵

فصل ۵ : آشنایی با فیزیک اتمی ۲۷۷

- ۱-۵ اثر فوتوالکتریک و فوتون ۲۸۱
- ۲-۵ طیف خطی ۲۸۴
- ۳-۵ مدل اتمی رادرفورد - بور ۲۸۷
- ۴-۵ لیزر ۲۹۳
- پرسش ها و تمرین های پیشنهادی فصل ۵ ۲۹۴
- راهنمای پاسخ یابی پرسش ها و مسئله های فصل ۵ ۲۹۷

فصل ۶ : آشنایی با فیزیک هسته ای ۳۰۳

- ۱-۶ ساختار هسته ۳۰۷
- ۲-۶ پرتو زایی طبیعی و نیمه عمر ۳۱۳
- ۳-۶ شکافت هسته ای ۳۱۲
- ۴-۶ گداخت (همجوشی) هسته ای ۳۱۳
- پرسش ها و تمرین های پیشنهادی فصل ۶ ۳۱۵
- راهنمای پاسخ یابی پرسش ها و مسئله های فصل ۶ ۳۲۵

سخنی با همکاران

در دنیای امروز، دسترسی به دانش و اطلاعات، بسیار متنوع و آسان شده است؛ از این رو، بی‌اطلاعی از دانش و فناوری روز، ناتوانی در به‌کارگیری و پردازش آنها، عدم مهارت در دستیابی و تحلیل اطلاعات، عدم مهارت در برخورد با یک مسئله 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 مورد نیاز خود را جمع‌آوری، پردازش و نتیجه‌گیری کنند. در این راستا، ابتدا معلم با طرح پرسش، نشان دادن یک تصویر 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 به گونه‌ای باشد که دانش‌آموزان نحوه 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 ارائه الگوهای، مشارکت هرچه بیشتر دانش‌آموزان را در فرایند یاددهی - 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) محدوده بحث : به منظور تأکید روی مفاهیمی که در کتاب درسی به آنها پرداخته شده است، حوزه و محدوده 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. کلیه 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، به کار 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 همه 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، به دانش‌آموزان 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 این رو، 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

۱-۱- شناخت حرکت

۱-۲- حرکت با سرعت ثابت

۱-۳- حرکت با شتاب ثابت

۱-۴- 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 به کار 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 بردار جابه‌جایی 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 به صورت تندی و سرعت می‌نویسیم و به کار می‌بریم.
- بیشتر حرکت‌های اجسام دور و بر ما، حرکت شتابدار است که می‌توان آنها را در بیشتر شرایط به صورت حرکت با شتاب ثابت مدل‌سازی کرد و به توصیف و بررسی آنها پرداخت.
- حرکت اجسام در حال سقوط را می‌توان به عنوان 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 در نظر گرفته شوند؟

- تفاوت مسافت و جابه‌جایی در چیست؟
- تفاوت تندی متوسط و سرعت متوسط در چیست؟
- چه موقع مسافت و اندازه جابه‌جایی متحرک با یکدیگر برابر است؟
- چه موقع تندی متوسط و اندازه 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 در نظر نمی‌گیریم؟

در پایان این واحد یادگیری دانش آموزان 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 به صورت حرکت با شتاب ثابت مدل‌سازی کرد.
- دانش آموزان 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 مقدمه کتاب (سخنی با دانش‌آموزان)، تصویر شروع فصل، مقدمه‌ای بر بحث حرکت و اشاره‌ای به آنچه در علوم سال نهم در خصوص حرکت آموختند و همچنین بخش ۱-۱ تا پایان مسافت و جابه‌جایی

جلسه دوم: بخش ۱-۱ از تندی متوسط و سرعت متوسط (صفحه ۳) تا تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای (صفحه ۹)

جلسه سوم: بخش ۱-۱ از تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای (صفحه ۹) تا تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت-زمان (صفحه ۱۱)

جلسه چهارم: بخش ۱-۱ از تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت-زمان (صفحه ۱۱) تا حرکت با سرعت ثابت (صفحه ۱۳) و همچنین بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل مربوط به بخش ۱-۱

جلسه پنجم: بخش ۲-۱ حرکت با سرعت ثابت (صفحه ۱۳) تا پایان آن و همچنین بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل مربوط به بخش ۲-۱

جلسه ششم و هفتم: بخش ۳-۱ حرکت با شتاب ثابت (صفحه ۱۵) و بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل مربوط به بخش ۳-۱

جلسه هشتم و نهم: بخش ۴-۱ سقوط آزاد تا پایان و همچنین بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل مربوط به بخش ۴-۱

جلسه دهم: جمع‌بندی و بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های باقی‌مانده پایان فصل

جلسه یازدهم: از مون 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 توصیف‌کننده 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 این تصویر پرداخت. انتظار نمی‌رود که در این بحث و گفت‌وگو دانش‌آموزان 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 ۱-۱ دانش‌آموزان بتوانند به پاسخ مناسبی برای این پرسش برسند و در پاسخ خود کمیت‌ها و مفاهیم فیزیکی مرتبط را به درستی به کار ببرند.

۱-۱- 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 دقیق‌تر 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.

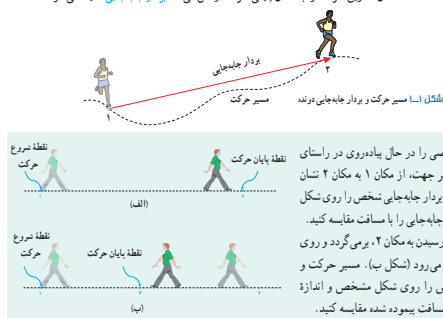
دانش‌آموزان در علوم سال نهم با مفاهیم مسافت و جابه‌جایی به‌طور کامل آشنا شده‌اند و به ماهیت برداری بودن جابه‌جایی نیز واقف‌اند. در اینجا ضمن مرور این مفاهیم، در پرسش ۱-۱ و فعالیت ۱-۱ به جمع‌بندی این دو مفهوم پرداخته‌ایم.

فیزیک ۳۳

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 100 km/h یکی از معیارهای مقایسه خودروهای امروزی در صنعت خودروسازی است. همچنین مهندسانی که به طراحی و ساخت پل‌ها، پرواز فرودها یا می‌پردازند توجه دارند که هواپیماهای مختلف برای آنکه به تندی لازم برای برخاستن برسند، چه مسافتی را باید روی پل 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 نحوه حرکت خون در رگ‌ها توجه کنند. در این فصل ابتدا نگاهی دقیق‌تر خواهیم (امانت) 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.

۱-۱- شناخت حرکت

در علوم سال نهم با مفاهیم اولیه حرکت آشنا شدید. در این بخش ضمن مرور این مفاهیم و کمیت‌های مرتبط با آنها، زمینه لازم را برای شناخت و توصیف دقیق‌تر حرکت فراهم می‌کنیم. مسافت و جابه‌جایی: شکل ۱-۱ مسیر حرکت دوندای را از مکان ۱ تا مکان ۲ نشان می‌دهد. طول این مسیر، مسافت پیموده شده یا به اختصار **مسافت** نامیده می‌شود. همچنین پاره‌خط جهت‌داری که مکان آغازین حرکت را به مکان پایانی حرکت وصل می‌کند **بردار جابه‌جایی** نامیده می‌شود.



پرسش ۱-۱

- ۱- کافی است دانش‌آموزان روی شکل مسیر حرکت (که خط راست است) و همچنین بردار جابه‌جایی (پاره خط جهت‌داری که از نقطه ۱ به نقطه 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 اندازه جابه‌جایی متحرک باهم برابر می‌شوند.
- 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 اندازه 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 ۱-۱

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

شکل ۱: حرکت در فضا واقعی

۳. شکل پ 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 اندازه بردار جابه‌جایی آن را با مسافت پیموده شده مقایسه کنید.



فعالیت ۱-۱

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



تندی متوسط و سرعت متوسط: اگر متحرکی مانند در فضا شکل ۱-۱ در مدت زمان Δt از مکان ۱ به مکان ۲ برود و مسافت و بردار جابه‌جایی بین این دو مکان را به ترتیب با s و \vec{r} که نشان دهیم، همان‌طور که در علوم سال نهم دیدید، تندی متوسط و سرعت متوسط دونه به صورت زیر تعریف می‌شوند^۱:

(۱-۱)	(تندی متوسط)	$v_{av} = \frac{s}{\Delta t}$
(۲-۱)	(سرعت متوسط)	$\vec{v}_{av} = \frac{\vec{r}}{\Delta t}$

همان‌طور که دیده می‌شود تندی متوسط، کمیتی زرده‌ای و سرعت متوسط، کمیتی برداری^۱ 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.

۱- یکاها: این «v» در معادله‌های تندی متوسط و سرعت متوسط از راز انگلیسی average به معنای متوسط گرفته شده است.
۲- آموختنی مسافتی که دانش‌آموز را در معادله «s» و «r» دو گر حیات برای دو با سه بعدی در صفحه «v» یا فضای «v» می‌کند خارج از برنامه درسی آن کتاب است و ارزیابی آن آن باید انجام نمود.

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 ۲-۱

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

فیزیک ۳

مثال ۱-۱

تندی متوسط و سرعت متوسط دانش‌آموز فعالیت ۱-۱ را پیدا کنید.
پاسخ : با توجه به داده‌های روی نقشه، اگر دانش‌آموز در مدت زمان $\Delta t = 7/0 \text{ min} = 42 \text{ s}$ مسافت $\Delta x = 550 \text{ m}$ را از خانه تا مدرسه پیموده باشد، با توجه به رابطه ۱-۱ تندی متوسط وی برابر $v_{\text{avg}} = 550 \text{ m} / 42 \text{ s} = 1/31 \text{ m/s}$ می‌شود و مفهوم فیزیکی آن این است که دانش‌آموز به‌طور متوسط در هر ثانیه $1/31 \text{ m}$ از طول مسیر را پیموده است. همچنین با توجه به نقشه، اندازه بردار جابه‌جایی دانش‌آموز 225 m متر و جهت آن به طرف جنوب غربی است. در نتیجه با توجه به رابطه ۱-۱ اندازه سرعت متوسط وی برابر $v_{\text{avg}} = 225 \text{ m} / 42 \text{ s} = -/774 \text{ m/s}$ و جهت آن به طرف جنوب غربی است.

پوشش ۱-۲

در چه صورت اندازه سرعت متوسط یک متحرک با تندی متوسط آن برابر است؟ برای پاسخ خود می‌توانید به شکل‌های پرش ۱-۱ 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 **برداز مکان** جسم در آن لحظه نامیده می‌شود.

شکل ۱-۲ الف و ب، بردار مکان شخصی را که در جهت محور x می‌دود در دو لحظه متفاوت t_1 و t_2 نشان می‌دهد. بردار مکان دونه را در این دو لحظه، می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

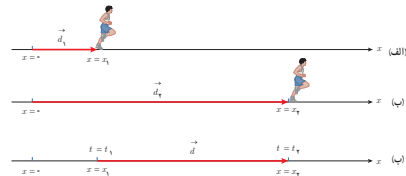
$$\vec{d}_1 = x_1 \vec{i} \quad \text{و} \quad \vec{d}_2 = x_2 \vec{i}$$

در این صورت و با توجه به شکل ۱-۲ ب، بردار جابه‌جایی دونه 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 رابطه ۱-۲ مربوط به سرعت متوسط دونه را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\vec{v}_{\text{avg}} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \quad (\text{سرعت متوسط در راستای محور } x) \quad (1-3)$$



شکل ۱-۲ الف) و ب) بردار مکان دونه در دو لحظه متفاوت و ب) بردار جابه‌جایی آن

۴

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 ۱-۲ و تمرین ۱-۱ نیز مبتنی بر همین دیدگاه حرکت بر خط راست و توجه به نمادگذاری برداری مطرح شده‌اند.

تمرین ۱-۱

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

متحرک A: \vec{i} (۸/۴ m)، \vec{i} (۲/۱ m/s)، مثبت محور x (جهت محور x)

متحرک B: \vec{i} (۳/۱ m)، \vec{i} (-۱/۴ m/s)، منفی محور x (خلاف جهت محور x)

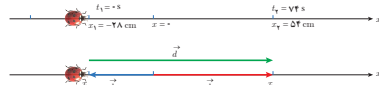
متحرک C: \vec{i} (۶/۶ m)، \vec{i} (۱/۶۵ m/s)، مثبت محور x

متحرک D: \vec{i} (۸/۲ m)، \vec{i} (۹/۶ m)، مثبت محور x

● مثال ۱-۲

کفش دوزکی که در جهت محور x در حرکت است، در لحظه‌های $t_1=0\text{ s}$ و $t_2=7\text{ s}$ به ترتیب از مکان‌های $x_1=-2\text{ cm}$ و $x_2=5\text{ cm}$ می‌گذرد.

(الف) پیرادهای مکان در لحظه‌های t_1 و t_2 و پیردار جابه‌جایی کفش دوزک در این بازه زمانی را رسم کنید.



باسم: الف)

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

$$\vec{v}_{av} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \text{fcm} - (-\Delta \text{fcm})}{\Delta \text{s}} = \frac{2\Delta \text{fcm}}{\Delta \text{s}} = (1.1 \text{ cm/s}) \hat{i}$$

● **قانون ۱-۱**

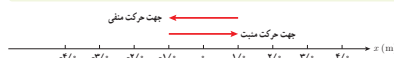
حدول زیر را کامل کنید. فرض کنید هر چهار متحرک در مدت زمان $4/s$ فاصله بین مکان آغازین و مکان پایان را طی می‌کنند.

جهت حرکت	سرعت متوسط	بردار جابه‌جایی	مکان پایانی	مکان آغازین	
			$(6/\text{م})\hat{i}$	$(-2/\text{م})\hat{i}$	A متحرک
		$(-5/\text{م})\hat{i}$	$(-7/\text{م})\hat{i}$		B متحرک
			$(A/\text{م})\hat{i}$	$(\text{م})\hat{i}$	C متحرک
	$(\text{م}/\text{م}/\text{s})\hat{i}$			$(-1/\text{م})\hat{i}$	D متحرک

از آنجا که در ادامه این فصل، تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، جابه‌جایی متحرک به‌جای بردار \vec{d} به‌صورت Δx و سرعت متوسط را به‌جای بردار \vec{v}_{av} به‌صورت رابطه زیر در حل مسئله به‌کار 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 (۳-۱)).

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{(رابطهٔ سرعت متوسط برای حرکت در راستای محور x)} \quad (4-1)$$

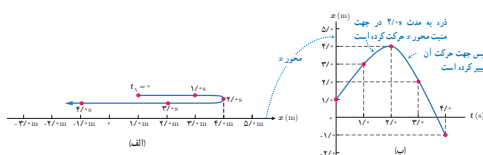
شکل ۱-۳ مکانی که روی یک محور تعبیین می‌شود بر حسب یکای طول (در اینجا متر) نشانه گذاری می‌شود و در دو جهت تا بی‌نهایت ادامه دارد. نام محور، در اینجا « x » در قسمت مثبت نوشته می‌شود.



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 ۱-۳، اگر علامت هریک از کمیت‌های جابه‌جایی (Δx) و سرعت متوسط (V_{av})، 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 $\Delta x = -2/1 \text{ m}$ شده باشد، اندازهٔ جابه‌جایی برابر $2/1 \text{ m}$ است و علامت منفی نشان‌دهنده جهت جابه‌جایی است که در اینجا در جهت منفی محور x (با خلاف جهت محور x) است.

فیزيک ۳۳

برای توصیف حرکت یک جسم می توان از نمودار مکان - زمان، که جسم مکان را در هر لحظه نشان می دهد، استفاده کرد. برای رسم این نمودار، زمان را بر محور افقی و مکان را بر محور عمود می نظر می گیریم. اگر یک جسم در یک نقطه از مکان در یک شکل $x=0$ نشان داده شده است، نوعی جسم که در لحظه $t_1 = t_0$ در مکان $x_1 = m$ و در لحظه $t_2 = t_0 + \Delta t$ در مکان $x_2 = m + \Delta x$ قرار دارد و به همین ترتیب لحظه ها دیگر در مکان های دیگر. اگر بفهمیم نمودار مکان - زمان حرکت این ذره را در زمان t_0 از هر یک از نمودارهای مکان و زمان و از یک معادله مناسب مدرج می کنیم. سپس نسبت تغییرات مکان را به مربوط به زمان $\Delta x / \Delta t$ و زمان Δt را به Δx در صفاحه $\Delta x = v \Delta t$ مشخص می کنیم و حاصل کردیم این نقاط می دهیم. به سبب یک منحنی (خط صاف)، محور x و زمان t مانند زمان t_0 و $x_0 = 0$ در یک



● مثال ۱-۳

شکل رویه‌رو نمودار مکان - زمان مورچه‌ای را نشان می‌دهد که در راستای محور x در حرکت است.

الف) در کدام بازه زمانی، موجچه در جهت محور x حرکت می‌کند؟

ب) در کدام بازه زمانی مورچه در خلاف جهت محور x حرکت می کند؟

پ) در کدام بازه‌های زمانی مورچه ایستاده است؟

ت) در کدام لحظه‌هایی فاصله موجچه از مبدأ 3 cm است؟

ث) در کدام بازه زمانی فاصله مورچه از مبدأ محور بیشترین مقدار است؟

ج) جابه‌جایی و سرعت متوسط مورچه را در بازه زمانی $4/s$ تا $8/s$ پیدا

پاسخ: الف) در بازه زمانی $t = 0$ s تا $t = 1$ s، زیرا در این بازه، x ه

(ب) در بازه زمانی $t = 12/s$ تا $t = 14/s$ ، زیرا در این بازه، x همواره د

ب) در بازه‌های زمانی $t = 8/s$ تا $t = 12/s$ و $t = 14/s$ تا $t = 18/s$

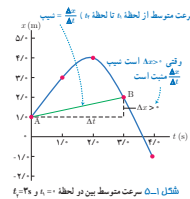
ت) در لحظه‌های $t = 6/s$ و $t = 12/s$

ث) در بازه زمانی $t = 11/0\text{ s}$ تا $t = 1/0\text{ s}$

علامت مثبت نشان می‌دهد که مورچه در جهت مثبت محور x جابه‌جا شد.

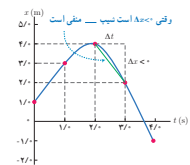
تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان - زمان

فصل ۱: حرکت بر خط راست



تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان - زمان : دوباره به نمودار شکل ۱-۴ مراجعه کنید. همان طور که از درس ریاضی می دانید نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ برای شیب پارابولی است که دو نقطه A و B را به هم وصل می کند. از سوی دیگر با توجه به رابطه ۱-۴ می دانیم که این نسبت برابر سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی t_1 تا t_2 است. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان برابر شیب پاره خطی است که نقاط نظر آن دو لحظه در نمودار مکان - زمان را به یکدیگر وصل می کند.

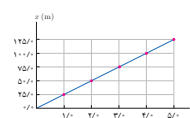
مثال ۲-۱



با توجه به نمودار مکان - زمان شکل ۱-۴، سرعت متوسط ذره را در بازه زمانی $t_1 = 1/s$ تا $t_2 = 3/s$ به دست آورید.
پاسخ : از رابطه ۱-۴ داریم :
$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{3 - 1}{3 - 1} = 1 \text{ m/s}$$

علامت منفی نشان می دهد که شیب خط حاصل بین این دو نقطه از نمودار مکان - زمان، منفی است. توجه کنید که بدون محاسبه v_{av} نیز، با توجه به فهم هندسی ای که از منفی بودن شیب خط حاصل دو نقطه نمودار داریم، می توانستیم به منفی بودن v_{av} پی ببریم.

مثال ۱-۵



نمودار مکان - زمان موتورسواری که بر خط راست حرکت می کند مطابق شکل رویهرو است. سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه های زمانی $1/s$ تا $2/s$ ، $2/s$ تا $3/s$ ، $3/s$ تا $4/s$ و $4/s$ تا $5/s$ محاسبه کنید.
نتیجه به دست آمده را با هم مقایسه و تفسیر کنید.
پاسخ : با توجه به داده های روی نمودار و بنا به رابطه ۱-۴، سرعت متوسط موتورسوار، برای هر یک از بازه های زمانی خواسته شده، برابر است با :

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{25 - 0}{2 - 0} = 12.5 \text{ m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{10 - 25}{3 - 2} = -15 \text{ m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0 - 10}{4 - 3} = -10 \text{ m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{25 - 0}{5 - 0} = 5 \text{ m/s}$$

بازه زمانی $1/s$ تا $2/s$

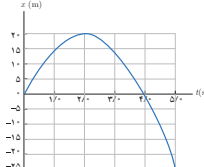
بازه زمانی $2/s$ تا $3/s$

بازه زمانی $3/s$ تا $4/s$

فصل ۱: حرکت بر خط راست

اگر در هر بازه زمانی دلخواه دیگری نیز سرعت متوسط موتورسوار را حساب کنید، خواهید دید که همین مقدار برای آن به دست می آید. از آنجا که شیب نمودار مکان - زمان برای هر بازه زمانی دلخواه برابر سرعت متوسط متحرک است، با توجه به ثابت بودن شیب نمودار مکان - زمان موتورسوار در طول حرکت، چنین انتظاری می رفت.

مثال ۶-۱



شکل رویهرو، نمودار مکان - زمان خودروی را نشان می دهد که روی خط راست حرکت می کند.
الف) با استفاده از داده های روی شکل، سرعت متوسط خودرو را در هر یک از بازه های زمانی $1/s$ تا $2/s$ ، $2/s$ تا $3/s$ ، $3/s$ تا $4/s$ و $4/s$ تا $5/s$ محاسبه کنید.
ب) در کدام یک از این بازه های زمانی، سرعت متوسط در جهت محور x و در کدام یک در خلاف جهت محور x است؟

پاسخ : الف) با توجه به داده های روی نمودار و بنا به رابطه ۱-۴، سرعت متوسط خودرو برای هر یک از بازه های زمانی خواسته شده، برابر است با :

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20 - 0}{2 - 0} = 10 \text{ m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{10 - 20}{3 - 2} = -10 \text{ m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0 - 10}{4 - 3} = -10 \text{ m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{25 - 0}{5 - 0} = 5 \text{ m/s}$$

بازه زمانی $1/s$ تا $2/s$

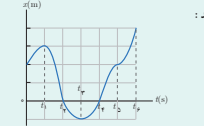
بازه زمانی $2/s$ تا $3/s$

بازه زمانی $3/s$ تا $4/s$

بازه زمانی $4/s$ تا $5/s$

ب) در بازه های زمانی ای که سرعت متوسط خودرو مثبت است، سرعت متوسط خودرو در جهت محور x و در بازه های زمانی ای که سرعت متوسط منفی است، سرعت متوسط خودرو در خلاف جهت محور x است.

پرسش ۲-۱



با توجه به نمودار مکان - زمان شکل رویهرو به پرسش های زیر پاسخ دهید :
الف) متحرک چند بار از مبدأ مکان عبور می کند؟
ب) در کدام بازه های زمانی متحرک در حال دور شدن از مبدأ است؟
ب) در کدام بازه های زمانی متحرک در حال نزدیک شدن به مبدأ است؟
ت) جهت حرکت چند بار تغییر کرده است؟ در چه لحظه های؟
ث) جابه جایی کل در جهت محور x است یا خلاف آن؟

پرسش ۳-۱

الف) دوبار و در لحظه های t_1 و t_2 .

ب) در بازه های صفر تا t_1 ، t_1 تا t_2 ، t_2 تا t_3 ، t_3 تا t_4 .

پ) در بازه های t_1 تا t_2 ، t_2 تا t_3 .

ت) دوبار و در لحظه های t_1 و t_2 .

ث) در جهت محور x (توجه کنید که Δx مربوط به لحظه $t = 0$ تا لحظه $t = t_4$ مثبت است).

تمرین ۲-۱

الف) در لحظه $t = ۸s$ ب) در بازه‌های صفر تا $۴s$ و همچنین $۶s$ تا $۸s$.پ) در بازه $۸s$ تا $۱۴s$.ت) در بازه $۴s$ تا $۶s$.

ث) برای تندی متوسط از رابطه ۱-۱ و برای سرعت

متوسط باید از رابطه ۱-۲ استفاده کنند. هنگام محاسبه

سرعت متوسط توجه به علامت جبری آن برای تعیین جهت

حرکت الزامی است.

در بازه صفر تا $۲/s$

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

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

دوچرخه‌سوار در این بازه زمانی در جهت محور x

حرکت کرده است.

در بازه $۸/s$ تا $۱۴/s$

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

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

دوچرخه‌سوار در این بازه‌ها زمانی در خلاف جهت

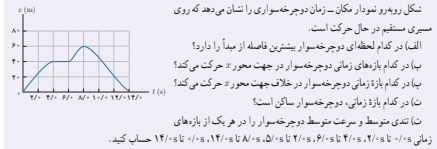
محور x حرکت کرده است.در بازه صفر تا $۱۴/s$

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

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

مسئله ۱: حرکت دو فضا رانست

تمرین ۱-۲



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 شود، 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، عقربه تندی‌سنج خودروی شما روی ۱۰۰ km/h باشد (شکل ۱-۳)، تندی لحظه‌ای خودرو برابر ۱۰۰ km/h و سرعت لحظه‌ای آن ۱۰۰ km/h به طرف شمال است. برای سادگی، بیشتر وقت‌ها سرعت

لحظه‌ای و تندی لحظه‌ای را به ترتیب به صورت سرعت و تندی بیان می‌کنند. از آنجا که در ادامه این فصل تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، سرعت لحظه‌ای متحرک را در حل مسئله‌ها به جای بردار \vec{v} به صورت v به کار می‌بریم. هر گاه متحرک در جهت مثبت محور x حرکت کند، مثبت است و هر گاه در جهت منفی محور حرکت کند، منفی است.

بررسی ۱-۳

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

تعیین سرعت لحظه‌ای به کمک نمودار مکان-زمان: پیش از این دیدیم که سرعت متوسط متحرک بین هر دو لحظه دلخواه، برابر نسبت خطی است که نمودار مکان-زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱-۴ دیده می‌شود اگر Δt به تدریج کوچک و کوچک‌تر شود، نقطه A نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود؛ به طوری که اگر Δt به سمت صفر میل کند ($\Delta t \rightarrow ۰$) نقطه B به نقطه A بسیار نزدیک می‌شود و سرانجام خط واصل بین این دو نقطه به خط مماس بر نمودار در نقطه A میل می‌کند. در این حالت، نسبت خط مماس برای سرعت متحرک در لحظه A است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که: سرعت در هر لحظه دلخواه A، برابر نسبت خط مماس بر نمودار مکان-زمان در آن لحظه است.

شکل ۱-۳: کوچک شدن تدریجی Δt ، نقطه B به نقطه A نزدیک می‌شود. در این صورت خط واصل بین این دو نقطه، در حالتی که بازه زمانی Δt خیلی خیلی کوچک شود، به خط مماس و منحصر به فرد در نقطه A میل می‌کند. این ترتیب نسبت این خط برابر با سرعت متحرک در لحظه A 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. اندازه سرعت لحظه‌ای که کمیتی برداری است، همواره با تندی لحظه‌ای برابر است. ذکر مثال‌هایی مشابه مثال داده شده در کتاب می‌تواند مفید باشد.

توجه

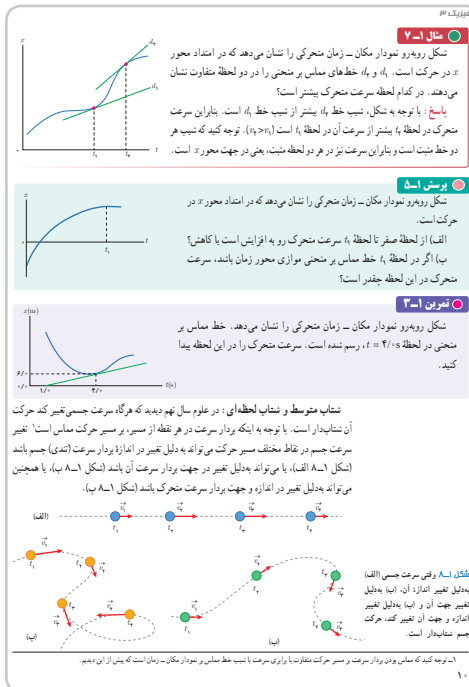
بیان «تندی لحظه‌ای» به صورت «تندی» و همچنین بیان «سرعت لحظه‌ای» به صورت «سرعت» یک قراردادی برای اختصارنویسی است که در تمامی کتاب‌های درسی فیزیک رعایت می‌شود. همان‌طور که در کتاب درسی نیز آمده است سرعت را با \vec{v} نشان می‌دهیم. از آنجا که اندازه سرعت برابر تندی است لذا تندی را با $|\vec{v}|$ یا v می‌توان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

پرسش ۴-۱

در پاسخ به این پرسش دانش‌آموزان می‌توانند به نتیجه مثال ۵-۱ 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-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 ۷-۱ آمده است تا سرعت لحظه‌ای متحرکی را با توجه به نمودار مکان-زمان برای دو لحظه دلخواه با یکدیگر مقایسه کند. بررسی مثال‌های دیگری مشابه این مثال، می‌تواند درک بهتری برای دانش‌آموزان فراهم کند.



پرسش ۵-۱

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 پی ببرند. در اینجا سرعت متحرک از لحظه شروع حرکت $t = 0$ تا لحظه $t = t_1$ ، 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.

تمرین ۲-۱

دانش‌آموزان با توجه به نحوه محاسبه شیب خط در صفحه، که در درس ریاضی خود فرا گرفته‌اند، به سادگی می‌توانند شیب خط مماس بر منحنی را در لحظه $t = 4$ s پیدا کنند.

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

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای

راهنمای تدریس: مشابه بحث 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 لحظه 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 لحظه مختلف در رابطه ۶-۱، 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 - زمان، به مفهوم شتاب لحظه‌ای بپردازند. بررسی مثال‌ها و مسائلی که دانش‌آموزان را در به دست آوردن شتاب لحظه‌ای درگیر فرایند مشتق‌گیری از معادله‌های سرعت - زمان، یا مکان - زمان می‌کند خارج از برنامه درسی این کتاب است و در تمامی ارزشیابی‌های رسمی نیز مورد توجه نخواهد بود.

توجه به مثال ۱-۹ و نتیجه آن اهمیت دارد. زیرا در بخش حرکت با شتاب ثابت، از نتیجه این مثال برای بررسی این نوع حرکت استفاده شده است.

شتاب متوسط متحرک در بازه زمانی دلخواه t_1 تا t_2 به صورت رابطه ۱۵ تعریف می شود که در آن \vec{v}_1 سرعت متحرک در لحظه t_1 و \vec{v}_2 سرعت متحرک در لحظه t_2 است. همان طور که دیده می شود شتاب متوسط (\vec{a}_{av}) کمیتی برداری و هم جهت با بردار تغییر سرعت $(\Delta \vec{v})$ است.^۱ یکای SI شتاب متوسط، متر بر مربع ثانیه (m/s^2) است.

$$a_{av} = \frac{\overset{\rightarrow}{v_2} - \overset{\rightarrow}{v_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (\text{شتاب متوسط}) \quad (5-1)$$

مثال ۸-۱
خودرویی از حال سکون در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند. پس از $۱/۲$ s، سرعت خودرو به ۲۴ m/s در جهت محور x می‌رسد. شتاب متوسط خودرو را در این بازه زمانی به دست آورید.

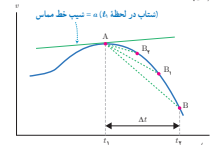
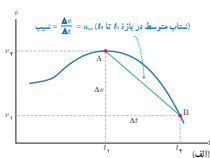


پاسخ: از رابطه ۵-۱، داریم:

$$\vec{a}_{av} = \frac{\vec{v}_T - \vec{v}_i}{t_T - t_i} = \frac{(\gamma_T \text{ m/s}) \hat{i} - \text{m/s}}{\gamma_T \text{ s} - \text{s}} = (\gamma_T \text{ m/s}^2) \hat{i}$$

پاسخ: از رابطه ۵-۱، داریم:

همان‌طور که دیده می‌شود، اندازه شتاب متوسط خودرو $2/0 \text{ m/s}^2$ و شتاب در جهت محور x است.



شکل ۱-۹ (الف) نتاب متوسط بین دو لحظه t_1 و t_2
(ب) نتاب متحرک در لحظه t_1

اگر متحرک در یک راستا حرکت کند رابطه ۵-۱ را می توان به صورت زیر به کار برد ولی با توجه به ماهیت برداری v_1 و v_2 باید به علامت های جبری آنها که نشان دهنده جهت آنهاست توجه کنیم.

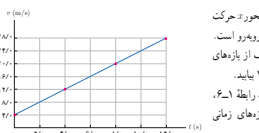
$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (6-1) \text{ (شتاب متوسط در حرکت بر خط راست)}$$

تعیین نسب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت-زمان: در شکل (الف)، نمودار سرعت-زمان ماجرکی نشان داده شده است که در شیب ثابت حرکت می‌کند. با توجه به نمودار متوسط معلوم می‌شود، که شیب متوسط برابر با شیب لحظه‌ای خط مماس است. در نمودار متوسط، زمان در آن در نقطه قطع نمودار، همان‌طور که در شکل (ب) دیده می‌شود، Δt به دست می‌آید که در آن Δx حاصل بین نقطه‌های A و B، و شیب متوسط برابر با شیب A است. این می‌تواند به دست آید با رسم خط مماس بر این خط و در نمودار (ب) این ترتیب می‌توان تشخیص داد که شیب در لحظه (نقطه A) برابر با شیب خط مماس و نمودار (ب) شیب متوسط و در آن لحظه A است. در نمودار (ب) شیب هر یک از خطوط مماس بر این خط، برابر با شیب آن خط است.

۱- آموزش مسائلی که دانش‌آموزان را در محاسبه $\vec{a}_{av} = \Delta \vec{v} / \Delta t$ درگیر عملیات برداری دو با سه بعدی، در صفحه xy یا فضای xyz می‌کند خارج از برنامه درسی این کتاب است. ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

“

● مثال ۱-۹



نمودار سرعت-زمان موتورسواری که در امتداد محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی $0/s$ تا $12/s$ مطابق شکل رویه‌رو است. شتاب متوسط موتورسوار و جهت آن را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/s$ تا $4/s$ ، $4/s$ تا $8/s$ ، $8/s$ تا $12/s$ بیابید.

باسخ: با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطه ۶-۱، شتاب متوسط موتورسوار، برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با:

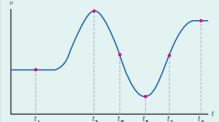
$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{4 \text{ m/s} - 1 \text{ m/s}}{3 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 1 \text{ m/s}^2$$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{7.0 \text{ m/s} - 17.0 \text{ m/s}}{1.0 \text{ s} - 3.0 \text{ s}} = 7.0 \text{ m/s}^2$$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{7 \text{ m/s} - 5 \text{ m/s}}{1 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 2 \text{ m/s}^2$$

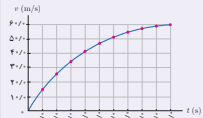
با توجه به علامت مثبت α_{eq} در سه بازه زمانی، شتاب متوسط در جهت مثبت محور x است. اگر در سه بازه زمانی دلخواه دیگری نیز شتاب متوسط موتورسوار را حساب کنید با توجه به ثابت بودن شیب نمودار سرعت - زمان، اندازه و جهت یکسانی برای شتاب به دست می آید.

● پرسش ۱-۶



شکل روبه‌رو نمودار سرعت - 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, \dots و t_3 تعیین کنید.

● تمرین ۴-۱



نمودار سرعت-زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی $t = 0$ تا $t = 4$ مطابق شکل روبه‌رو است. (الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟ (ب) شتاب خودرو را در لحظه $t = 1$ دست‌آورید.

12

پیشکش ۱-۶

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

تمرین ۴-۱

الف) به سادگی می‌توان به کمک رابطه ۶-۱ شتاب متوسط خودرو را در این بازه زمانی به دست آورد.
 ب) به کمک خط کش و با رسم خط مماس بر منحنی سرعت - زمان در لحظه $t = ۸/۰\text{ s}$ می‌توان مقدار تقریبی شتاب خودرو را در این لحظه به دست 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 محاسبه شیب خط مماس، شتاب در این لحظه تقریباً برابر است با:

$$(t = ۸/۰\text{ s در لحظه شتاب}) \approx \frac{(۳۴/۰ - ۱۸/۰)\text{ m/s}}{۸/۰\text{ s}} = ۲/۰\text{ m/s}^2$$

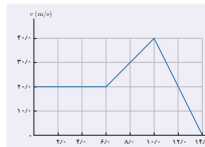
تمرین ۵-۱

دانش‌آموزان باید توجه کنند وقتی متحرکی دارای چندین نوع حرکت است، در هر بازه زمانی حرکت‌های آن جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و در لحظه‌هایی که نوع حرکت تغییر می‌کند (مثلاً لحظه $t = ۶/۰\text{ s}$ و $t = ۱۰/۰\text{ s}$ 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 رابطه ۶-۱ استفاده شود.

ب) شتاب خودرو در لحظه $t = ۲/۰\text{ s}$ برابر صفر است در لحظه $t = ۸/۰\text{ s}$ برابر ۵ m/s^2 و در لحظه $t = ۱۱/۰\text{ s}$ برابر -۱۰ m/s^2 است دانش‌آموزان باید توجه کنند که در هریک از بازه‌های $۶/۰\text{ s}$ تا $۱۰/۰\text{ s}$ و همچنین $۱۰/۰\text{ s}$ تا $۱۴/۰\text{ s}$ شتاب خودرو ثابت است.

فصل ۱: حرکت بر خط مستقیم

تمرین ۵-۱



نمودار سرعت - زمان خودرویی که در راستای محور حرکت می‌کند در بازه زمانی صفر تا $۱۴/۰\text{ s}$ مطابق شکل رویه‌رو است.
 الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟
 ب) شتاب خودرو را در هریک از لحظه‌های $t = ۲/۰\text{ s}$ ، $t = ۸/۰\text{ s}$ و $t = ۱۱/۰\text{ s}$ به دست آورید.

۴-۱ 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 ۱-۱). پیش از این و در مثال ۱-۵، با نمونه‌ای از حرکت با سرعت ثابت آشنا شدیم. در این مثال تیب نمودار مکان - زمان متحرک در طول حرکت ثابت و در نتیجه سرعت متوسط متحرک در هر بازه 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 ۱-۱: حرکت با سرعت ثابت. هم جهت سرعت و هم اندازه آن (متنی ثابت است).

اگر مطابق شکل ۱-۱ متحرک در لحظه $t_0 = 0$ در مکان $x_0 = x_0$ و در لحظه $t_1 = t_1$ در مکان $x_1 = x_1$ باشد، رابطه اخیر را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

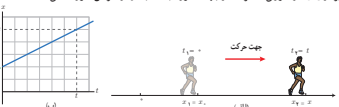
$$x_1 - x_0 = v(t_1 - t_0)$$

یا:

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

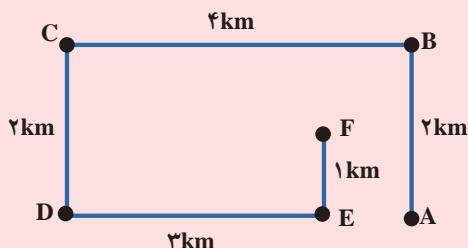
در معادله ۷-۱ معمولاً x_0 را که مکان متحرک در لحظه $t = 0$ است مکان اولیه متحرک می‌نامند. توجه کنید که مکان‌های x_0 و x_1 می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند. سرعت متحرک هم به دلیل ماهیت برداری آن، در صورتی که حرکت در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این صورت منفی است.

شکل ۱-۱: الف) مکان یک متحرک در هر لحظه معادله تیب به نمودار مکان-زمان فردی که در جهت محور x با سرعت ثابت می‌رود.



تمرین‌های پیشنهادی بخش ۱-۱

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



- الف) این موتور سوار چه مسافتی را طی کرده است؟
 ب) بردار جابه‌جایی موتور سوار را رسم کنید و اندازه آن را به کمک محاسبه به دست آورید.
 ۲ هنگامی که جسمی روی محور x ها 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 فاصله ۵ کیلومتری از محل کنونی خود در جهت جنوب غربی برود، اما باید در امتداد خیابان‌هایی حرکت کند که شمالی - جنوبی یا شرقی - غربی هستند. کمترین مسافتی که باید این شخص بپیماید تا به مقصد برسد، چقدر است؟ شکل مناسبی از مسئله رسم کنید.

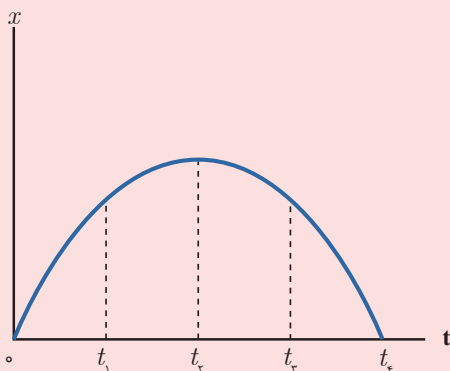
۴ یک کشتی می‌خواهد به نقطه‌ای که 5° km به سوی جنوب است برود. توفان غیرمنتظره‌ای کشتی را به نقطه‌ای در فاصله 3° km به طرف جنوب و 2° km به طرف غرب نقطه مبدأ می‌راند. کشتی باید چه فاصله‌ای را و در چه جهت بپیماید تا به مقصد اولیه خود برسد؟ شکل مناسبی از مسئله رسم کنید.

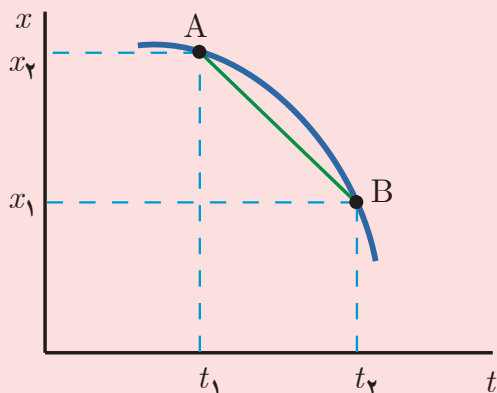
۵ دنده‌ای در لحظه $t = 0$ (مبدأ زمان) در مکان -12 m و در لحظه $t = 4 \text{ s}$ در مکان $+24 \text{ m}$ قرار دارد.

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

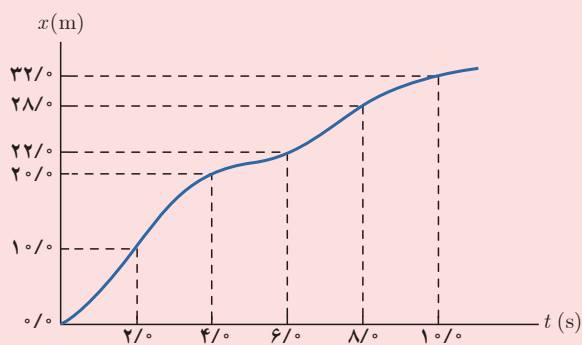
ب) بردار جابه‌جایی دنده را رسم و اندازه آن را پیدا کنید.

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

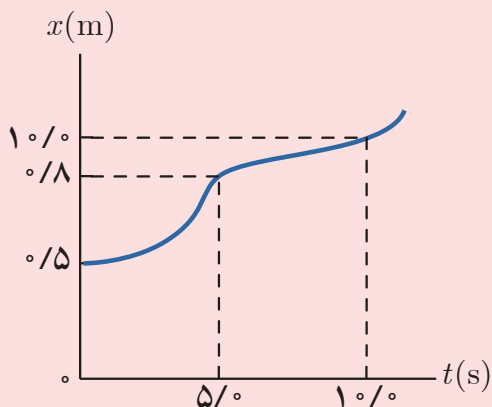




۷ شکل زیر نمودار $x - t$ متحرکی را نشان می‌دهد. شیب خط AB در این نمودار را برحسب کمیت‌های روی محورهای x و t به دست آورید و بگویید که مقدار به دست آمده نماینده چه کمیتی است؟



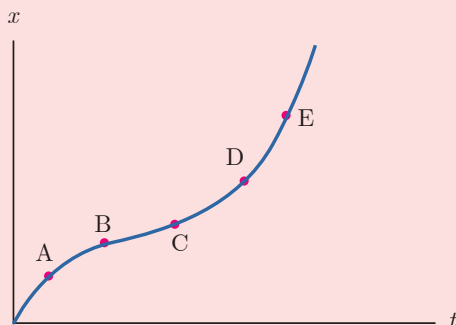
۸ نمودار مکان-زمان متحرکی مطابق شکل روبه‌رو است. الف) در بازه‌های زمانی ۲ ثانیه، جابه‌جایی متحرک را در جدولی بنویسید. ب) سرعت متوسط متحرک در هر یک از بازه‌های زمانی ۲s، و همچنین سرعت متوسط در بازه زمانی ۱۰s چقدر است؟ پ) در کدام بازه زمانی سرعت متوسط متحرک بیشینه و در کدام بازه کمینه است؟



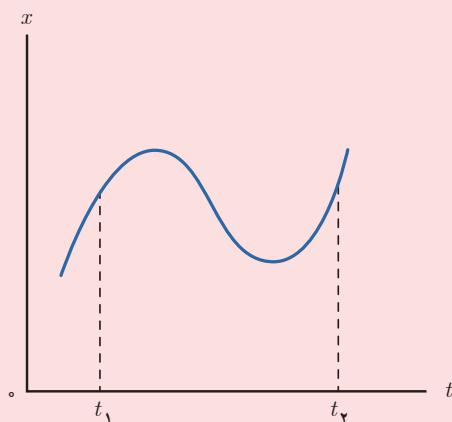
۹ نمودار مکان - زمان متحرکی که روی خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. نسبت سرعت متوسط متحرک در ۵ ثانیه دوم حرکت به سرعت متوسط آن در ۵ ثانیه اول حرکت کدام است؟

- الف) $\frac{25}{6}$ ب) $\frac{6}{25}$
پ) $\frac{3}{2}$ ت) $\frac{2}{3}$

۱۰ نمودار مکان - 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 بازه زمانی t_1 تا t_2 چند مرتبه جهت حرکت جسم تغییر کرده است؟
الف) صفر ب) ۱ پ) ۲ ت) ۳



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

الف) بردار مکان جسم را در لحظه‌های ۱، ۲، ۳، ۰، $t = 0$ ثانیه روی محور x ها نشان دهید.

ب) نمودار مکان - زمان آن را رسم کنید.

پ) سرعت متوسط متحرک را در بازه زمانی $t_1 = 2s$ تا $t_2 = 4s$ به دست آورید.

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

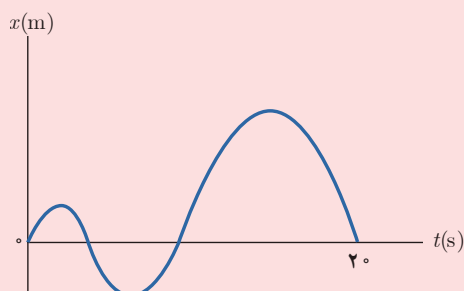
۱۳ معادله مکان - زمان ذره‌ای که در امتداد محور x حرکت می‌کند به صورت $x = At^2 - Bt^3$ است، که در آن x بر حسب متر

و t بر حسب 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 ثانیه اول حرکت چقدر است؟

۱۴ شکل زیر نمودار مکان - زمان ذره‌ای را به مدت ۲۰ s نشان می‌دهد که برخط راست حرکت می‌کند. با توجه به این نمودار،



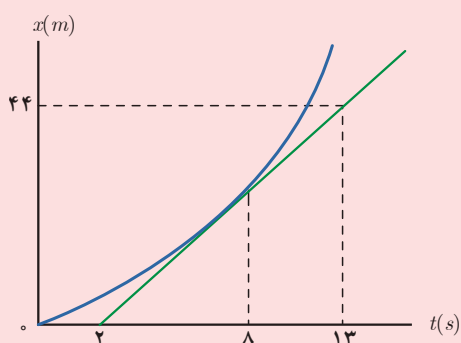
در بازه زمانی ۲۰ ثانیه :

الف) سرعت متوسط ذره مثبت بوده است.

ب) سرعت متوسط ذره منفی بوده است.

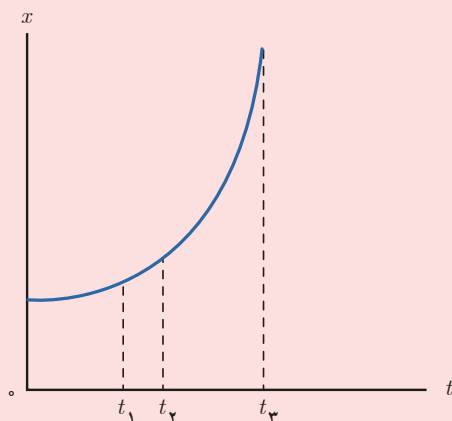
پ) سرعت متوسط ذره صفر بوده است.

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



۱۵ با توجه به نمودار مکان - زمان متحرکی که در شکل روبه‌رو

نشان داده شده است، سرعت لحظه‌ای آن را در $t = ۸\text{ s}$ پیدا کنید.

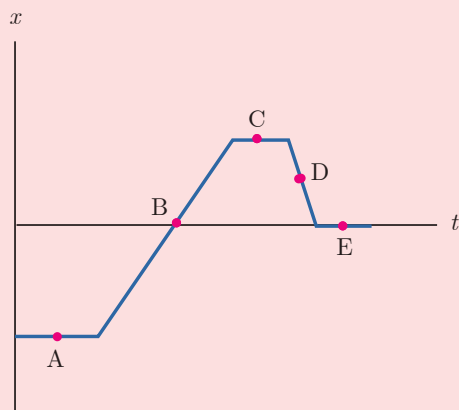


۱۶ نمودار مکان - زمان متحرکی به شکل سهمی و مطابق شکل

روبه‌رو است. سرعت متوسط متحرک در کدام بازه زمانی بیشتر است؟

الف) $t_۱$ تا $t_۲$ ب) $t_۲$ تا $t_۳$ پ) $t_۱$ تا $t_۳$

ت) به اندازه بازه‌های زمانی بستگی دارد.



۱۷ شکل روبه‌رو نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد.

با توجه به این نمودار جاهای خالی را در جدول صفحه بعد کامل کنید.

نقطه (ها)ی	سرعت متحرک کمینه (غیر صفر) است.
نقطه (ها)ی	سرعت متحرک بیشینه است.
نقطه (ها)ی	جسم ساکن است.
نقطه (ها)ی	با سرعت ثابت غیر صفر حرکت می کند.
نقطه (ها)ی	جسم به طرف چپ حرکت می کند.

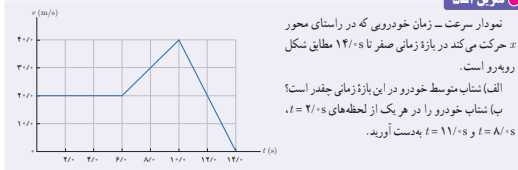
۱۸ خودرویی به طرف شمال در حرکت است. آیا ممکن است گاهی جهت شتاب آن به طرف جنوب باشد؟ توضیح دهید.

۲-۱- حرکت با سرعت ثابت

راهنمای تدریس: پیش از این و در مثال ۵-۱، دانش آموزان با حرکتی که در آن سرعت متوسط متحرک با سرعت لحظه‌ای آن در طول حرکت یکسان است آشنا شده‌اند. ضمن توجه دوباره دانش آموزان به این مثال، همچنین با توجه به شکل ۱-۱، معادله ۷-۱ را برای دانش آموزان به دست آورید و به بررسی بیشتر این حرکت بپردازید.

فصل ۱: حرکت در فضا راست

تمرین ۵-۱



۱-۲ 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 ۱-۱). پیش از این و در مثال ۵-۱، با نمونه‌ای از حرکت با سرعت ثابت آشنا شدیم. در این مثال شیب نمودار مکان - زمان متحرک در طول حرکت ثابت و در نتیجه سرعت متوسط متحرک در هر بازه 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 ۱-۱: حرکت با سرعت ثابت. هم اندازه و هم جهت سرعت ثابت است.

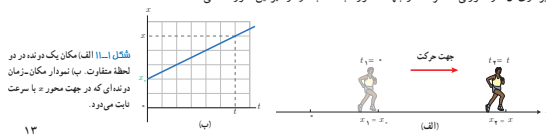
اگر مطابق شکل ۱-۱ متحرک در لحظه $t_1 = x_1$ در مکان $x_1 = x$ و در لحظه $t_2 = x_2$ در مکان $x_2 = x$ باشد، رابطه اخیر را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1)$$

یا:

$$x = vt + x_0 \quad (7-1) \quad (\text{معادله مکان - زمان در حرکت با سرعت ثابت})$$

در معادله ۷-۱ معمولاً x_0 را که مکان متحرک در لحظه $t = 0$ است مکان اولیه متحرک می‌نامند. توجه کنید که مکان‌های x_1 و x_2 می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند. سرعت متحرک هم به دلیل ماهیت برداری آن، در صورتی که حرکت در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این صورت منفی است.



تمرین ۶-۱

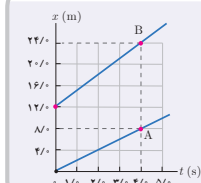
با توجه به شیب هر یک از نمودارها، دانش آموزان به سادگی می‌توانند سرعت هر یک از متحرک‌های A و B را پیدا کنند.

$$v_A = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{24/0 - 12/0}{4/0} = 3/0 \text{ m/s} \quad \text{و} \quad v_B = \frac{(24/0 - 12/0) \text{ m/s}}{4/0} = 3/0 \text{ m/s}$$

با توجه به رابطه ۷-۱ معادله مکان - زمان هر متحرک را به طور جداگانه می‌نویسیم.

$$x_A = v_A t + x_{A0} = (3/0 \text{ m/s})t + 0 = (3/0 \text{ m/s})t \quad \text{و} \quad x_B = v_B t + x_{B0} = (3/0 \text{ m/s})t + 12/0 \text{ m}$$

تمرین ۶-۱



شکل مقابل نمودار مکان - زمان دو متحرک A و B را نشان می‌دهد که در راستای محور x حرکت می‌کنند. سرعت هر متحرک را پیدا کنید و معادله مکان - زمان آنها را بنویسید.

مثال ۱-۱

شکل رویهرو بخشی از نمودار مکان - زمان شخصی را نشان می‌دهد که با سرعت ثابت حرکت می‌کند. (الف) شخص در مبدأ زمان $t=0$ در چه مکانی قرار دارد؟ (ب) سرعت حرکت این شخص را به‌دست آورید و نمودار سرعت - زمان آن را رسم کنید. (ج) در چه لحظه با لحظه‌های شخص در فاصله 200 متری از مبدأ محور قرار دارد؟ (د) اگر شخص به مدت 50 min به همین صورت حرکت کند، جایه‌جایی وی را در این مدت به‌دست آورید.

پاسخ : (الف) با توجه به نمودار مکان - زمان، در $t=0$ شخص در مکان اولیه $x=-400$ م قرار دارد. (ب) با توجه به داده‌های روی نمودار و قرار دادن داده‌های یک لحظه دلخواه (رای مثل $t=300$ s و $x=200$ m) در رابطه $x=vt$ داریم:

$$x=vt \Rightarrow 200 = v(300) \Rightarrow v = 2/3 \text{ m/s}$$

در نتیجه $v=2/3$ m/s به‌دست می‌آید. علامت مثبت نشان می‌دهد که شخص در جهت محور x حرکت می‌کند. نمودار سرعت - زمان مطابق شکل بالا است. (ب) در لحظه‌های $t=0$ و $t=300$ s، توجه کنید که فاصله از مبدأ مکان $|x|$ است و نه خود x . (ج) با قرار دادن $x=200$ m در رابطه $x=vt$ داریم:

$$\Delta x = vt \Rightarrow \Delta x = (2/3 \text{ m/s})(300 \text{ s}) = 200 \text{ m}$$

تمرین ۱-۱

شکل مقابل نمودار مکان - زمان دو متحرک A و B را نشان می‌دهد که در راستای محور x حرکت می‌کنند. (الف) مکان x در زمان $t=0$ برای هر یک از متحرک‌ها در شکل ب رسم شده است. (الف) از روی نمودار به‌طور تقریبی تعیین کنید کفش دوزک‌ها در چه لحظه و در چه مکانی به یکدیگر می‌رسند. (ب) با استفاده از معادله مکان - زمان، زمان و مکان هم‌رسی کفش دوزک‌ها را پیدا کنید.

تمرین ۱-۲

شکل الف، مکان در کفش دوزک B و A را که در راستای محور x حرکت می‌کنند در لحظه $t=0$ نشان می‌دهد. نمودار مکان - زمان این کفش دوزک‌ها در شکل ب رسم شده است.

فصل ۱: حرکت بر خط راست

۳-۱ حرکت با شتاب ثابت

شکل ۱۳-۱ نمودار سرعت - 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 - زمان ثابت است. پشی از این و در مثال ۸-۱ دیدیم در این شرایط، شتاب متوسط زمانی برابر شتاب لحظه‌ای متحرک است، یعنی $a_{avg} = a$.

هر گاه شتاب متحرکی در لحظه‌های مختلف یکسان باشد، حرکت جسم را حرکت با شتاب ثابت می‌نامیم (شکل ۱۳-۱). 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 سروکار داریم. جسمی که روی سطح هموار یک سرانته‌ای در حال لغزیدن است، یا جسمی که در حال سقوط است و اثر مقاومت هوا بر آن تأثیر نداشته دارای حرکت با شتاب ثابت است. همچنین خودرویی که پس از سبز شدن چراغ، شروع به حرکت می‌کند یا هواپیمایی که روی پشته پرواز حرکت می‌کند تا به شرایط لازم برای برخاستن برسد مثال‌هایی از حرکت با شتاب تقریباً ثابت است. به‌دلیل اهمیت و رایج بودن حرکت‌های با شتاب ثابت، ادامه با معادلات این نوع حرکت آشنا می‌شویم.

معادله سرعت - زمان در حرکت با شتاب ثابت، اگر مانند نمودار شکل ۱۳-۱ در $t=0$ سرعت اولیه متحرک v_0 و در لحظه t ، سرعت متحرک برابر v باشد در این صورت معادله ۶-۱ را برای حرکت با شتاب ثابت a (در امتداد خط راست می‌توانیم به‌صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$v = at + v_0 \quad (۶-۱)$$

همان‌طور که دیده می‌شود تغییرات v نسبت به t در معادله ۸-۱ به‌صورت یک تابع خطی است. به همین دلیل سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی صفر تا t برابر است با میانگین سرعت متحرک در این دو لحظه، یعنی:

$$v_{avg} = \frac{v_0 + v}{2} \quad (۹-۱)$$

(معادله سرعت متوسط در حرکت با شتاب ثابت)

تمرین ۷-۱

(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 کفش دوزک‌هاست ($x \approx 0.5$ m). همچنین خطی که از محل برخورد دو نمودار، موازی محور x رسم می‌شود و محور زمان را قطع می‌کند زمان هم‌رسی تقریبی کفش دوزک‌هاست ($t \approx 3/5$ s).

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

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

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

$$x_A = v_A t + x_{A0} = (-1/0 \text{ m/s})t + 4/0 \text{ m}$$

$$x_B = v_B t + x_{B0} = (1/0 \text{ m/s})t + (-3/0) \text{ m}$$

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

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

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

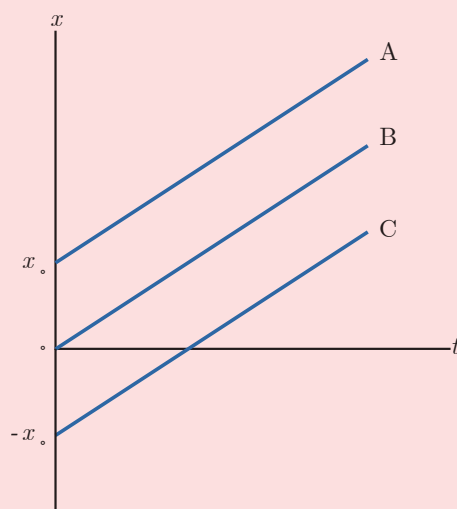
با جای‌گذاری t در یکی از معادله‌های مکان - زمان

کفش دوزک‌ها داریم:

$$x_A = (-1/0 \text{ m/s})(3/5 \text{ s}) + 4/0 \text{ m} = 0.5 \text{ m}$$

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۱-۲

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



۲ معادله حرکت سه متحرک به ترتیب $x = -v_A t + x_0$, $x = -v_B t$, و $x = -v_C t - x_0$ است که در آن $v_A = v_B = v_C > 0$ و x_0 عددی مثبت است. نمودار مکان - زمان این سه متحرک را در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

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

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

(الف) برابر سرعت لحظه‌ای است. (ب) برابر صفر است.

(پ) کوچک‌تر از سرعت لحظه‌ای است. (ت) بزرگ‌تر از سرعت لحظه‌ای است.

۵ معادله حرکت متحرکی در SI به صورت $x = 12t - 24$ است.

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

(ب) در چه لحظه‌ای متحرک به مبدأ مکان می‌رسد؟

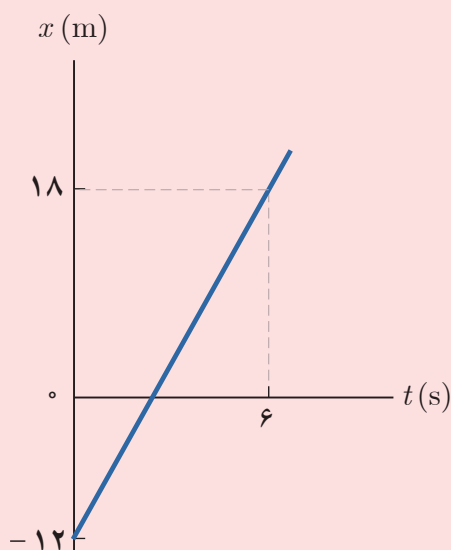
(پ) نمودار مکان زمان متحرک را رسم کنید.

۶ شکل صفحه بعد نمودار مکان - زمان متحرکی را در ۶ ثانیه اول حرکت نشان می‌دهد.

(الف) نوع حرکت متحرک را تعیین کنید.

(ب) معادله حرکت متحرک را بنویسید.

(پ) جابه‌جایی متحرک در ۲ ثانیه اول حرکت چقدر است؟

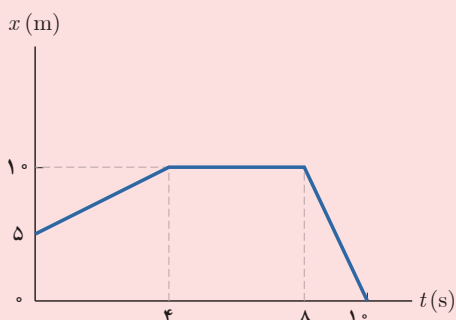


۷ جسمی با سرعت ثابت در امتداد خط راست در حرکت است. اگر این جسم در لحظه $t = 4\text{ s}$ در فاصله 22 m از مبدأ مکان و ۲ ثانیه بعد در فاصله 34 m از آن مبدأ باشد، سرعت جسم چقدر است؟ معادله مکان – زمان جسم را بنویسید.

۸ متحرکی در امتداد خط راست در حرکت است. این متحرک در ۲ ثانیه اول حرکت با سرعت ثابت 4 m/s ، آن گاه به مدت 4 s با سرعت ثابت 6 m/s و بقیه مسیر را به مدت 5 s با سرعت 3 m/s طی می کند. نمودار سرعت – زمان متحرک را رسم کنید. اگر در $t = 0$ متحرک در مبدأ مکان باشد، نمودار مکان – زمان آن را در کل مسیر رسم کنید.

۹ دو متحرک هم زمان از مبدأ مکان با سرعت های 72 km/h و 108 km/h در جهت محور x می گذرند. پس از چند دقیقه فاصله آنها از یکدیگر به 3600 m می رسد.

الف) ۶ ب) ۸ پ) ۱۰ ت) ۱۲



۱۰ شکل روبه رو نمودار مکان – زمان متحرکی را نشان می دهد که در امتداد خط راست حرکت می کند.

الف) جابه جایی متحرک در کل زمان حرکت چقدر است؟

ب) سرعت متوسط متحرک را در هر بازه زمانی و همچنین در کل زمان حرکت به دست آورید.

پ) معادله حرکت متحرک را در هر بازه زمانی بنویسید.

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

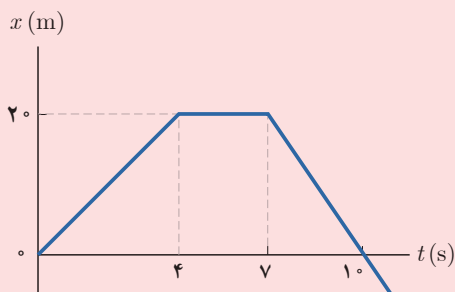
۱۱ ذره‌ای با سرعت ثابت روی محور x ها به حرکت درمی‌آید و پس از ۲s به مبدأ می‌رسد و ۲s بعد به نقطه $x = -6\text{m}$ می‌رسد. معادله حرکت آن در SI کدام است؟

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

۱۲ قطاری با سرعت ثابت 3m/s از روی پلی به طول 400m در مدت 20s می‌گذرد. طول قطار چند متر است؟

الف) ۲۰۰ ب) ۴۰۰ پ) ۶۰۰ ت) ۸۰۰

۱۳ نمودار مکان - زمان متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. سرعت این متحرک 10s پس از شروع حرکت چند m/s است؟



الف) صفر

ب) 9m/s در جهت مثبت محور x

پ) 9m/s در جهت منفی محور x

ت) $\frac{20}{3}\text{m/s}$ در جهت مثبت محور x

ث) $\frac{20}{3}\text{m/s}$ در جهت منفی محور x

۱۴ معادله سرعت - زمان متحرکی در SI به صورت $v = 4t + v_0$ و سرعت متوسط آن در ۵ ثانیه اول حرکت 20m/s بوده است.

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

۱۵ دو هواپیمای از فرودگاهی به‌طور هم‌زمان به طرف فرودگاه دیگری پرواز می‌کنند. تندی پرواز هواپیمای اول

1080km/h و تندی پرواز هواپیمای دوم 900km/h است. اگر هواپیمای اول پس از ۲ ساعت به مقصد برسد،

الف) فاصله بین دو فرودگاه چقدر است؟

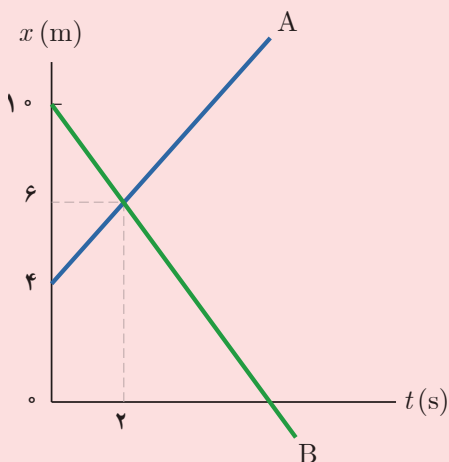
ب) هواپیمای دوم چند دقیقه پس از هواپیمای اول به مقصد

می‌رسد؟ (فرض کنید هواپیماها از ابتدا تا انتها روی مسیری

مستقیم و با سرعت ثابت حرکت می‌کنند.)

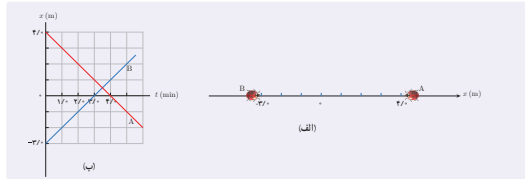
۱۶ نمودار مکان - زمان دو متحرک مطابق شکل روبه‌رو

است. معادله مکان - زمان این دو متحرک را به‌دست آورید.



۳-۱- حرکت با شتاب ثابت

فصل ۱: حرکت بر خط راست



۳-۱ حرکت با شتاب ثابت

شکل ۳-۱ نمودار سرعت - 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 - زمان ثابت است. پیش از این و در مثال ۸-۱ 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 بازه زمانی برابر شتاب لحظه‌ای متحرک است، یعنی $a_{av} = a$.

هرگاه شتاب متحرکی در لحظه‌های مختلف یکسان باشد، حرکت جسم را حرکت با شتاب ثابت می‌نامیم (شکل ۳-۱). 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 سروکار داریم. جسمی که روی سطح هموار یک سرانته‌ای 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 پلاند پرواز حرکت می‌کند تا به شرایط لازم برای برخاستن برسد مثال‌هایی از حرکت با شتاب تقریباً ثابت‌اند. به دلیل اهمیت و رایج بودن حرکت‌های با شتاب ثابت، در ادامه با معادلات این نوع حرکت آشنا می‌شویم.

معادله سرعت - زمان در حرکت با شتاب ثابت: اگر مانند نمودار شکل ۳-۱ در $t = 0$ سرعت اولیه متحرک v_0 و در لحظه t ، سرعت متحرک برابر v باشند در این صورت معادله ۸-۱ را برای حرکت با شتاب ثابت $(a = a_{av})$ در امتداد خط راست می‌توانیم به‌صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$(8-1) \quad \text{معادله سرعت - زمان در حرکت با شتاب ثابت} \quad v = at + v_0$$

همان‌طور که دیده می‌شود تغییرات v نسبت به t در معادله ۸-۱ به‌صورت یک تابع خطی است. به همین دلیل سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی صفر تا t برابر است با میانگین سرعت متحرک در این دو لحظه، یعنی:

$$(9-1) \quad \text{معادله سرعت متوسط در حرکت با شتاب ثابت} \quad v_{av} = \frac{v_0 + v}{2}$$

راهنمای تدریس: مثال ۸-۱ شروع مناسبی برای بررسی حرکت با شتاب ثابت است. در کتاب درسی نیز با همین مثال و تمرکز روی نمودار شکل ۳-۱ 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 رابطه ۹-۱ 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.

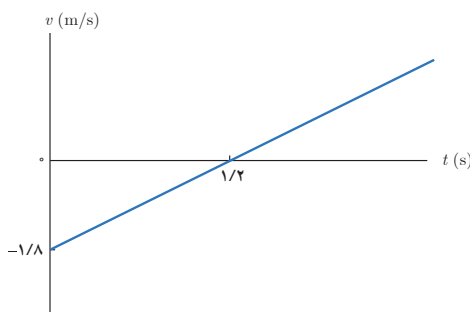
تمرین ۸-۱ (الف)

$$\begin{aligned} v &= (-1/8 \text{ m/s}^2)t + 2/2 \text{ m/s} \\ &= (-1/8 \text{ m/s}^2)(4/^\circ \text{ s}) + 2/2 \text{ m/s} \\ &= -5/^\circ \text{ m/s} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} v_0 &= 2/2 \text{ m/s} \\ v_{av} &= \frac{v_0 + v}{2} = \frac{2/2 \text{ m/s} + (-5/^\circ \text{ m/s})}{2} = -1/4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

چون حرکت جسم با شتاب ثابت است، داریم:



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

$$\begin{aligned} v &= (-1/8 \text{ m/s}^2)t + 2/2 \text{ m/s} \\ 0 &= (-1/8 \text{ m/s}^2)t + 2/2 \text{ m/s} \Rightarrow t \approx 1/2 \text{ s} \end{aligned}$$

مثال ۱۱-۱

شکل خودرو هوایی را نشان می‌دهد که از حال سکون و با شتاب ثابت روی پل 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 بازه زمانی چقدر است؟ ج) جابه‌جایی هواپیما در این مدت چقدر است؟ پاسخ: الف) با توجه به ثابت بودن شتاب حرکت هواپیما روی پل پرواز، داده‌های روی شکل را می‌توان در معادله A_{1-1} جای‌گذاری کرد. به این ترتیب داریم:

$$v = at \Rightarrow 40 \text{ m/s} = (2.7 \text{ m/s}^2)t \Rightarrow t = 14.8 \text{ s}$$

در اولین فرصتی که سوار هواپیما شوید، نتیجه به‌دست آمده را واریس کنید!

ب)

$$v_{\text{avg}} = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{0 + 40 \text{ m/s}}{2} = 20 \text{ m/s}$$

ج) از رابطه A_{1-1} داریم:

$$v_{\text{avg}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v_{\text{avg}} \Delta t = (20 \text{ m/s})(14.8 \text{ s}) = 296 \text{ m}$$

تعریف ۱-۱

معادله سرعت - زمان متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند در SI به صورت $a = -1/A_2 + 1/A_1$ است. الف) سرعت متحرک در لحظه $t = 4 \text{ s}$ چقدر است؟ ب) سرعت متوسط متحرک و جابه‌جایی آن در بازه زمانی صفر تا $t = 4 \text{ s}$ چقدر است؟ ج) نمودار سرعت - زمان این متحرک را رسم کنید.

فعالیت ۲-۱

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

فعالیت ۲-۱

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 اندازه 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 - 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.

– حرکت خودروی الف توسط نمودار ۲

– حرکت خودروی ب توسط نمودار ۱

– حرکت خودروی پ توسط نمودار ۴

– 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 دور دست می‌بیند و با شتاب ثابت، تندی خود را کاهش می‌دهد (حرکت کند شونده).

فصل یک: حرکت بر خط راست

فصل یک: حرکت بر خط راست

معادله مکان – 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 ۱-۱ و ۱-۲ داریم:

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

با قرار دادن رابطه ۱-۱ در معادله بالا داریم:

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

با ساده‌سازی این رابطه خواهیم داشت:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \quad (1-1)$$

همان‌طور که دیده می‌شود در این نوع حرکت، مکان متحرک تابعی درجه دوم از زمان است. با رسم تابع‌های درجه دوم در ریاضی ۱ باید آشنایان کنید. شکل ۱-۱ نمودار $x=f(t)$ را برای چند حالت مختلف نشان می‌دهد.

شکل ۱-۱: نمودار مکان – زمان

بر حرکت با شتاب ثابت برای چند حالت مختلف

شکل ۱-۲: نمودار مکان – زمان – زمان متحرک را نشان می‌دهد که با شتاب ثابت در امتداد محور x حرکت می‌کند. (الف) شتاب متحرک را پیدا کنید. (ب) معادله سرعت – زمان متحرک را بنویسید و نمودار آن را رسم کنید. (ج) جابجایی متحرک را در بازه زمانی صفر تا $3/8$ پیدا کنید. (د) با توجه به اینکه سطح بین نمودار سرعت – زمان و محور زمان در هر بازه زمانی برای جابجایی در آن بازه است، جابجایی متحرک را در بازه زمانی صفر تا $3/8$ حساب کنید و نتیجه را با قسمت ب مقایسه کنید. (ه) سرعت متوسط متحرک را در بازه زمانی صفر تا $3/8$ پیدا کنید.

پاسخ: (الف) شیب خط‌چین مماس بر منحنی در $t = 3/8$ برابر صفر است و نشان‌دهنده این است که سرعت متحرک در این لحظه صفر است (الف) $(v = 0/m/s)$. با توجه به داده‌های روی نمودار و معادله ۱-۱ داریم:

$$x_0 = 9/m, \quad t = 3/8 \Rightarrow x = 9/m, \quad v_0 = 0/m/s$$

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow 0 = \frac{1}{2}a\left(\frac{3}{8}\right)^2 + 0 + 9/m \Rightarrow a = -24/m/s^2$$

(ب) از معادله ۱-۱ داریم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow v = (-24/m/s^2)t + 0 \Rightarrow v = (-24/m/s^2)t$$

نمودار این معادله در شکل روی‌رو رسم شده است.

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

تمرین ۹-۱

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

$x = 0$

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

$a = 1/0 \text{ m/s}^2$

$\Delta x = 30/0 \text{ m}$

$v = ?$

از آنجا که هنوز معادله سرعت – جابجایی معرفی نشده است، هدف این تمرین استفاده از معادله‌هایی است که تاکنون دانش‌آموزان با آنها آشنا شده‌اند. ابتدا از معادله ۱-۱، مدت زمان حرکت خودرو را به دست می‌آوریم:

فرض کنید: $\Delta x = (-1/0 \text{ m}) = 1/0 \text{ m}$ برای $(-1/0 \text{ m/s})$ و $(1/0 \text{ m/s})$ است که با (د) سطح بین منحنی سرعت و محور زمان در نمودار سرعت – زمان، برای $9/0 \text{ m} = 9/0 \text{ m/s} \times (3/0 \text{ s}) = 9/0 \text{ m}$ است که با نتیجه قسمت ب سازگار است.

(ه) از رابطه ۱-۲ داریم:

توجه کنید که می‌توانیم سرعت متوسط در این بازه زمانی را از رابطه $v_{\text{avg}} = \frac{(v + v_0)}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می‌رسد.

تمرین ۹-۲

خودرویی با سرعت $18/0 \text{ km/h}$ در امتداد مسیری مستقیم از چهارراهی می‌گذرد تندی آن با شتاب $1/0 \text{ m/s}^2$ افزایش می‌یابد. سرعت خودرو پس از $30/0 \text{ m}$ جابجایی چقدر است؟

معادله سرعت – جابجایی در حرکت با شتاب ثابت: اگر هنگام بررسی حرکت جسمی، زمان t معلوم نباشد، می‌توان از معادله سرعت – جابجایی برای پیدا کردن یکی از کمیت‌های جابجایی Δx ، سرعت اولیه v_0 ، سرعت v ، شتاب a متحرک استفاده کرد. برای بدست آوردن این معادله از رابطه‌های ۱-۱ و ۱-۲ شروع می‌کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام بدست آوردن معادله مکان – زمان دیدیم می‌توان نوشت:

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

با بدست آوردن t از معادله ۱-۲ و قرار دادن آن در رابطه بالا داریم:

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

در این صورت داریم:

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \quad (1-2)$$

اگرچه این رابطه را برای بازه زمانی صفر تا t بدست آوردیم، برای هر بازه زمانی دلخواه t_1 تا t_2 می‌توانیم از رابطه زیر استفاده کنیم که در آن x_1 و x_2 متناظر با لحظه t_1 و t_2 هستند و v_1 و v_2 متناظر با لحظه t_1 و t_2 هستند.

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

شکل ۱-۲: محفظان یک پارک حفاظت شده هنگام گشت شبانه، با تندی $18/0 \text{ km/h}$ در جاده‌ای مستقیم در حرکت است که ناگهان گوزن بدون حرکتی را در جلوی خود می‌بیند و ترمز می‌گیرد (شکل روی‌رو). حرکت خودرو با شتابی به اندازه $1/0 \text{ m/s}^2$ کند می‌شود تا سرانجام متوقف شود. اگر لحظه‌ای که محفظان ترمز می‌گیرد، گوزن در فاصله $22/0$ متری از خودرو باشد.

(الف) خودرو در چه فاصله‌ای از گوزن متوقف می‌شود؟

(ب) چه مدت طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟

تمرین ۹-۱

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

$x = 0$

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

$a = 1/0 \text{ m/s}^2$

$\Delta x = 30/0 \text{ m}$

$v = ?$

از آنجا که هنوز معادله سرعت – جابجایی معرفی نشده است، هدف این تمرین استفاده از معادله‌هایی است که تاکنون دانش‌آموزان با آنها آشنا شده‌اند. ابتدا از معادله ۱-۱، مدت زمان حرکت خودرو را به دست می‌آوریم:

ادامه راهنمای حل تمرین ۹-۱

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + x_0 \Rightarrow$$

$$3.0 \text{ m} = \frac{1}{2}(1.0 \text{ m/s}^2)t^2 + (5.0 \text{ m/s})t + 0$$

معادله مکان - زمان خودرو در SI به صورت زیر ساده می شود :

$$t^2 + 10.0t - 6.0 = 0$$

پاسخ قابل قبول این معادله درجه دوم $t = 2.0 \text{ s}$ است. به این ترتیب از معادله ۸-۱ داریم :

$$v = at + v_0 = (1.0 \text{ m/s}^2)(2.0 \text{ s}) + 5.0 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow v = 7.0 \text{ m/s}$$

دانش آموزان در ادامه این بخش که با معادله سرعت - جابه جایی آشنا می شوند، خواهند دید که راه حل ساده تری برای این تمرین نیز وجود دارد.

مثال ۱۳

در لحظه $t_1 = 2 \text{ s}$ داریم :

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + x_0 \Rightarrow x_1 = \frac{1}{2}(1.0 \text{ m/s}^2)(2 \text{ s})^2 + (-2.0 \text{ m/s})(2 \text{ s}) + 0 \Rightarrow x_1 = 0$$

در بازه زمانی $t_1 = 2 \text{ s}$ تا $t_2 = 4 \text{ s}$ ، حرکت با سرعت ثابت روی خط راست است. به این ترتیب با توجه به معادله ۸-۱، جابه جایی در این بازه زمانی برای است :

$$\Delta x = v \Delta t \Rightarrow \Delta x = (2.0 \text{ m/s})(4 \text{ s} - 2 \text{ s}) = 4.0 \text{ m}$$

در نتیجه متحرک در لحظه $t_2 = 4 \text{ s}$ در مکان $x_2 = 4.0 \text{ m}$ قرار دارد.

در بازه زمانی $t_2 = 4 \text{ s}$ تا $t_3 = 5 \text{ s}$ ، حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب داریم :

$$\Delta x = \left(\frac{v_3 + v_2}{2}\right) \Delta t = \left(\frac{2.0 \text{ m/s} + 0}{2}\right)(1 \text{ s}) \Rightarrow \Delta x = 1.0 \text{ m}$$

در نتیجه متحرک در لحظه $t_3 = 5 \text{ s}$ در مکان $x_3 = 4.0 \text{ m} + 1.0 \text{ m} = 5.0 \text{ m}$ قرار دارد.

پس در کل جابه جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان نشان داده شده است.

مسافت کل پیموده شده برای $\vec{v} = 2.0 \text{ m/s}$ و $\vec{v} = 0 \text{ m/s}$ در $t = 1 \text{ s}$ است.

بردار جابه جایی کل که برابر $\vec{r} = 5.0 \text{ m}$ است.

مساحت سطح زیر نمودار سرعت - زمان که با رنگ زرد در شکل مشخص شده است، برابر جابه جایی متحرک است. به این ترتیب برای هر یک از بازه های زمانی داریم :

$$\Delta x_1 = \frac{1}{2}(-2.0 \text{ m/s})(1 \text{ s}) = -1.0 \text{ m} \quad \Delta x_2 = \frac{1}{2}(2.0 \text{ m/s})(1 \text{ s}) = 1.0 \text{ m}$$

$$\Delta x_3 = (2.0 \text{ m/s})(2 \text{ s}) = 4.0 \text{ m} \quad \Delta x_4 = \frac{1}{2}(2.0 \text{ m/s})(1 \text{ s}) = 1.0 \text{ m}$$

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 = -1.0 \text{ m} + 1.0 \text{ m} + 4.0 \text{ m} + 1.0 \text{ m} = 5.0 \text{ m}$$

همان طور که از نتیجه ۱۳-۱ دیده می شود، مساحت سطح بین نمودار سرعت - زمان و محور زمان در کل زمان حرکت، با جابه جایی متحرک برابر است.

پاسخ : الف) حرکت خودرو را در جهت مثبت محور x فرض می کنیم. همچنین برای سادگی، مبدأ زمان و مکان را جایی می گیریم که محیطیان ترمز گرفته و در نتیجه $x = 0 \text{ m}$ و $v = 0 \text{ m/s}$ است. از طرفی، چون سرعت خودرو در جهت محور x به تدریج در حال کاهش است، شتاب آن بر خلاف جهت محور x و در نتیجه منفی خواهد شد. به این ترتیب از معادله ۸-۱ داریم :

$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) \Rightarrow 0 - (11 \text{ m/s})^2 = 2(-3 \text{ m/s}^2)(x - 0)$$

در نتیجه $x = 19/2 \text{ m}$ و خودرو در فاصله 9.5 m از گوزن متوقف می شود و خوشبختانه برخوردی بین خودرو و گوزن صورت نمی گیرد.

ب) از رابطه ۸-۱ داریم :

$$v = at + v_0 \Rightarrow 0 = 1.0 \text{ m/s}^2 t + 11 \text{ m/s} \Rightarrow t = 11 \text{ s}$$

مثال ۱۴

متحرکی که در لحظه $t = 0$ از مکان $x = 0$ می گذرد، نمودار سرعت-زمان این متحرک مطابق شکل رویه روبرو است.

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

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

پ) با توجه به نمودار سرعت - زمان توضیح دهید در کدام بازه های زمانی حرکت جسم متوقف شده و یا کند شده است.

ت) مکان متحرک را در هر یک از لحظه های $t_1 = 1 \text{ s}$ ، $t_2 = 2 \text{ s}$ ، $t_3 = 3 \text{ s}$ ، $t_4 = 4 \text{ s}$ و $t_5 = 5 \text{ s}$ پیدا کنید و روی محور x نشان دهید.

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

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

پاسخ : الف) با توجه به نمودار، در بازه زمانی صفر تا $t_1 = 1 \text{ s}$ ، سرعت متحرک منفی است و بنابراین در جهت منفی محور x حرکت کرده است. همچنین در بازه زمانی $t_1 = 1 \text{ s}$ تا $t_2 = 2 \text{ s}$ ، سرعت متحرک مثبت است و بنابراین در جهت مثبت محور x حرکت کرده است.

ب) تنها در لحظه $t_3 = 3 \text{ s}$ علامت سرعت و در نتیجه جهت حرکت متحرک تغییر کرده است.

پ) در بازه زمانی صفر تا $t_1 = 1 \text{ s}$ ، متحرک در حال کاهش و در نتیجه حرکت کند شده است.

در بازه زمانی $t_1 = 1 \text{ s}$ تا $t_2 = 2 \text{ s}$ ، متحرک در حال افزایش و در نتیجه حرکت تند شده است.

در بازه زمانی $t_2 = 2 \text{ s}$ تا $t_3 = 3 \text{ s}$ ، حرکت با سرعت ثابت است.

در بازه زمانی $t_3 = 3 \text{ s}$ تا $t_4 = 4 \text{ s}$ ، متحرک در حال کاهش و در نتیجه حرکت کند شده است.

ت) در بازه زمانی صفر تا $t_1 = 1 \text{ s}$ ، حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب از معادله ۸-۱ داریم :

$$v = at + v_0 \Rightarrow 0 = 1.0 \text{ m/s}^2 t + (-2.0 \text{ m/s}) \Rightarrow t = 2.0 \text{ s}$$

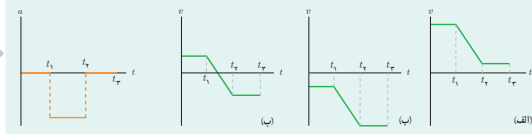
در این صورت با توجه به معادله ۸-۱، در لحظه $t_1 = 1 \text{ s}$ داریم :

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + x_0 \Rightarrow x_1 = \frac{1}{2}(1.0 \text{ m/s}^2)(1 \text{ s})^2 + (-2.0 \text{ m/s})(1 \text{ s}) + 0 \Rightarrow x_1 = -1.0 \text{ m}$$

فصل ۱: حرکت بر خط راست

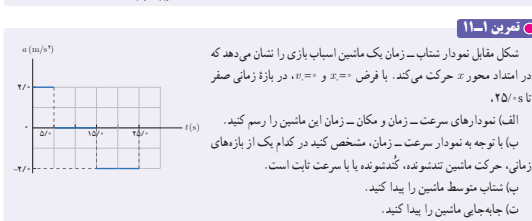
پرسش ۷-۱

نمودار شتاب - زمان حرکتی که در امتداد محور x حرکت می کند مطابق شکل زیر است. توضیح دهید چگونه هر یک از نمودارهای سرعت - زمان شکل های الف، ب و پ می تواند متناظر با این نمودار شتاب - زمان باشد.



تمرین ۱۰-۱

آهویی در مسیری مستقیم در امتداد محور x می دود. نمودار سرعت - زمان آهو در بازه زمانی صفر تا $12/s$ مطابق شکل است. در این بازه زمانی (الف) مسافت کل پیموده شده توسط آهو را به دست آورید. (ب) جابه جایی آهو را پیدا کنید. (پ) نمودار شتاب - زمان آهو را رسم کنید.



۴-۱ سقوط آزاد

وقتی گلوله ای را رها می کنیم اثر مقاومت هوا هنگام حرکت آن ناچیز است. ولی وقتی برکه کاغذی را رها می کنیم اثر مقاومت هوا را هنگام حرکت آن نمی توان نادیده گرفت. با مقایسه زمان سقوط گلوله و برکه کاغذ، به سادگی می توان تفاوت اثر مقاومت هوا را روی حرکت این دو جسم تجربه کرد (شکل ۱۵-۱ الف). حال اگر برکه کاغذ را مجاله کنیم، اثر مقاومت هوا هنگام سقوط آن به طور چشمگیری کاهش می یابد (شکل ۱۵-۱ ب). جسی که تحت تأثیر جاذبه گرانشی، در نزدیکی سطح

ادامه راهنمای تدریس : هرچند معادله ۱-۱۱ به طور مستقیم با زمان رابطه ای ندارد و به همین دلیل در گذشته به آن معادله مستقل از زمان در حرکت با شتاب ثابت می گفتند ولی در تمامی منابع امروزی فیزیک، این معادله را، معادله سرعت - جابه جایی می نامند، تا بر اساس متغیرهای اصلی این معادله نام گذاری شده باشد.

مثال ۱-۱۴، یکی از جامع ترین مثال های این فصل است که به مرور تمامی مفاهیمی که از ابتدای فصل تا اینجا به آن پرداخته ایم در این مثال مورد بررسی قرار می گیرد. لذا توصیه می شود که وقت کافی برای بررسی این مثال در کلاس درس بگذارید.

پرسش ۷-۱

هر سه نمودار سرعت - زمان شکل های (الف)، (ب) و (پ) می تواند متناظر با نمودار شتاب - زمان باشد. دانش آموزان باید بتوانند برای هر کدام یک مثال از جهان واقعی بزنند. برای مثال می توان گفت :

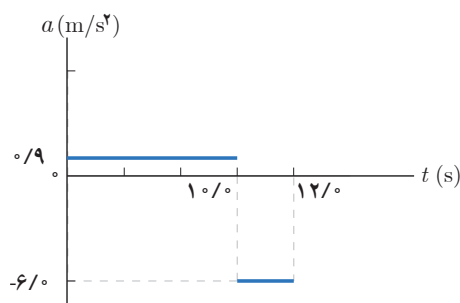
نمودار سرعت - زمان شکل (الف) : خودرویی با سرعت ثابت و در جهت مثبت محور x در حال حرکت است که مانعی را در دور دست می بیند و با شتاب ثابت، تندی خود را کاهش می دهد و سپس با تندی کمتری در همان جهت اولیه، به حرکت خود ادامه می دهد.

نمودار سرعت - 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 می دهد. پس از رسیدن خودرو به تندی مورد نظر، در همان جهت به حرکت خود ادامه می دهد.

نمودار سرعت - 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 می دهد تا به صفر برسد. آنگاه با همان شتاب ولی در جهت منفی محور x ، تندی خود را افزایش می دهد تا به مقدار مورد نظر برسد. سپس با همین تندی و در همان جهت (منفی محور x) به حرکت خود ادامه می دهد.

تمرین ۱-۱۰

همان‌طور که در مثال ۱-۱۲ اشاره شده است (جمله آبی رنگ)، سطح بین نمودار سرعت - زمان و محور زمان در هر بازه 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 - زمان، در بازه زمانی صفر تا $۱۲/۰\text{s}$ ، سرعت متحرک مثبت است و مفهوم فیزیکی آن این است که آهو در این بازه زمانی در جهت مثبت محور x حرکت کرده است. لذا چون آهو در یک جهت حرکت کرده است و در کل بازه زمانی، جهت حرکت خود را تغییر نداده است، مسافت پیموده شده توسط آهو، با اندازه بردار جابه‌جایی آهو برابر است. (الف و ب) به این ترتیب با توجه به سطح زیر نمودار سرعت - 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 و همچنین ۱۰s تا ۱۲s به دست می‌آوریم. اگر این شتاب‌ها را به ترتیب a_1 و a_2 نام‌گذاری کنیم، خواهیم داشت:



$$a_1 = \frac{(۱۲/۰ - ۳/۰) \text{ m/s}}{۱۰/۰ \text{ s}} = ۰/۹ \text{ m/s}^2$$

$$a_2 = \frac{(۰ - ۱۲/۰) \text{ m/s}}{(۱۲/۰ - ۱۰/۰) \text{ s}} = -۶/۰ \text{ m/s}^2$$

تمرین ۱-۱۱

الف) ابتدا سرعت متحرک را در هر یک از لحظه‌های $t = ۵/۰\text{s}$ و $t = ۱۵/۰\text{s}$ و همچنین $t = ۲۵/۰\text{s}$ به دست می‌آوریم. از معادله ۱-۷ دیدیم.

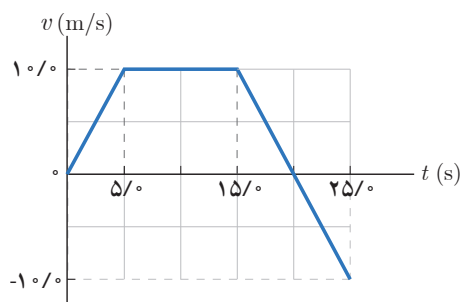
$$v = at + v_0 = (۲\text{ m/s}^2)(۵/۰\text{ s}) + ۰ = ۱۰/۰ \text{ m/s} \quad \text{در لحظه } t = ۵/۰\text{ s}$$

چون شتاب ماشین اسباب‌بازی در بازه زمانی $۵/۰\text{s}$ تا $۱۵/۰\text{s}$ صفر است، در نتیجه، سرعت ماشین اسباب‌بازی در لحظه $t = ۱۵/۰\text{s}$ برابر سرعت آن در لحظه $t = ۵/۰\text{s}$ است:

$$v = at + v_0 = (-۲/۰ \text{ m/s}^2)(۱۰/۰ \text{ s}) + ۱۰/۰ \text{ m/s} = -۱۰/۰ \text{ m/s} \quad \text{در لحظه } t = ۲۵/۰\text{ s}$$

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

برای رسم نمودار مکان - زمان، مکان متحرک را در هر یک از لحظه‌های $t = ۵/۰\text{s}$ ، $t = ۱۵/۰\text{s}$ ، $t = ۲۰/۰\text{s}$ و $t = ۲۵/۰\text{s}$ پیدا می‌کنیم. از معادله $x = (\frac{v_1 + v_2}{2})\Delta t + x_0$ داریم:



$$x = \left(\frac{0 + 10 \text{ m/s}}{2} \right) (5 \text{ s}) + 0 = 25 \text{ m} \quad \text{در لحظه } t = 5 \text{ s}$$

در لحظه $t = 15 \text{ s}$: چون در بازه زمانی 5 s تا 15 s متحرک با سرعت ثابت حرکت کرده است از معادله ۱-۷ داریم:

$$x = (10 \text{ m/s})(10 \text{ s}) + 25 \text{ m} = 125 \text{ m}$$

اکنون باید ببینیم که در چه لحظه‌هایی از بازه زمانی 15 s تا 25 s سرعت متحرک صفر می‌شود به این منظور از معادله سرعت و زمان (معادله ۱-۸) داریم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow 0 = (-2 \text{ m/s}^2)t + 10 \text{ m/s} \Rightarrow t = 5 \text{ s}$$

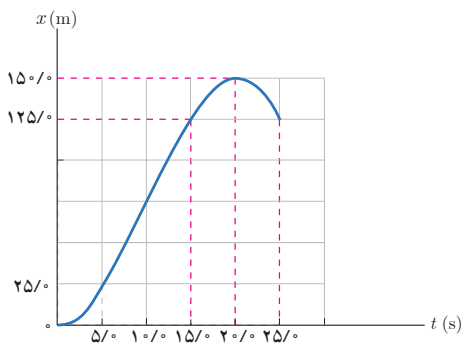
یعنی 5 s پس از لحظه 15 s که متحرک با شتاب منفی به حرکت خود ادامه می‌دهد سرعت آن صفر می‌شود و باید شیب خط مماس بر منحنی مکان – زمان آن نیز صفر شود. به این ترتیب اکنون باید در لحظه $t = (5 + 15) \text{ s} = 20 \text{ s}$ مکان متحرک را پیدا کنیم.

$$x = \left(\frac{10 \text{ m/s} + 0}{2} \right) (5 \text{ s}) + 125 \text{ m} = 150 \text{ m}$$

همچنین در لحظه $t = 25 \text{ s}$ داریم:

$$x = \left(\frac{0 - 10 \text{ m/s}}{2} \right) (5 \text{ s}) + 150 \text{ m} = 150 \text{ m} = 125 \text{ m}$$

به این ترتیب با داشتن مکان متحرک در لحظه‌های مورد نظر و با توجه به اینکه در بازه زمانی 0 تا 5 s حرکت تندشونده، در بازه زمانی 5 s تا 15 s حرکت با سرعت ثابت، در بازه زمانی 15 s تا 20 s حرکت کندشونده، در بازه زمانی 20 s تا 25 s نیز حرکت کندشونده است، نمودار مکان – زمان متحرک مطابق شکل زیر خواهد بود.



(ب) در قسمت (الف) اشاره شده است.

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{(-10 - 0) \text{ m/s}}{(25 - 0) \text{ s}} = -0.4 \text{ m/s}^2 \quad \text{(ب)}$$

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

$$\Delta x = 125 \text{ m} - 0 = 125 \text{ m}$$

توجه

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

تمرین‌های پیشنهادی بخش ۱-۳

۱ متحرکی در مسیری مستقیم با شتاب ثابت حرکت می‌کند. سرعت اولیه و شتاب این متحرک به ترتیب 4 m/s^2 و 4 m/s است. سرعت متوسط متحرک در دو ثانیه اول حرکت چند m/s است؟

الف) ۸ ب) ۱۰ پ) ۱۲ ت) ۱۴

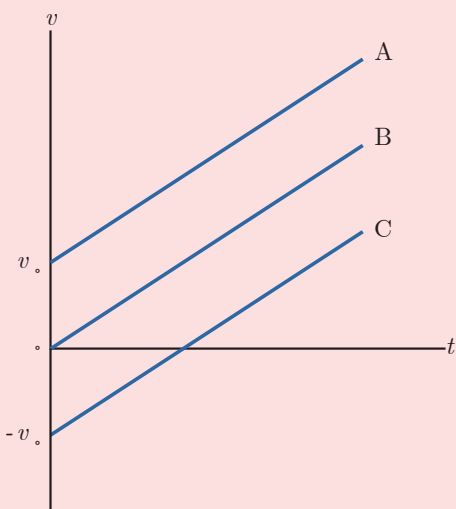
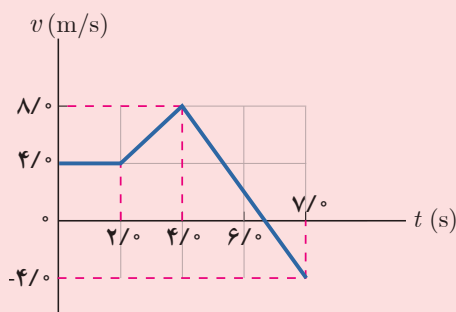
۲ دو متحرک به‌طور هم‌زمان، از حال سکون و از یک نقطه به حرکت درمی‌آیند. یکی با شتاب a و دیگری با شتاب $(a + 2)$ در SI. پس از t ثانیه، سرعت آنها به ترتیب به 10 و 12 متر بر ثانیه می‌رسد. شتاب a چقدر است؟

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 18 km/h می‌رسد. الف) معادله سرعت - زمان اتومبیل را بنویسید.

ب) نمودار سرعت - زمان اتومبیل را رسم و سرعت آن را 10 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 بازه زمانی پیدا کنید.



۵ نمودار $v - t$ سه متحرک بر مسیر مستقیم مطابق شکل روبه‌رو

است. معادله سرعت - زمان هر متحرک را بنویسید.

۶ معادله سرعت - زمان سه متحرک به ترتیب $v = -a_B t$ ، $v = a_A t + v_0$ 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 - 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 می توانست این شتاب را بگیرد، چقدر طول می کشید تا با حرکت بر خط راست، از حال سکون به سرعت 108 km/h برسد؟

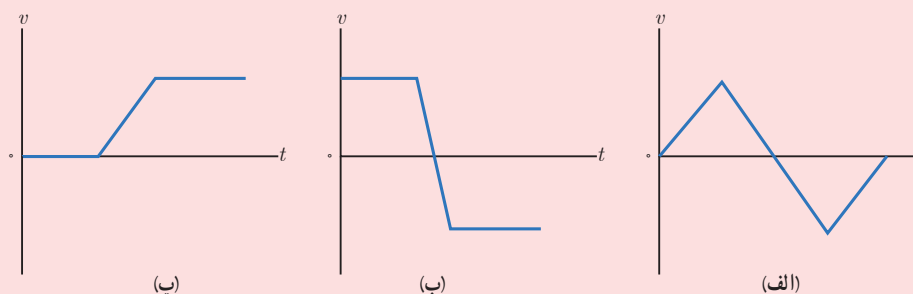
۸ قطاری با سرعت 96 km/h و در امتداد محور x حرکت می کند. چند ثانیه باید با شتاب 2 m/s^2 ترمز کند تا به سرعت 24 km/h برسد؟

الف) ۵ ب) 10° پ) 15° ت) 20°

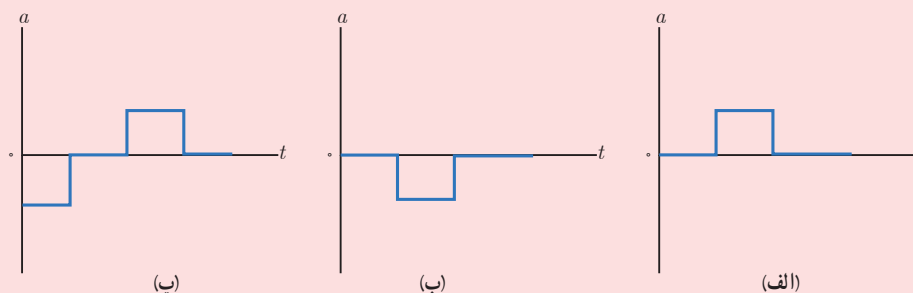
۹ سرعت متوسط خودرویی که از حال سکون با شتاب $1/6 \text{ m/s}^2$ در امتداد محور x به حرکت درمی آید در 5 ثانیه اول حرکت چند m/s است؟

الف) ۴ ب) ۸ پ) ۶ ت) 10°

۱۰ در شکل زیر سه نمودار سرعت - زمان سه متحرک که در امتداد محور x در حرکت اند رسم شده است. برای هر نمودار :
الف) نمودار شتاب - زمان نظیر آن را رسم کنید.
ب) شرح کوتاهی برای نوع حرکت هر یک بنویسید.



۱۱ در شکل زیر سه نمودار شتاب - زمان رسم شده است. برای هر کدام،
الف) نمودار سرعت - 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 هر یک بنویسید.

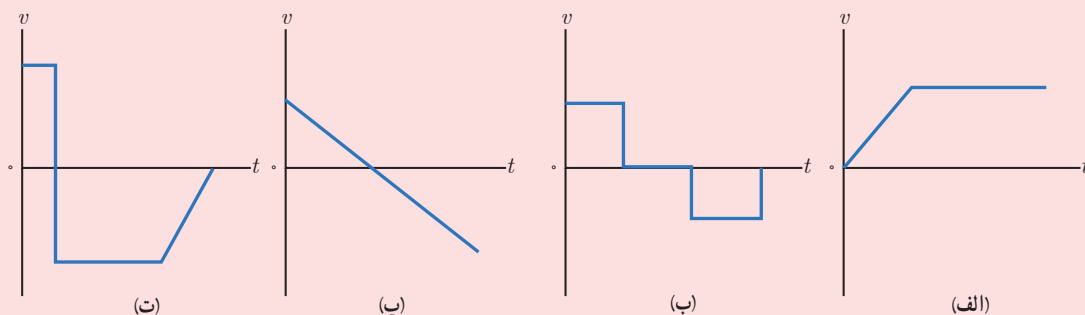


۱۲ در شکل زیر چهار نمودار سرعت - زمان رسم شده است. برای هر نمودار

الف) نمودار شتاب - 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.

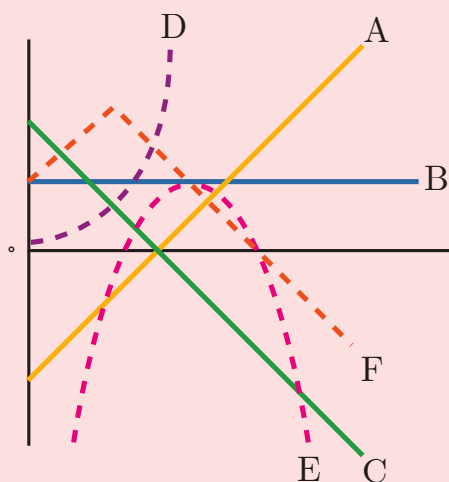


۱۳ شکل روبه‌رو چند نمودار را با محورهای بدون علامت نشان می‌دهد.

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؟

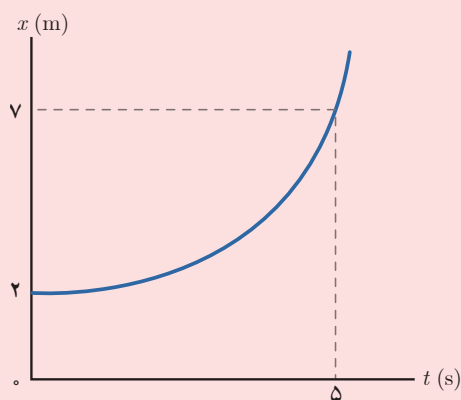


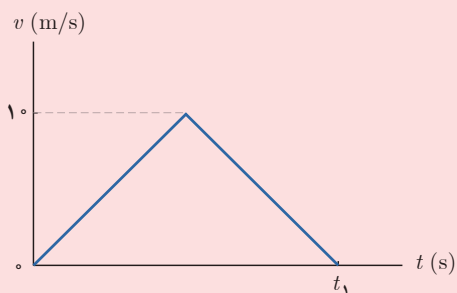
۱۴ نمودار مکان - زمان متحرکی که از حال سکون با شتاب ثابت بر

خط راست به حرکت درمی‌آید مطابق شکل روبه‌رو است :

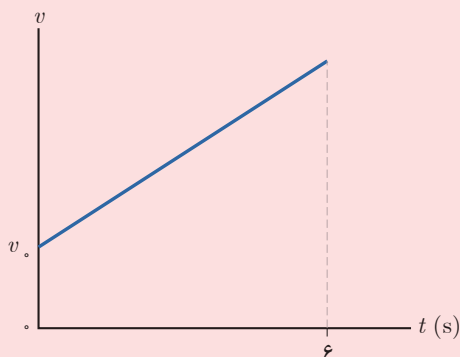
الف) سرعت متحرک را در لحظه $t = 5$ s چقدر است؟

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

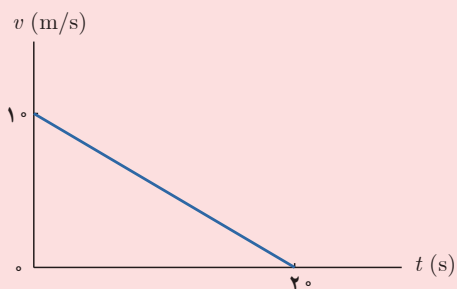




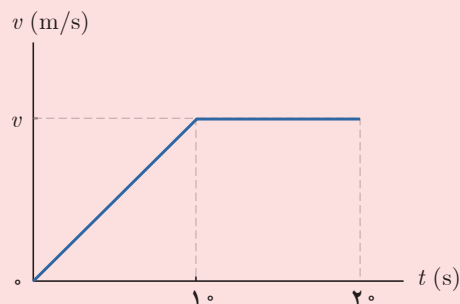
۱۵ نمودار سرعت - زمان متحرکی که بر خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است : اگر مسافت پیموده شده توسط متحرک تا لحظه t_1 برابر ۵۵m باشد، t_1 چقدر است؟



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



۱۷ نمودار $v - t$ متحرکی که بر مسیری مستقیم در حرکت است مطابق شکل روبه‌رو است : معادله مکان - زمان این متحرک را پیدا کنید. در $t = 0$ متحرک از مبدأ مکان عبور کرده است.



۱۸ نمودار $v - t$ 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؟

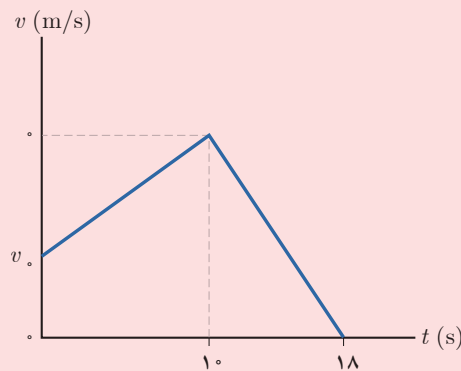
۱۹ سرعت متحرکی در یک مسیر مستقیم در مکان $x_1 = 4\text{m}$ برابر ۸m/s است. اگر شتاب حرکت $\frac{9}{4}\text{m/s}^2$ باشد، در چه مکانی سرعت متحرک برابر ۱۰m/s است؟

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

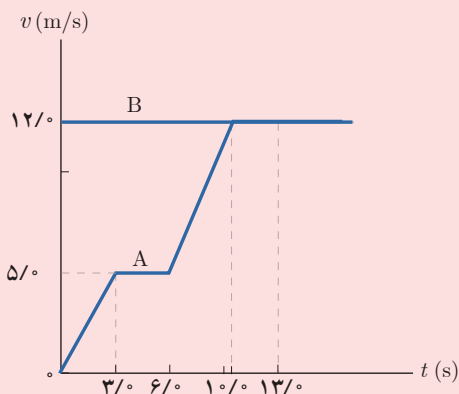
۲۱ معادله مکان-زمان متحرکی در SI به صورت $x = -t^2 + 4t + 2$ است. حرکت آن از مبدأ زمان تا لحظه $t = 8 \text{ s}$ چگونه است؟
 الف) همواره کندشونده (ب) همواره تندشونده (پ) ابتدا کندشونده و سپس تندشونده (ت) ابتدا تندشونده و سپس کندشونده
 ۲۲ جسمی با سرعت اولیه 4 m/s و شتاب ثابت 1 m/s^2 از مکان $x_0 = -8 \text{ m}$ در امتداد محور x به حرکت درمی آید. این متحرک پس از 10 ثانیه در چند متری مبدأ مکان است؟

۲۳ خودرویی با شتاب ثابت و در امتداد محور x از سرعت خود می کاهد و پس از 4 ثانیه و طی مسافت 50 m می ایستد.
 الف) سرعت آن درست در لحظه ای که از سرعت خود می کاهد چقدر است؟
 ب) نمودارهای مکان، سرعت، و شتاب-زمان خودرو را در 4 ثانیه آخر حرکت آن رسم کنید. فرض کنید درست در لحظه ای که خودرو از سرعت خود می کاهد، از مبدأ مکان می گذرد.

۲۴ شکل زیر نمودار $v-t$ متحرکی را در مسیری مستقیم نشان می دهد. اگر سرعت متوسط متحرک در مدت 18 ثانیه برابر $\frac{20}{3} \text{ m/s}$ باشد، v_0 چقدر است؟



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



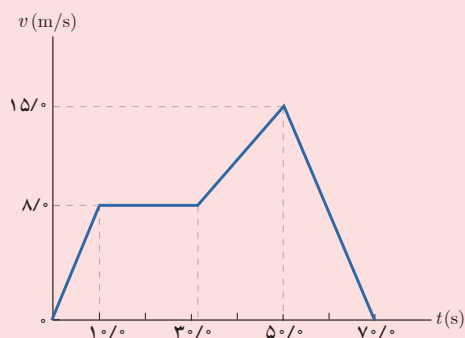
۲۶ دو متحرک A و B روی یک خط راست و در یک جهت حرکت می کنند. نمودار سرعت-زمان این دو متحرک که در لحظه $t=0$ در یک مبدأ بوده اند مطابق شکل روبه روست. این دو متحرک:

الف) در 156 متری مبدأ به هم می رسند.

ب) پس از 10 ثانیه به هم می رسند.

پ) پس از 13 ثانیه به هم می رسند.

ت) اصلاً به هم نمی رسند.



- ۲۷ نمودار سرعت - زمان موتورسواری که در امتداد محور x حرکت می کند مطابق شکل روبه رو است :
- الف) نوع حرکت و شتاب موتورسوار را در هر بازه زمانی تعیین کنید.
- ب) سرعت موتورسوار در لحظه $t = 20 \text{ s}$ چقدر است؟
- ج) مسافت طی شده در کل مسیر چقدر است؟

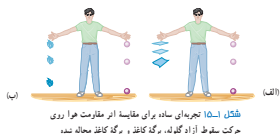
- ۲۸ معادله مکان - زمان متحرکی در SI که در امتداد محور x حرکت می کند به صورت $x = -5t^2 + 6t + 12$ است. در مورد جهت و نوع حرکت کدام مطلب درست است؟
- الف) همواره در جهت محور و کندشونده
- ب) همواره در خلاف جهت محور و کندشونده
- پ) همواره در جهت محور و تندشونده
- ت) همواره در خلاف جهت محور و تندشونده
- ث) ابتدا در جهت محور و کندشونده
- ج) ابتدا در خلاف جهت محور و کندشونده

۱-۴- سقوط آزاد

راهنمای تدریس: همان‌طور که در کتاب درسی نیز اشاره شده است، حرکت سقوط آزاد را با نادیده گرفتن عواملی، می‌توان به صورت نوعی حرکت با شتاب ثابت در نظر گرفت، که در امتداد قائم (محور y) انجام می‌شود. ابتدا به اندازه 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. به طور کلی سقوط آزاد و معادله‌های آن را، برای حرکت هر جسمی که روبه بالا یا روبه پایین به طور 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 برنامه آموزشی و ارزشیابی این کتاب نیستند. بنابراین توصیه جدی می‌شود تا همکاران محترم به محدوده 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 روبه بالا را مثبت در نظر گرفته ایم.

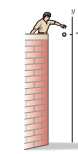
زمین سقوط می‌کند و اثر مقاومت هوا را بتوان برای آن نادیده گرفت، آسانترین مثال برای حرکت با شتاب ثابت است. این حرکت آرمانی، **سقوط آزاد** نامیده می‌شود. شکل ۱۶-۱ تصویری بی‌دری از یک توپ در حال سقوط آزاد را نشان می‌دهد که برای بازه‌های زمانی مساوی رسم شده است. فاصله رو به افزایش بین تصویرها نشان می‌دهد که سرعت توپ به طور پیوسته در حال افزایش است؛ یعنی توپ به طرف پایین شتاب می‌گیرد. حرکت سقوط آزاد، افزون برها کردن جسم، شامل برتاب کردن جسم رو به پایین یا رو به بالا نمی‌شود. در هر سه حالت یاد شده، جهت شتاب رو به پایین و اندازه آن ثابت است و معمولاً $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ فرض می‌شود. در اینجا تنها حرکت سقوط آزاد اجسام بدون سرعت اولیه بررسی می‌شود.



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 $v_0 = 0$ ، $y_0 = 0$ و y به جای x در معادله‌های حرکت با شتاب ثابت بر مسیر مستقیم به دست می‌آید. به این ترتیب معادله‌های سقوط آزاد بدون سرعت اولیه به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} v &= -gt & (16-1) \\ y &= -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 & (16-2) \\ v^2 &= -2g(y - y_0) & (16-3) \end{aligned}$$

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



شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که از بالای دیواری بلند، گلوله‌ای را رها می‌کند. (الف) پس از $1/5 \text{ s}$ گلوله چه مسافتی را طی می‌کند و سرعت آن به چقدر می‌رسد؟ (ب) اگر ارتفاع دیوار $1/5 \text{ m}$ 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 معادله ۱۶-۱ داریم:

آموزش: حالت‌های سقوط آزاد خارج از رفته درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

فیزیک ۳



شکل ۱۶-۳: تصویری از یک توپ در حال سقوط آزاد که در بازه‌های زمانی مساوی و متوالی رسم شده است.

شکل ۱۶-۴: حرکت بر شتاب ثابت

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow y = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(1/5 \text{ s})^2 + 0 \Rightarrow y = -0.49 \text{ m}$$

جابه‌جایی گلوله در این مدت $\Delta y = y - y_0 = -0.49 \text{ m}$ و مسافت طی شده 0.49 m است.

همچنین با استفاده از معادله ۱۶-۱ سرعت گلوله پس از $1/5 \text{ s}$ برابر است با:

$$v = -gt = -(9.8 \text{ m/s}^2)(1/5 \text{ s}) = -1.96 \text{ m/s}$$

حرکت سقوط آزاد، حرکتی با شتاب ثابت 9.8 m/s^2 است، لذا با توجه به مفهوم شتاب، تندی گلوله در هر ثانیه 9.8 m/s افزایش می‌یابد. به طوری که تندی گلوله در پایان ثانیه اول به 9.8 m/s می‌رسد.

(ب) برای پیدا کردن سرعت برخورد گلوله با زمین از معادله ۱۶-۱ داریم:

$$v^2 = -2g(y - y_0) = -2(9.8 \text{ m/s}^2)(-1/5 \text{ m}) = 3.92 \text{ m}^2/\text{s}^2 \Rightarrow v = \pm 1.98 \text{ m/s}$$

چون جهت بالا را مثبت فرض کردیم، علامت منفی برای سرعت برخورد گلوله با سطح زمین قابل قبول است، یعنی $v = -1.98 \text{ m/s}$.

به دو روش می‌توان زمان کل را به دست آورد. از معادله‌های ۱۶-۱ و ۱۶-۲ داریم:

$$v = -gt \Rightarrow -1.98 \text{ m/s} = -(9.8 \text{ m/s}^2)t \Rightarrow t = 0.2 \text{ s}$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 = -1/5 \text{ m} = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)t^2 + 0 \Rightarrow t^2 = 2/5 \Rightarrow t = 0.2 \text{ s}$$

۱۶-۱ سوال ۱۵

سنگی از صخره‌ای به ارتفاع 122.5 m نسبت به سطح زمین آزادانه سقوط می‌کند.

(الف) زمان سقوط آزاد سنگ را به دست آورید.

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

(ج) جابه‌جایی سنگ را بین دو لحظه $t_1 = 3 \text{ s}$ و $t_2 = 4 \text{ s}$ به دست آورید.

(د) نمودارهای مکان-زمان، سرعت-زمان و شتاب-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 معادله ۱۶-۱ داریم:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow -122.5 \text{ m} = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)t^2 + 0 \Rightarrow t = 5 \text{ s}$$

(ب) رابطه ۱۶-۲ را برای امتداد قائم می‌توان به صورت $v_{av} = \Delta y / \Delta t$ در نظر گرفت. به این ترتیب داریم:

$$v_{av} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{-122.5 \text{ m}}{5 \text{ s}} = -24.5 \text{ m/s}$$

(ج) ابتدا با استفاده از رابطه ۱۶-۱ جابه‌جایی سنگ را تا هر یک از لحظه‌های $t_1 = 3 \text{ s}$ و $t_2 = 4 \text{ s}$ پیدا می‌کنیم. سپس با کم کردن این دو جابه‌جایی از یکدیگر، جابه‌جایی سنگ بین این دو لحظه به دست می‌آید.

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow y_1 = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(3^2) + 0 \Rightarrow y_1 = -44.1 \text{ m}$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow y_2 = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(4^2) + 0 \Rightarrow y_2 = -78.4 \text{ m}$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 = -78.4 \text{ m} - (-44.1 \text{ m}) = -34.3 \text{ m}$$

مثال برای رسم نمودار سرعت - زمان به سرعت جسم در لحظه برخورد با زمین نیاز داریم. با استفاده از رابطه ۱۲-۱ سرعت برخورد سنگ با زمین برابر $v = -gt = -(9.8 \text{ m/s}^2)(5 \text{ s}) = -49 \text{ m/s}$ است. نمودارهای مکان - زمان، سرعت - زمان و شتاب - زمان سنگ به ترتیب در شکل های الف، ب و پ رسم شده است.

تمرین ۱۲-۱

شکل مقابل اسباب آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان شتاب گرانش را در محل آزمایش اندازه گرفت. (الف) به نظر شما این وسیله آزمایش چگونه کار می‌کند؟ (ب) در یک آزمایش نوعی، داده‌های زیر به دست آمده است:

$t = 0.23 \text{ s}$ و $h = 0.27 \text{ m}$

با توجه به این داده‌ها، اندازه شتاب گرانش در محل آزمایش جقدر به دست می‌آید؟ (اشاره: اگر وسایل مشابهی در آزمایشگاه مفروضه دارید، شتاب گرانش محل خود را به کمک آن اندازه‌گیری کنید.)

تمرین ۱۳-۱

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که ابتدا سنگی را از بالای پلی به داخل رودخانه‌ای رها کرده است. وقتی سنگ مسافت 2 m را طی می‌کند 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، فاصله بین دو سنگ کاهش یا افزایش می‌یابد یا تغییری نمی‌کند.

تمرین ۱۲-۱

الف) لحظه قطع جریان در آهنربای الکتریکی و رها شدن گلوله، تا لحظه 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.

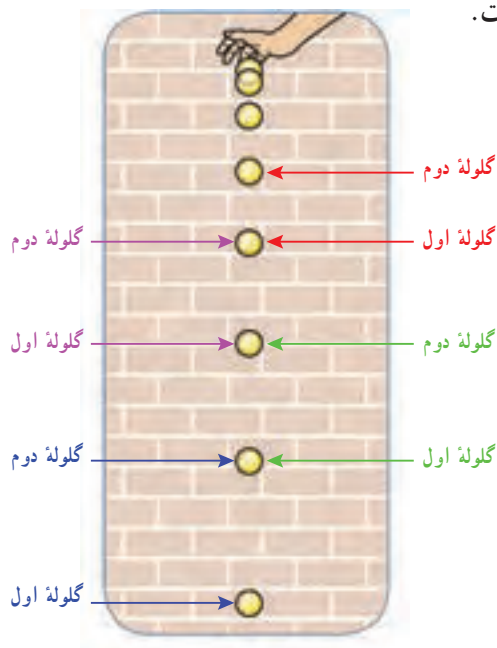
ب) از رابطه ۱۳-۱ و با فرض $y_0 = 0$ داریم:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow -0.27 \text{ m} = \frac{1}{2}g(0.23 \text{ s})^2 + 0 \Rightarrow g = 10.02 \text{ m/s}^2$$

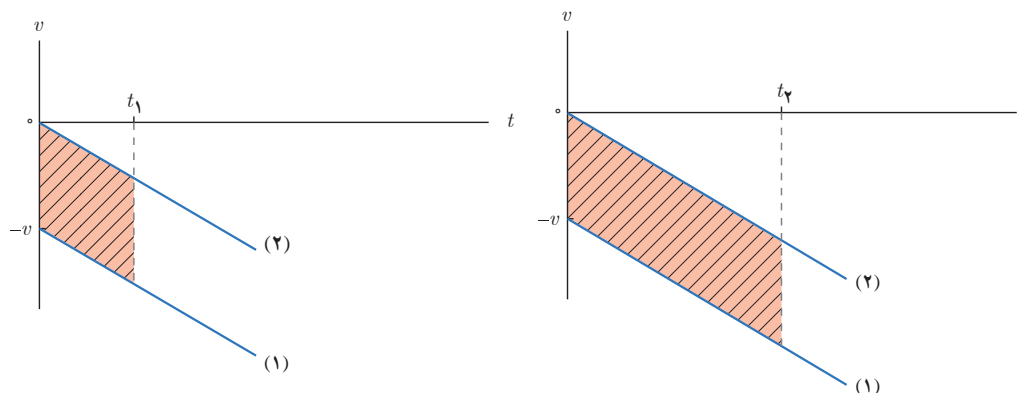
تمرین ۱۳-۱

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

به کمک شکل ۱۶-۱: هر دو گلوله متوالی در این شکل، نماینده گلوله دوم و اول هستند که در پی هم رها شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود (با شمارش تعداد آجرها در امتداد قائم)، هرچه دو گلوله متوالی انتخاب شده پایین‌تر باشند، فاصله آنها از یکدیگر بیشتر است.



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



قسمت‌های هاشور خورده اختلاف جابه‌جایی بین دو سنگ را در دو لحظه 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 بدان معناست که با گذشت زمان، فاصله بین دو سنگ افزایش می‌یابد.

به کمک رابطه ۱-۱۳: با نوشتن معادله 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 گلوله دوم چون بعد از گلوله اول رها شده است، زمان کمتری در راه بوده است. بنابراین

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

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 ۱—۴

- ۱ گلوله‌ای را از ارتفاع ۸۰ متری سطح زمین رها می‌کنیم.
 الف) گلوله پس از چه مدت به زمین می‌رسد؟
 ب) سرعت آن در لحظه برخورد به زمین چقدر است؟
 پ) سرعت متوسط گلوله در مدت این حرکت چقدر است؟
 ت) مسافتی که گلوله در ثانیه آخر حرکت خود طی می‌کند چقدر است؟
- ۲ گلوله‌ای را باید از چه ارتفاعی رها کنیم تا پس از ۱۰ s به زمین برسد؟ سرعت گلوله در نیمه راه و همچنین در لحظه 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 - زمان سنگ را رسم کنید.
 پ) با محاسبه سطح زیر نمودار سرعت - 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 ۳ m/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 ثانیه اول حرکت مسافتی به اندازه h_1 و در ثانیه دوم مسافت h_2 را طی می‌کند. نسبت $\frac{h_2}{h_1}$ را پیدا کنید.
- ۶ دو گلوله به فاصله زمانی یک ثانیه از نقطه‌ای به ارتفاع h در شرایط خلأ رها می‌شوند. اگر بیشترین فاصله بین آنها در طول حرکت ۴۵ m باشد، ارتفاع h چند متر است؟
- ۷ گلوله A را در شرایط خلأ از ارتفاع h بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. سه ثانیه بعد گلوله B را از ارتفاع $\frac{h}{۴}$ بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. نسبت سرعت گلوله A به سرعت گلوله B در لحظه رسیدن به زمین کدام است؟
 الف) $\frac{۲}{۳}$ ب) ۱ پ) ۲ ت) $\frac{۹}{۴}$
- ۸ گلوله 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 ثانیه 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 لحظه رسیدن به زمین است؟

راهنمای پاسخ‌یابی پرشی‌ها و مسئله‌های فصل ۱

۱-۱ شناخت حرکت

الف

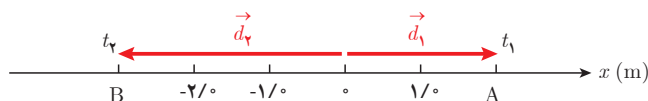
$$s_{av} = \frac{l}{\Delta t} = \frac{88 \text{ km}}{\frac{4}{3} h} = 66 \text{ km/h}$$

$$v_{av} = \frac{d}{\Delta d} = \frac{60 \text{ km}}{\frac{4}{3} h} = 45 \text{ km/h}$$

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 اندازه سرعت متوسط تقریباً برابر خواهد شد. در ادامه این مسئله می‌توانید از دانش‌آموزان بخواهید تا مسیرهای دسترسی بین شهرهای استان محل اقامت خود را از این منظر بررسی کنند.

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



$$\vec{d}_1 = 2\vec{i} \quad , \quad \vec{d}_2 = -3\vec{i} \quad (\text{در SI})$$

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

(در SI)

$$\vec{d} = \vec{d}_1 - \vec{d}_2 = -3\vec{i} - 2\vec{i} = -5\vec{i}$$

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 - زمان متحرک C، شتاب این متحرک از شتاب متحرک A بزرگ‌تر است.

ب) مشابه مثال ۹-۱ و نتیجه‌گیری این مثال که در پایان اشاره شده است دانش‌آموزان به سادگی می‌توانند شتاب هر متحرک را به دست آورند.

پ) با استفاده از رابطه ۴-۱ به سادگی می‌توان جابه‌جایی این سه متحرک را در بازه زمانی داده شده پیدا کرد.

$$\Delta x_B = (v_{av})_B \Delta t = (20 \text{ m/s})(1 \text{ s}) = 20 \text{ m}$$

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

پرشی‌ها و مسئله‌های فصل ۱

بیا در بازه زمانی ۰ تا ۸ ثانیه جابه‌جایی این سه متحرک را پیدا کنید.

الف) تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید.

ب) مفهوم فیزیکی این دو کمیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟

پ) در چه صورت تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط می‌توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟

۲ الف) شتاب در هر یک از مرحله‌های AB، BC و CD چقدر است؟

ب) شتاب متوسط در بازه زمانی صفر تا ۸ ثانیه چقدر است؟

پ) جابه‌جایی متحرک را در این بازه زمانی پیدا کنید.

۳ الف) نمودار سرعت - زمان متحرکی مطابق شکل زیر است.

الف) نمودار شتاب - زمان این متحرک را رسم کنید.

ب) اگر $m = -1000$ باشد نمودار مکان - زمان متحرک را رسم کنید.

۴ الف) متحرکی مطابق شکل در لحظه t_1 در نقطه A، در لحظه t_2 در نقطه B و در لحظه t_3 در نقطه C قرار دارد.

الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور رسم کنید و بر حسب بردار یک 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 به دست آورید.

۵ الف) شتاب سه متحرک را به‌طور کلی با یکدیگر مقایسه کنید.

ب) شتاب هر متحرک را به دست آورید.

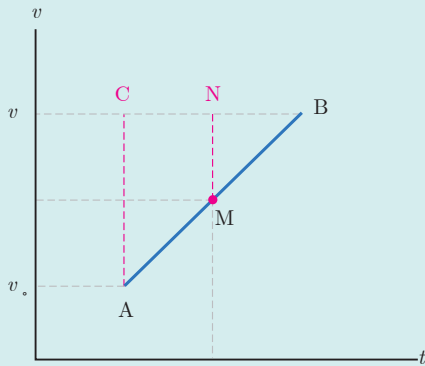
فصل یک : حرکت بر خط راست ۴۳

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

$$\Delta x_A = (v_{av})_A \Delta t = \left(\frac{0 + ۱ \text{ m/s}}{۲} \right) (۱ \text{ s}) = ۰.۵ \text{ m}$$

$$\Delta x_C = (v_{av})_C \Delta t = \left(\frac{0 + ۲ \text{ m/s}}{۲} \right) (۱ \text{ s}) = ۱ \text{ m}$$

اثبات رابطه ۹-۱



نقطه M وسط پاره خط AB قرار دارد.

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

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

$$\Rightarrow NM = \frac{v + v_s}{۲}$$

از طرفی NM برابر میانگین v_s تا v است.

۴ الف) مشابه مثال ۹-۱ است.

ب) با استفاده از رابطه ۹-۱ داریم :

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{۶ \text{ m/s} - ۰}{۲ \text{ s} - ۰} = ۰ / ۳ \text{ m/s}^2$$

پ) مشابه مثال قبل قسمت پ).

۵ الف) با توجه به نمودار سرعت - 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.

دربازه زمانی ۰ تا ۵s

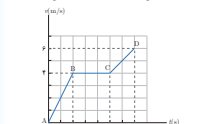
$$a = \frac{(۱ - ۰) \text{ m/s}}{۵ \text{ s}} = ۰.۲ \text{ m/s}^2$$

دربازه زمانی ۵s تا ۱۵s

$$a = \frac{(-۱ - ۱) \text{ m/s}}{۱۰ \text{ s}} = -۰.۲ \text{ m/s}^2$$

بررسی‌ها و مسئله‌های فصل ۱

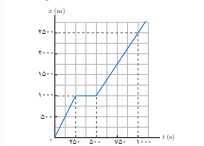
۱. در بازه زمانی ۰ تا ۱۰ ثانیه، چاه‌جایی این سه متحرک را پیدا کنید.



الف) شتاب در هر یک از مرحله‌های AB، BC، CD چقدر است؟
ب) شتاب متوسط در بازه زمانی صفر تا ۱۰ ثانیه چقدر است؟
پ) چاه‌جایی متحرک را در این بازه زمانی پیدا کنید.



۲. نمودار سرعت - زمان متحرک طاقی شکل زیر است.



الف) نمودار شتاب - زمان این متحرک را رسم کنید.

ب) اگر $m = ۱ \text{ kg}$ ، W باشد نمودار مکان - زمان متحرک را رسم کنید.

۱.۱ شناخت حرکت

۱. با توجه به داده‌های نقشه شکل زیر.

الف) تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید.
ب) مفهوم فیزیکی این دو کمیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟
پ) در چه صورت تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط می‌توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟



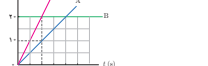
۲. متحرکی مطابق شکل در لحظه ۱ در نقطه A، در لحظه ۲ در نقطه B و در لحظه ۳ در نقطه C قرار دارد.

الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور رسم کنید و بر حسب بردار یک‌تک‌نویسید.

ب) بردار چاه‌جایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی ۱ تا ۲، ۲ تا ۳، و ۱ تا ۳ پیدا کنید.

۳. در شکل زیر نمودار سرعت - زمان سه متحرک نشان داده شده است.

الف) شتاب سه متحرک را به طور کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.

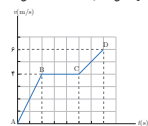


ب) شتاب هر متحرک را به دست آورید.

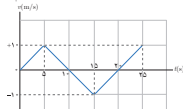
دربازه زمانی ۱۵s تا ۲۵s

بررسی ها و مسئله های فصل ۱

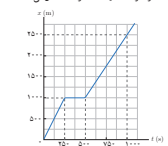
بیا در بازه زمانی $0 \leq t \leq 10$ ثانیه جابجایی این سه متحرک را پیدا کنید.
۳۲. شکل زیر نمودار سرعت - زمان متحرکی را که در امتداد محور x حرکت می کند در مدت ۲۸ ثانیه نشان می دهد.



الف) شتاب در هر یک از مرحله های AB، BC، CD چقدر است؟
 ب) شتاب متوسط در بازه زمانی صفر تا ۲۸ ثانیه چقدر است؟
 ج) جابجایی متحرک را در این بازه زمانی پیدا کنید.
۳۳. نمودار سرعت - زمان متحرکی مطابق شکل زیر است.
 الف) نمودار شتاب - زمان این متحرک را رسم کنید.
 ب) اگر $m = 10$ باشد نمودار مکان - زمان متحرک را رسم کنید.



۳۴. شکل زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دودسته دوی نیمه استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می دهد.



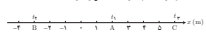
۲۵

اسما شناخت حرکت

۳۵. با توجه به داده های نقشه شکل زیر،
 الف) تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید.
 ب) مفهوم فریکشن این دو کیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟
 ج) در چه صورت تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط می توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشد؟



۳۶. متحرکی مطابق شکل در لحظه t_1 در نقطه A، در لحظه t_2 در نقطه B و در لحظه t_3 در نقطه C قرار دارد.



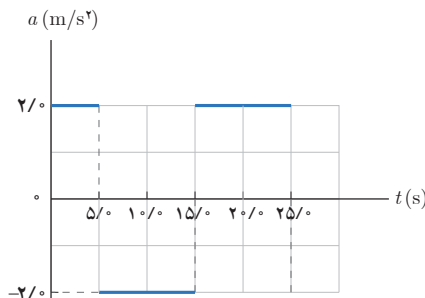
الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه ها روی محور x رسم کنید و برحسب بردار یکدیگر مقایسه کنید.
 ب) بردار جابجایی متحرک را در هر یک از بازه های زمانی t_1 تا t_2 ، t_2 تا t_3 و t_1 تا t_3 پیدا کنید و برحسب بردار یکدیگر مقایسه کنید.

۳۷. در شکل زیر نمودار سرعت - 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.



$$a = \frac{(1^\circ + 1^\circ) \text{ m/s}^2}{1^\circ \text{ s}} = 2 \text{ m/s}^2$$



ب) از رابطه ۱-۴ و مشابه مسئله ۳ قسمت (پ)، جابجایی متحرک را در هر یک از بازه های زمانی پیدا می کنیم.

در بازه صفر تا ۵s

$$\Delta x = v_{av} \Delta t = \left(\frac{0 + 1^\circ \text{ m/s}}{2} \right) (5\text{s}) = 2.5 \text{ m}$$

چون $x_0 = -1^\circ \text{ m}$ فرض شده است، در پایان این بازه زمانی، یعنی در لحظه $t = 5\text{s}$ ، مکان متحرک در $x = 1.5 \text{ m}$ قرار دارد.

$$\Delta x = \left(\frac{1^\circ \text{ m/s} + 0^\circ}{2} \right) (5\text{s}) = 2.5 \text{ m}$$

دربازه ۵s تا ۱۰s

به این ترتیب در لحظه $t = 10\text{s}$ ، مکان متحرک در $x = 4^\circ \text{ m}$ قرار دارد.

$$\Delta x = \left(\frac{0^\circ - 1^\circ \text{ m/s}}{2} \right) (5\text{s}) = -2.5 \text{ m}$$

دربازه ۱۰s تا ۱۵s

به این ترتیب در لحظه $t = 15\text{s}$ ، مکان متحرک در $x = 1.5 \text{ m}$ قرار دارد.

$$\Delta x = \left(\frac{-1^\circ \text{ m/s} + 0^\circ}{2} \right) (5\text{s}) = -2.5 \text{ m}$$

دربازه ۱۵s تا ۲۰s

به این ترتیب در لحظه $t = 20\text{s}$ ، مکان متحرک در $x = -1^\circ \text{ m}$ قرار دارد.

$$\Delta x = \left(\frac{0^\circ + 1^\circ \text{ m/s}}{2} \right) (5\text{s}) = 2.5 \text{ m}$$

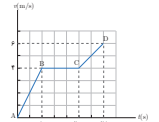
دربازه ۲۰s تا ۲۵s

به این ترتیب در لحظه $t = 25\text{s}$ ، مکان متحرک در $x = 1.5 \text{ m}$ قرار دارد.

چون در تمامی بازه های ذکر شده، حرکت با شتاب است، لذا نمودار مکان - زمان آن مطابق شکل صفحه بعد است.

بررسی ها و مسئله های فصل ۱

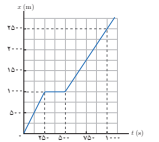
با در بازه زمانی $t = 0$ تا $t = 8$ ثانیه از جابجایی این سه متحرک را پیدا کنید.
 الف) با توجه به داده های نقشه شکل زیر.
 ب) نمودار سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید.
 ج) مفهوم فیزیکی این دو کمیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟
 د) در چه صورت تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط می توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟



الف) شتاب در هر یک از مرحله های AB، BC، CD چقدر است؟
 ب) شتاب متوسط در بازه زمانی صفر تا ۸ ثانیه چقدر است؟
 ج) جابجایی متحرک را در این بازه زمانی پیدا کنید.
 د) نمودار سرعت-زمان متحرک شکل زیر است.
 الف) نمودار شتاب-زمان این متحرک را رسم کنید.
 ب) اگر $m = 1000$ kg باشد نمودار شتاب-زمان متحرک را رسم کنید.



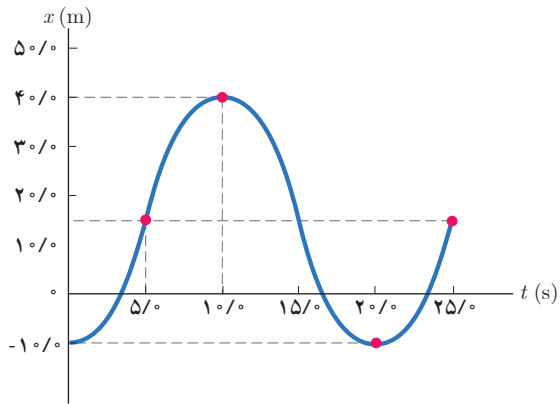
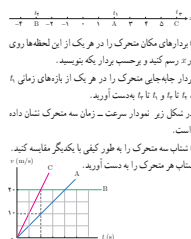
الف) برای راه های مکان متحرک را در هر یک از این لحظه ها ردی مرور رسم کنید و بر حسب بردار یک توضیح دهید.
 ب) بردار جابجایی متحرک را در هر یک از بازه های زمانی t_1 تا t_2 ، t_2 تا t_3 و t_1 تا t_3 به دست آورید.
 ج) در شکل زیر نمودار سرعت-زمان سه متحرک نشان داده شده است.
 الف) شتاب سه متحرک را به طور کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.
 ب) شتاب هر متحرک را به دست آورید.



الف) متحرک مطابق شکل در لحظه t_1 در نقطه A، در لحظه t_2 در نقطه B و در لحظه t_3 در نقطه C قرار دارد.
 الف) برای راه های مکان متحرک را در هر یک از این لحظه ها ردی مرور رسم کنید و بر حسب بردار یک توضیح دهید.
 ب) بردار جابجایی متحرک را در هر یک از بازه های زمانی t_1 تا t_2 ، t_2 تا t_3 و t_1 تا t_3 به دست آورید.
 ج) در شکل زیر نمودار سرعت-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.



الف) شتاب سه متحرک را به طور کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.
 ب) شتاب هر متحرک را به دست آورید.



الف) در بازه ای که شیب نمودار سرعت - زمان بیشتر است؛ یعنی بازه صفر تا 25 s.

ب) در بازه ای که شیب نمودار سرعت - زمان صفر است؛ یعنی بازه 25 s تا 50 s.

پ) مشابه مثال ۱-۵

ت) مشابه مثال ۱-۵

دانش آموزان باید توجه کنند که متحرک در هر لحظه از زمان صرفاً در یک مکان می تواند باشد. لذا نمودارهای مکان - زمان شکل های الف، ب و ث نمی توانند نشان دهنده نمودار $x-t$ یک متحرک باشند. نکته دیگری که دانش آموزان 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 بی نهایت می شود که از نظر فیزیکی بی معنا و قابل قبول نیست.

در نمودار شکل (ب) شیب مماس بر منحنی $x-t$ ، با گذشت زمان کاهش می یابد و در نمودار شکل (الف) با گذشت زمان شیب منحنی $x-t$ ثابت مانده است. لذا نمودار $x-t$ شکل های (پ) و (ت) حرکت متحرکی را توصیف می کند که به تدریج بر تندی آن افزوده شده است.

برای آنکه سرعت اولیه متحرک در جهت محور x باشد، دانش آموزان باید به زاویه ای که خط مماس بر منحنی مکان - زمان در لحظه $t = 0$ با محور زمان می سازد توجه کنند. اگر این زاویه مثبت باشد (مانند شکل الف) در این صورت، سرعت اولیه متحرک در جهت محور x است.

همچنین برای آنکه شتاب متحرک در خلاف جهت محور x باشد، با توجه به توضیحی که درخصوص شکل ۱-۱۴ داده شد، باید گودی یا تقعر منحنی روبه پایین باشد (مانند شکل الف). البته دانش آموزان می توانند به چگونگی تغییرات سرعت متحرک در بازه زمانی مورد نظر نیز توجه کنند.

فصل ۱

الف) در کدام بازه زمانی دوده سریع تر دوده است؟
 ب) در کدام بازه زمانی دوده آهسته است؟
 ج) سرعت دوده را در بازه زمانی 0 تا 25 s حساب کنید.
 د) سرعت دوده را در بازه زمانی 25 تا 50 s حساب کنید.
 ه) سرعت متوسط دوده را در بازه زمانی 0 تا 50 s حساب کنید.
 و) توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان-زمان شکل زیر می تواند نشان دهنده نمودار $x-t$ یک متحرک باشد.

الف) شکل زیر نمودار مکان-زمان دو خودرو را نشان می دهد که در جهت محور x در حرکت اند.

الف) توضیح دهید از نمودارهای مکان-زمان شکل زیر کدام موارد حرکت متحرکی را توصیف می کند که از حال سکون شروع به حرکت کرده و به تدریج آن افزوده شده است.

الف) در چه لحظه ای دو خودرو از کنار یکدیگر می گذرند؟
 ب) در چه لحظه ای تندی دو خودرو تقریباً یکسان است؟
 ج) سرعت متوسط دو خودرو را در بازه زمانی t_1 تا t_2 مقایسه کنید.
 د) هر یک از شکل های زیر مکان یک خودرو را در لحظه های $t = 0$ ، $t = T$ ، $t = 2T$ ، $t = 3T$ ، $t = 4T$ ، $t = 5T$ نشان می دهد. هر دو خودرو در لحظه $t = 3T$ شتاب می گیرند. توضیح دهید.

الف) توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان-زمان نشان داده شده، حرکت متحرکی را توصیف می کند که سرعت اولیه آن در جهت محور x و شتاب آن برخلاف جهت محور x است.

۱۰ الف) در لحظه‌های t_1 و t_2

ب) شیب خط مماس بر منحنی خودروی شتابدار در لحظه t_2 ، تقریباً موازی نمودار خودرویی است که با سرعت ثابت در حرکت است.

پ) چون در بازه زمانی t_1 تا t_2 برای دو خودرو $\Delta x = x_2 - x_1$ یکسان است، لذا سرعت متوسط آنها نیز برابر است.

۱۱ ابتدا باید دانش آموزان 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 فاصله دورتری از مبدأ شروع به حرکت کرده است.

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

ب) در بازه زمانی $t = 3T$ تا $t = 7T$ ، خودروی B مسافت بیشتری را طی کرده است. یعنی

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

از طرفی چون $v_{rA} > v_{rB}$ است (به قسمت الف توجه شود)، در این صورت باید $v_{rB} > v_{rA}$ باشد.

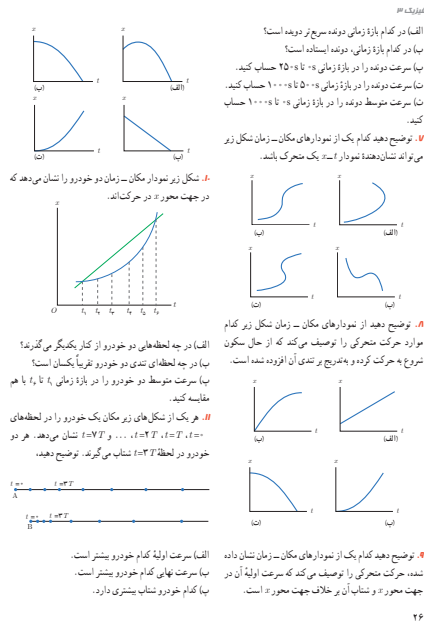
پ) چون تغییرات سرعت خودروی B بیشتر بوده است، لذا دارای شتاب بیشتری نیز هست.

۱۲ الف) با جای‌گذاری لحظه‌های داده شده در معادله مکان – زمان، به سادگی مکان متحرک $x = 4\text{m}$ و $x = 0$ به دست می‌آید.

ب) از رابطه ۱-۴ استفاده شود.

همان‌طور که در کتاب درسی نیز تأکید شده است لازم است توجه شود که مشتق‌گیری از رابطه مکان – زمان به دست آمده. و پیدا کردن سرعت در یک لحظه خاص، جزو برنامه درسی این کتاب و همچنین ارزشیابی آن نیست. این موضوع در خصوص دوبار مشتق‌گیری از معادله مکان – زمان یا یک بار مشتق‌گیری از معادله سرعت – زمان و پیدا کردن شتاب در هر لحظه دلخواه نیز صادق است.

۱۳ مشابه پرسش ۱-۶ است. کافی است دانش‌آموزان به شیب مماس بر منحنی سرعت – زمان در هر بازه دلخواه توجه کنند. برای مثال در بازه t_1 تا t_2 ، شیب منفی و در نتیجه شتاب در خلاف جهت محور x است.

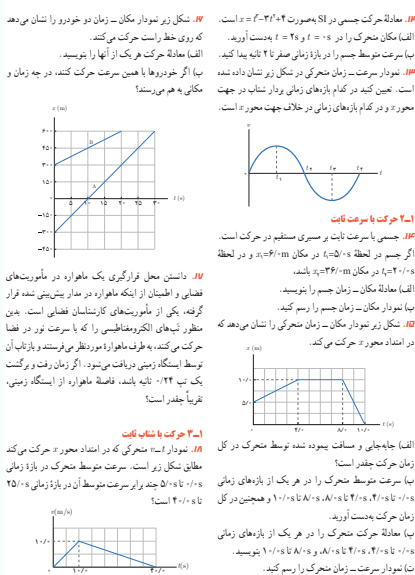


$$\Delta x_A = (v_{av})_A (\Delta t) = \left(\frac{v_{rA} + v_{fA}}{2} \right) (\Delta t)$$

$$\Delta x_B = (v_{av})_B (\Delta t) = \left(\frac{v_{rB} + v_{fB}}{2} \right) (\Delta t)$$

$$v_{rA} + v_{fA} < v_{rB} + v_{fB}$$

۳۷ الف) در کدام بازه زمانی دوده سریع‌تر دوده است؟
 ب) در کدام بازه زمانی، دوده ایستاده است؟
 ج) سرعت دوده را در بازه زمانی $0 \leq t \leq 15$ حساب کنید.
 د) سرعت دوده را در بازه زمانی $0 \leq t \leq 50$ حساب کنید.
 ه) سرعت متوسط دوده را در بازه زمانی $0 \leq t \leq 100$ حساب کنید.
 و) توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان – زمان شکل زیر می‌تواند نشان‌دهنده نمودار $x = 2t$ یک متحرک باشد.



۲-۱ حرکت با سرعت ثابت

۱۴ معادله حرکت جسمی که با سرعت ثابت در امتداد محور x حرکت می کند در رابطه ۲-۱ داده شده است.

$$x = vt + x_0$$

در هر یک از لحظه های t_1 و t_2 داریم :

$$x_1 = vt_1 + x_0 \Rightarrow 6/^\circ \text{m} = v(5/^\circ \text{s}) + x_0$$

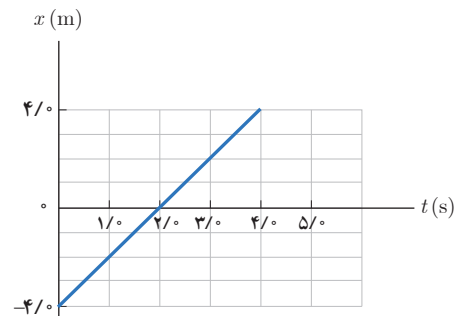
$$x_2 + vt_2 + x_0 \Rightarrow 36/^\circ \text{m} = v(20/^\circ \text{s}) + x_0$$

با حل دو معادله بالا داریم :

$$x_0 = -4/^\circ \text{m} , \quad v = 2/^\circ \text{m/s}$$

$$\Rightarrow x = 2t - 4$$

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



۱۵ الف) در بازه صفر تا $4/^\circ \text{s}$

در بازه $4/^\circ \text{s}$ تا $8/^\circ \text{s}$

در بازه $8/^\circ \text{s}$ تا $10/^\circ \text{s}$

به این ترتیب جابه جایی کل برابر است با

$$\Delta x_1 = 1/^\circ \text{m} - 5/^\circ \text{m} = 5/^\circ \text{m}$$

$$\Delta x_2 = 1/^\circ \text{m} - 1/^\circ \text{m} = 0$$

$$\Delta x_3 = 0 - 1/^\circ \text{m} = -1/^\circ \text{m}$$

$$\Delta x = 5/^\circ \text{m} + 0 + (-1/^\circ \text{m}) = 5/^\circ \text{m}$$

به جای این کار می توانستیم به طور ساده، مکان متحرک را در لحظه $t = 10/^\circ \text{s}$ از مکان متحرک در شروع حرکت ($t = 0$) کم کنیم در این صورت

$$\Delta x = 0 - 5/^\circ \text{m} = -5/^\circ \text{m}$$

مسافت پیموده شده برای مجموع اندازه جابه جایی های متحرک در هر بازه زمانی است. به این ترتیب داریم :

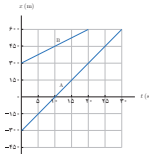
$$l = |\Delta x_1| + |\Delta x_2| + |\Delta x_3| = |5/^\circ \text{m}| + |0| + |-1/^\circ \text{m}| = 15/^\circ \text{m}$$

ب) از رابطه ۲-۱ استفاده شود. برای مثال در بازه $8/^\circ \text{s}$ تا $10/^\circ \text{s}$ داریم :

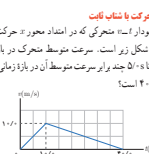
$$v_{av} = \frac{-1/^\circ \text{m}}{10/^\circ \text{s} - 8/^\circ \text{s}} = -5 \text{ m/s}$$

شکل ۱-۱ حرکت با سرعت ثابت

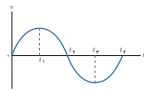
۱۷ شکل زیر نمودار مکان - زمان دو خودرو را نشان می دهد که روی خط راست حرکت می کنند. الف) معادله حرکت هر یک از آنها را بنویسید. ب) اگر خودروها با همین سرعت حرکت کنند، در چه زمان و مکانی به هم می رستند؟



۱۸ داشتن محل قرارگیری یک ماهواره در مأموریت های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت های کارکنان فضایی است. بدین منظور نیروهای الکترودینامیکی را که با سرعت دور در فضا حرکت می کنند، به طرف ماهواره مورد نظر می فرستند و پارتیکل آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می شود. اگر زمان رفت و برگشت یک پب ۰.۲۴ ثانیه باشد، فاصله ماهواره از ایستگاه زمینی تقریباً چقدر است؟



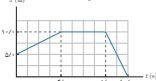
۱۹ معادله حرکت جسمی در SI به صورت $x = t^2 - 4t + 4$ است. الف) مکان متحرک را در $t = 8$ و $t = 4$ بدست آورید. ب) سرعت متوسط جسم را در بازه زمانی صفر تا ۴ ثانیه پیدا کنید. **۲۰** نمودار سرعت - زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. تعیین کنید در کدام بازه های زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه های زمانی در خلاف جهت محور x است.



۲۱-۱ حرکت با سرعت ثابت **۲۱-۲** جسمی با سرعت ثابت بر مسیری مستقیم در حرکت است. اگر جسم در لحظه $t_1 = 50/^\circ \text{s}$ در مکان $x_1 = 20/^\circ \text{m}$ و در لحظه $t_2 = 10/^\circ \text{s}$ در مکان $x_2 = 30/^\circ \text{m}$ باشد.

الف) معادله مکان - زمان جسم را بنویسید. ب) نمودار مکان - زمان جسم را رسم کنید.

۲۱-۳ شکل زیر نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می دهد که در امتداد محور x حرکت می کند.



الف) جابه جایی و مسافت پیموده شده توسط متحرک در کل زمان حرکت چقدر است؟ ب) سرعت متوسط متحرک را در هر یک از بازه های زمانی $0 \leq t \leq 2$ ، $2 \leq t \leq 4$ ، $4 \leq t \leq 6$ و همچنین در کل زمان حرکت بدست آورید.

ب) معادله حرکت متحرک را در هر یک از بازه های زمانی $0 \leq t \leq 2$ ، $2 \leq t \leq 4$ ، $4 \leq t \leq 6$ و همچنین $0 \leq t \leq 6$ بنویسید. ج) نمودار سرعت - زمان متحرک را رسم کنید.

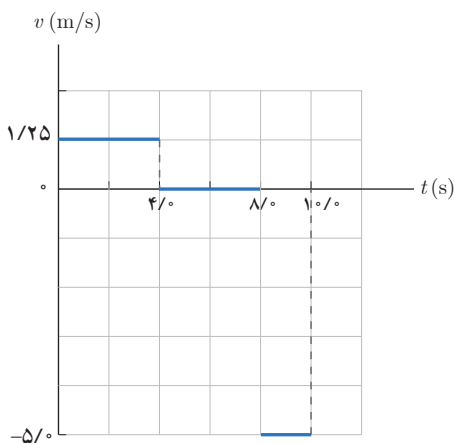
پ) مشابه قسمت الف تمرین ۱۴ است. برای مثال در بازه صفر تا ۴/°s داریم :

$$1/2 \text{ m/s} = v(4/^\circ \text{s}) + 5/^\circ \text{m} \Rightarrow v = 1/2 \text{ m/s}$$

از آنجا که هنگام آموزش و ارزشیابی، توجه به تعداد ارقام با معنا جزو اهداف کتاب نیست، لذا می توانیم $v = 1/25 \text{ m/s}$ بگیریم. همچنین به طور مشابه در بازه ۸/°s تا ۱۰/°s ، داریم : $v = -5/^\circ \text{m/s}$. به این ترتیب معادله حرکت جسم در بازه های زمانی داده شده عبارت است از (در SI) :

$$\begin{cases} x = 1/25t + 5 \\ x = 1^\circ \\ x = -5t + 1^\circ \end{cases}$$

ت)



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

$$x_A = 3^\circ t - 3^\circ$$

$$x_B = 15t + 3^\circ$$

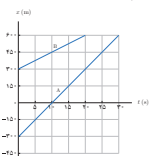
ب) با توجه به شرط $x_A = x_B$ ، زمان هم رسی در متحرک را به سادگی می توان به دست آورد ($t = 4^\circ \text{s}$). با قراردادن زمان هم رسی در یکی از معادله های حرکت، مکان هم رسی به دست می آید ($x = 9^\circ \text{m}$).

۱۷ اگر تندی نور را $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ در نظر بگیریم، در این صورت با توجه به اینکه زمان رفت $1/2^\circ \text{s}$ است، داریم :

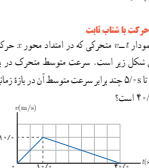
$$\Delta x = v \Delta t = (3 \times 10^8 \text{ m/s})(1/2^\circ \text{s}) = 3/6 \times 10^7 \text{ m}$$

فصل دوم: حرکت یک بعدی

۱۶ الف) معادله حرکت جسمی در SI به صورت $x = t^2 - 4t + 4$ است. (الف) مکان متحرک را در $t = 0$ و $t = 4$ به دست آورید. (ب) سرعت متوسط جسم را در بازه زمانی صفر تا ۴ ثانیه پیدا کنید. (ج) نمودار سرعت - زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. تعیین کنید در کدام بازه های زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه های زمانی در خلاف جهت محور x است.



۱۷ الف) دانشمن محل قرارگیری یک ماهواره در مأموریت های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت های کارشناسان فضایی است. بدین منظور شبیه های الکترومغناطیسی را که با سرعت دور در فضا حرکت می کنند، به طرف ماهواره مودنظر می فرستند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می شود. اگر زمان رفت و برگشت یک پنبه ۰.۲۴ ثانیه باشد، فاصله ماهواره از ایستگاه زمینی، تقریباً چقدر است؟



۲۷

۳-۱- 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، مثبت اند.

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

۴) یکی از معادله‌های ۸-۱ تا ۱۱-۱ 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 معادله هم‌زمان را برای دو کمیت نامعلوم حل کنید.

۵) در پایان نتیجه کمیت‌های نامعلوم را که به‌دست آوردید واریسی کنید که آیا منطقی‌اند یا خیر. آیا آنها در گستره کلی مقادارهایی که شما انتظار دارید قرار دارند؟

۱۸ در هر یک از بازه‌های زمانی صفر تا $10/s$ و همچنین $10/s$ تا $40/s$ حرکت دارای شتاب ثابت است. لذا با استفاده از معادله ۹-۱ داریم.

در بازه صفر تا $10/s$

$$v_{av} = \frac{0 + 50 \text{ m/s}}{2} = 25 \text{ m/s}$$

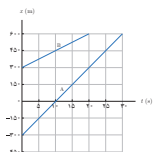
در بازه $10/s$ تا $40/s$

$$v_{av} = \frac{50 \text{ m/s} + 0}{2} = 25 \text{ m/s}$$

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

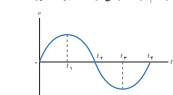
فصل ۱ حرکت بر خط راست

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

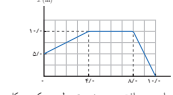


۱۸ داشتن محل قرارگیری یک ماهواره در ماهواره‌های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش‌بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت‌های کارشناسان فضایی است. بین منظور تپه‌های الکترودینامیکی را که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند، به طرف ماهواره مودم‌های فرستنده و بازتاب آن توسط آنتن‌های زمینی دریافت می‌شود. اگر زمان رفت و برگشت یک تپ ۰.۲۴ ثانیه باشد، فاصله ماهواره از آنتن‌های زمینی تقریباً چقدر است؟

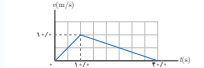
۱۹ معادله حرکت جسمی در $0 \leq t \leq 4$ به صورت $x = 2t^2 + 4t - 3$ است. (الف) مکان متحرک را در $t = 0$ و $t = 4$ به دست آورید. (ب) سرعت متوسط جسم را در بازه زمانی صفر تا ۴ ثانیه پیدا کنید. (ج) نمودار سرعت-زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. تعیین کنید در کدام بازه‌های زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه‌های زمانی در خلاف جهت محور x است.



۲۰ شکل زیر نمودار مکان-زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند. (الف) معادله مکان-زمان جسم را بنویسید. (ب) نمودار مکان-زمان جسم را رسم کنید. (ج) شکل زیر نمودار مکان-زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند.



۲۱ شکل زیر نمودار مکان-زمان متحرکی را در امتداد محور x حرکت می‌کند. (الف) معادله حرکت متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $0 \leq t \leq 1$ ، $1 \leq t \leq 2$ ، $2 \leq t \leq 3$ و $3 \leq t \leq 4$ بنویسید. (ب) نمودار سرعت-زمان متحرک را رسم کنید.



۱۹ الف) از رابطه ۴-۱ داریم :

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{(6/^\circ - 0^\circ)m}{3/s} = 2/^\circ m/s$$

ب) با توجه به اینکه در $t=1/s$ شیب خط مماس بر منحنی صفر است، لذا سرعت متحرک در این لحظه برابر صفر است. در نتیجه داریم :

$$v = at + v_0 \Rightarrow 0 = a(1/s) + v_0 \Rightarrow v_0 = -a$$

از طرفی در همین لحظه داریم $x = -2/^\circ m$ و $t = 1/s$. با جای گذاری در معادله مکان زمان داریم (در SI) :

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + x_0$$

$$-2/^\circ m = \frac{1}{2}a(1/s) - a(1/s) + 0 \Rightarrow a = 4/^\circ m/s^2$$

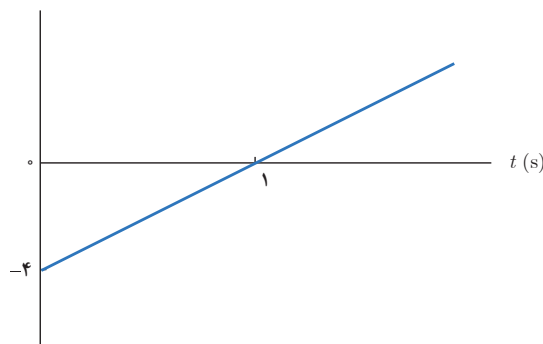
$$x = 2t^2 - 4t$$

پ) از رابطه $v = 4t - 4$ ، داریم (در SI) :

$$v = 4 \times 3 - 4 = 8m/s$$

ت)

$x \text{ (m/s)}$



۲۰ الف) با توجه به داده های مسئله، مناسب ترین معادله برای حل این قسمت، استفاده از رابطه ۱-۱۱ است $(a=0/5m/s^2)$.

ب) با استفاده از رابطه ۱-۸، مدت ۲s پس از شروع حرکت، سرعت متحرک به $18km/h$ می رسد.

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

$$x_1 = \frac{1}{2}at^2 + v_0 t + x_0 = t^2 \text{ خودرو}$$

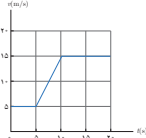
$$x_2 = vt + x_0 = 1^\circ t \text{ کامیون}$$

(مبدأ حرکت را، محل چراغ قرمز در نظر گرفته ایم $(x_0=0)$.)

$$x_1 = x_2 \Rightarrow t = 1^\circ s \text{ زمان هم رسی}$$

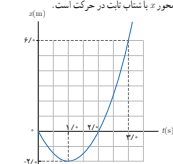
فصل ۳

۱۹. نشان می دهد که روی سری مستقیم حرکت می کند.



الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه های $t=0s$ ، $t=1s$ و $t=11s$ به دست آورید.
ب) شتاب متوسط در بازه زمانی $t=0s$ تا $t=4s$ را به دست آورید.
پ) در هر یک از بازه های زمانی $t=0s$ تا $t=11s$ و $t=11s$ تا $t=20s$ خودرو چقدر جابه جا شده است؟
ت) سرعت متوسط خودرو در بازه های $t=0s$ تا $t=11s$ و $t=11s$ تا $t=20s$ را به دست آورید.

۲۰. شکل زیر نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می دهد که در امتداد محور x با شتاب ثابت در حرکت است.



الف) سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی صفر تا $3/^\circ$ ثانیه، چند متر بر ثانیه است؟
ب) معادله مکان - زمان متحرک را بنویسید.
پ) سرعت متحرک را در لحظه $t=3/^\circ s$ پیدا کنید.
ت) نمودار سرعت - زمان متحرک را رسم کنید.

۲۱. متحرکی در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت

است. در مکان $x=+1m$ سرعت متحرک $v=+1m/s$ و در مکان $x=+19m$ سرعت متحرک $v=+11m/s$ است.

الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟

ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از $7m/s$ به سرعت $11m/s$ می رسد؟

پ) خودرویی پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب $1m/s^2$ شروع به حرکت می کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت $3km/h$ از آن سبقت می گیرد.

الف) در چه لحظه و در چه مکانی خودرو به کامیون می رسد؟

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

پ) نمودار سرعت - زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

۲۲. شکل نشان داده شده نمودار سرعت - زمان خودرویی را

نشان می دهد که روی سری مستقیم حرکت می کند.

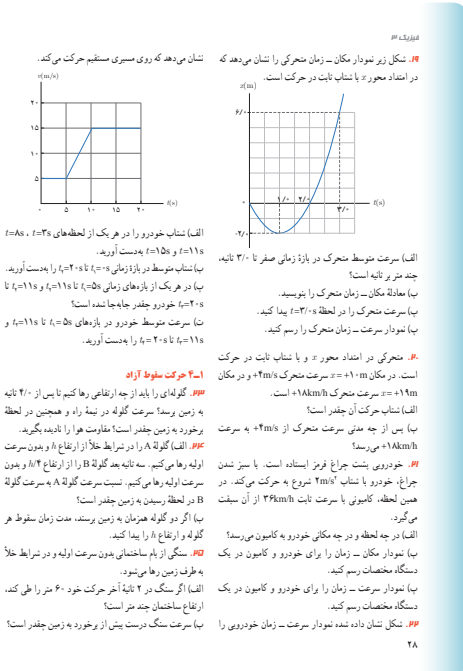
الف) شتاب متوسط در بازه زمانی $t=0s$ تا $t=4s$ را به دست آورید.

ب) شتاب متوسط در بازه زمانی $t=4s$ تا $t=11s$ را به دست آورید.

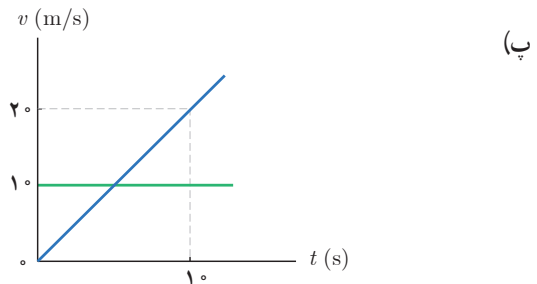
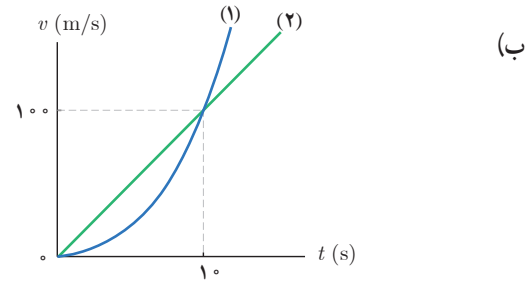
پ) در هر یک از بازه های زمانی $t=0s$ تا $t=4s$ و $t=4s$ تا $t=11s$ خودرو چقدر جابه جا شده است؟

ت) سرعت متوسط خودرو در بازه های $t=0s$ تا $t=4s$ و $t=4s$ تا $t=11s$ را به دست آورید.

فصل یک : حرکت بر خط راست ۵۱



مکان هم‌رسی $x_p = 10 \times 10 = 100m$



۲۲ شتاب متحرک در لحظه‌های $t=3s$ ، $t=11s$ ، $t=15s$ به دلیل ثابت بودن سرعت متحرک، صفر است. شتاب متحرک در لحظه $t=8s$ با شتاب متوسط متحرک در بازه زمانی $5s$ تا $10s$ برابر است. به این ترتیب داریم:

$$a_{av} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(15-5)m/s}{5s} = 2m/s^2$$

ب)

$$a_{av} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(15-5)m/s}{2s} = 5m/s^2$$

پ) با توجه به آنچه در مثال ۱-۱۲ اشاره شد، سطح بین نمودار سرعت - زمان و محور زمان در هر بازه زمانی برابر جابه‌جایی در آن بازه است. لذا

$$\Delta x = 65m \quad \text{در بازه } 5s \text{ تا } 11s$$

$$\Delta x = 135m \quad \text{در بازه } 11s \text{ تا } 20s$$

ت) با توجه به نتایج قسمت پ و رابطه ۱-۴، سرعت متوسط به دست می‌آید.

۴-۱ حرکت سقوط آزاد

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 = -\frac{1}{2}(9.8m/s^2)(4s)^2 = -78.4m$$

۲۳

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

در نیمه راه :

$$v^2 = -2gy = -2(9/8 \text{ m/s}^2)(-34/2 \text{ m})$$

دانش آموزان باید توجه کنند چون

$$\Rightarrow v = -25/9 \text{ m/s}$$

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

لحظه برخورد به زمین :

$$v^2 = -2gy = -2(9/8 \text{ m/s}^2)(-78/4 \text{ m}) \Rightarrow v = -39/2 \text{ m/s}$$

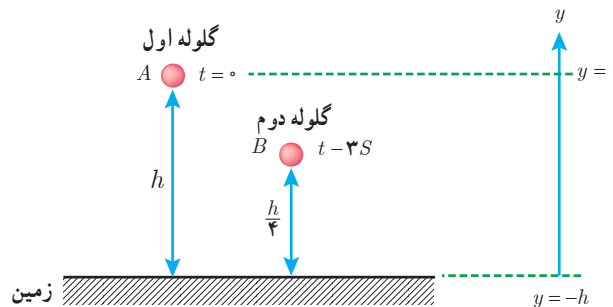
۲۴ مختصات دو گلوله را در معادله مکان - زمان قرار می دهیم :

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + y_0$$

گلوله اول :

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

گلوله دوم :



از رابطه ۱-۴ داریم :

$$v^2 = -2g(y - y_0)$$

$$\begin{cases} v_A^2 = -2g(-h - 0) = 2gh \\ v_B^2 = -2g\left[-h - \left(-\frac{3}{4}h\right)\right] = \frac{2gh}{4} \end{cases}$$

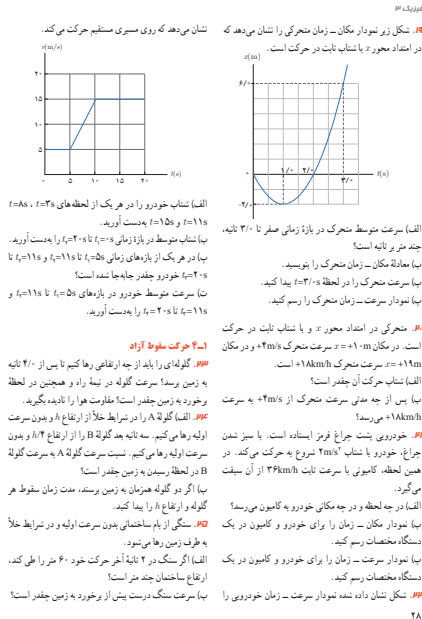
$$\Rightarrow \frac{v_A}{v_B} = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gh/4}} = 2$$

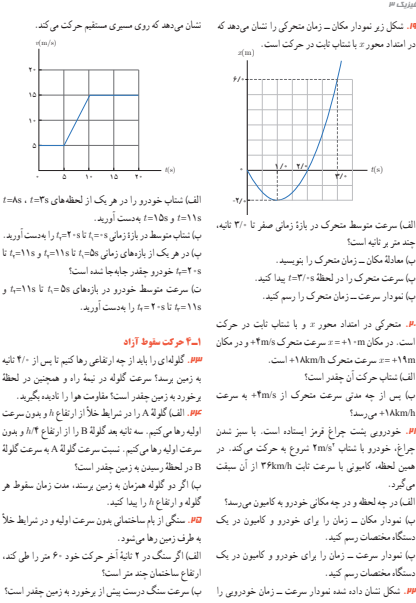
(ب) معادله مکان - زمان هر دو گلوله به ترتیب برابر است با

$$y_A = -\frac{1}{2}gt^2 \Rightarrow -h = -\frac{1}{2}gt^2$$

$$y_B = -\frac{1}{2}g(t-3s)^2 - \frac{3}{4}h \Rightarrow -h = -\frac{1}{2}g(t-3)^2 - \frac{3}{4}h$$

$$\Rightarrow -\frac{h}{4} = -\frac{1}{2}g(t-3)^2 \Rightarrow -h = -2g(t-3)^2$$



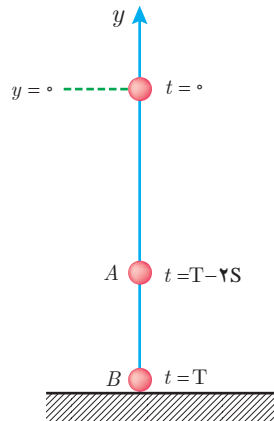


به این ترتیب مدت زمانی که گلوله A در راه بوده است برابر است با

$$-\frac{1}{2}gt^2 = -2g(t-3)^2 \Rightarrow t = 6s$$

چون گلوله B با 3 ثانیه تأخیر رها شده است، به این ترتیب این گلوله پس از 3 ثانیه به زمین می‌رسد.

$$h = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(6s)^2 = 176.4 \text{ m}$$



الف) ارتفاع ساختمان را h و زمان کل حرکت سنگ را T فرض می‌کنیم. اگر مبدأ مختصات را محل شدن سنگ بگیریم ($y=0$) در این صورت معادله حرکت ۱-۱۳ را برای هر یک از نقاط A و B به‌طور جداگانه می‌نویسیم. مختصات مکان و زمان نقطه A عبارت است از

$$y_A = -h + 60 \text{ m}, t = T - 2s$$

همچنین مختصات مکان و زمان سنگ در نقطه B عبارت است از به این ترتیب با جای‌گذاری در معادله ۱-۱۳ داریم:

$$(1)$$

$$(2)$$

با جای‌گذاری (۲) در (۱) داریم

$$-h + 60 = -h - 2g + 2g\sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$60 + g = 2g\sqrt{\frac{2h}{g}}$$

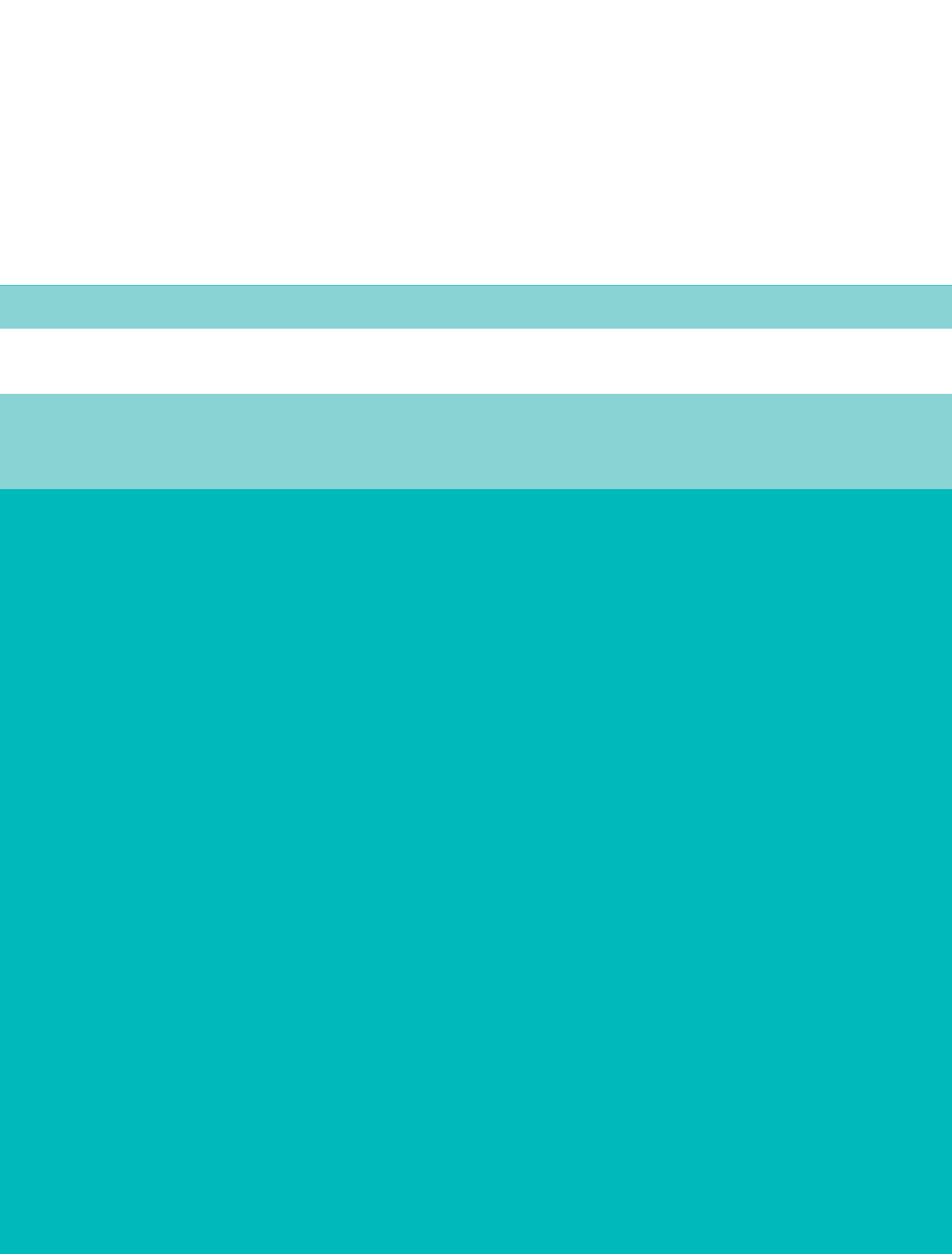
$$(60 + g)^2 = 4gh$$

$$h = \frac{(60 + 9.8)^2}{4 \times 9.8} \approx 80.8 \text{ m}$$

$$v_B^2 = -2 \times 9.8(-80.8 - 60) = 1584$$

$$v_B = -39.8 \text{ m/s}$$

ب) از رابطه ۱-۱۴ داریم:



فصل دوم

دینامیک و حرکت دایره‌ای

۲-۱- قوانین حرکت نیوتون

۲-۲- معرفی برخی از نیروهای خاص

۲-۳- تکانه و قانون دوم نیوتون

۲-۴- حرکت دایره‌ای یکنواخت

۲-۵- نیروی گرانشی

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

پیامدها

- دانش آموزان با درک مفاهیم این فصل :
- اثر نیرو بر یک جسم را می شناسند.
 - با مرکز جرم جسم آشنا می شوند.
 - قوانین حرکت نیوتون را می شناسند.
 - با حالت متوازن بودن نیروها آشنا می شوند.
 - با ویژگی لختی یک جسم آشنا می شوند.
 - با رابطه نیرو و شتاب آشنا می شوند.
 - با برخی از نیروها مانند وزن، مقاومت شاره، نیروی عمودی سطح، نیروی کشش نخ، نیروی اصطکاک و کشسانی آشنا می شوند.
 - نیروهای وارد بر یک جسم را رسم کرده و نیروی خالص وارد بر جسم را محاسبه می کنند.
 - با کمک قانون دوم نیوتون، شتاب یک جسم را محاسبه می کنند.
 - با تکانه و قانون دوم نیوتون بر حسب تکانه آشنا می شوند.
 - با کمک نمودار نیرو - زمان، تغییر تکانه یک جسم را تعیین می کنند.
 - با حرکت دایره ای یکنواخت و نیروی مرکزگرا و شتاب مرکزگرا آشنا می شوند.
 - با نیروی گرانشی و قانون گرانش آشنا می شوند.
 - وزن را براساس نیروی گرانش می شناسند.
 - شتاب گرانشی یک جسم را در اطراف زمین تعیین می کنند.

چه شناختی مطلوب است؟

- اثر نیرو را که به صورت شروع به حرکت کردن، توقف، کم و زیاد شدن اندازه سرعت (تندی)، تغییر جهت سرعت و تغییر شکل آن جسم، خود را نشان می دهد را می توان به مفهوم سرعت ربط داد و آن را به صورت خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می تواند 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 متوازن اند، تغییری در سرعت جسم ایجاد نمی شود.
- 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 می کند مگر آنکه نیروی خالصی (غیرصفر) بر آن 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 بر جسم است نه در جهت حرکت جسم.
- \vec{ma} نیرو نیست بلکه نیروی خالص وارد بر جسم برابر با حاصل ضرب جرم جسم در شتاب آن است.

- به کمک قانون دوم نیوتون می‌توان شتاب یک جسم را به دست 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 اثرگذار شوند.
- 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 چتر باز، بستگی به زمان بازکردن چتر، به شکل‌های متفاوتی رسم می‌شود.
- با در نظر گرفتن مقاومت هوا، دو جسم هم‌اندازه ولی با جرم‌های متفاوت، با شتاب‌های متفاوت سقوط می‌کنند. اما اگر از مقاومت هوا صرف‌نظر شود، شتاب سقوط همه 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 برابند نیروی عمودی سطح و نیروی اصطکاک که عمود بر هم هستند، تعیین می‌شود.
- از روی نمودار نیرو-زمان، تغییر تکانه یک جسم و نیروی خالص متوسط وارد بر آن را تعیین کند.
- در حرکت دایره‌ای یکنواخت، با دانستن دوره حرکت و شعاع دایره، تندی و شتاب مرکزگرا را تعیین می‌کند.
- نیروی مرکزگرا، نوع جدیدی از نیرو نیست؛ مثلاً در حرکت 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 رابطه 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 فاصله مدار همگام با زمین را تعیین کند.
- وزن و شتاب گرانشی را برحسب نیروی گرانشی تعیین کند.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید در نظر گرفته شود؟

- اگر بر جسمی نیرویی وارد نشود یا نیروهای وارد بر جسم 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 چگونه؟
- حرکت یک چتر باز چگونه است؟ نمودار تندی – 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 دوره حرکت یک جسم، تندی و شتاب مرکزگرای آن را تعیین کرد؟
- چگونه با مشخصه rpm می‌توان دوره 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؟ دوره 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 دانش آموزان 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، رابطه تکانه با قانون دوم نیوتون، رابطه 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 بر جسم، محاسبه شتاب یک جسم برحسب نیروهای وارد بر جسم، تعیین جهت شتاب یک جسم برحسب نیروهای وارد بر جسم، محاسبه وزن جسم، محاسبه نیروی عمودی سطح و نیروی سطح، محاسبه

نیروی اصطکاک، محاسبه 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، محاسبه ثابت فنر از روی نمودار نیروی کشسانی- تغییر طول، تعیین مساحت زیر نمودار نیروی خالص- زمان، تعیین دوره و تندی و شتاب مرکزگرا، محاسبه نیروی گرانش بین دو جسم، تعیین فاصله مدار همگام با زمین، محاسبه 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 متن زیر تصویر، چندین مطلب و سؤال ارائه شده است.

۱ چگونه یک ماهواره در زمان‌هایی طولانی می‌تواند بدون سوخت به دور زمین بچرخد؟

۲ نیروی مرکزگرایی لازم برای چرخش ماهواره چگونه تأمین می‌شود؟

۳ اگر نیروی مرکزگرا وجود نداشت حرکت ماهواره چگونه بود؟

۴ نیروی گرانشی وارد بر ماهواره چگونه به دست 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.

۲

فصل

دینامیک و حرکت دایره‌ای



امروزه تعداد زیادی ماهواره در مدارهای به دور زمین می‌چرخند. بدون آنکه چرخش آنها به سوخت نیاز داشته باشند. این مدارها ظاهراً دارای نیروی وزنی در مرکز آنها قرار دارد. آیا می‌تواند ماهواره‌ها تحت تأثیر چه نیروی در مدار خود باقی می‌مانند و اگر این نیرو وجود نداشته باشد حرکت آنها چگونه خواهد شد؟ با مطالعه این فصل می‌توانید به این نوع پرسش‌ها پاسخ دهید و حتی می‌توانید زمان یک دور چرخش و تندی ماهواره را در یک مدار تعیین کنید.

پیش‌نظرها

- ۱- قوانین حرکت نیوتون
- ۲- معرفی برخی از نیروهای خاص
- ۳- تانگه و قانون دوم نیوتون
- ۴- حرکت دایره‌ای یکسان
- ۵- نیروی گرانشی

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 دانش آموز داده می شود باید نیروهای وارد بر جسم رسم شده باشد، زیرا هنوز دانش آموزان توانایی لازم برای رسم نیروها را ندارند.

دانش آموزان در علوم ششم ابتدایی، دو فصل در مورد نیرو خوانده اند. همچنین در علوم نهم یک فصل در مورد نیرو و یک فصل در مورد ماشین ها خوانده اند. در فصل نیرو و ماشین های نهم با اثرات نیرو (شروع به حرکت، توقف حرکت، تند و کند شدن حرکت، تغییر جهت حرکت و تغییر شکل) آشنا شدند.

با توجه به آنچه در فصل ۱ این کتاب در مورد سرعت خوانده اند این اثرات را می توانند به صورت خلاصه بیان کنند. یعنی اثر نیروی وارد بر یک جسم می تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود. در این صفحه از کتاب سعی می شود پلی بین آنچه دانش آموزان پیش از این در مورد نیرو خوانده اند و مطالب جدیدتر برقرار کنیم. به همین دلیل این صفحه از اهمیت زیادی برخوردار است و سبب یادآوری مطالب سال های گذشته در مورد نیرو می شود؛ مثلاً: نیرو اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است یا نیرو، حاصل بر هم کش دو جسم بر یکدیگر است یا وقتی جسمی را هل می دهیم یا می کشیم بر آن نیرو وارد می کنیم. در حاشیه کتاب مرکز جرم جسم معرفی شده است که به دانش آموزان کمک می کند تا بفهمند چرا معمولاً نیروی وارد بر جسم را از مرکز جرم جسم می کشیم.

۱-۲- قوانین حرکت نیوتون

در این صفحه همچنین به بردار بودن نیرو و وسیله ای که با آن می توان نیرو را اندازه گیری کرد، اشاره شده است. توجه کنید در این کتاب سعی شده است از آخرین استانداردهای آموزش فیزیک در انتخاب تعاریف، قوانین، اصل ها، نمادگذاری ها و... استفاده شود. علت متفاوت بودن برخی قوانین یا تعاریف آورده شده در این کتاب با کتاب های قبلی، همین استانداردهای جدید است؛ مثلاً نمادگذاری نیروی عمودی سطح در کتاب های جدید به صورت F_N ، نیروی مقاومت شاره و هوا به صورت F_D ، نیروی کشسانی F_e ، نیروی خالص F_{net} و... است.

تحقیقات آموزشی نشان می دهد قبل از آنکه وارد بحث قوانین حرکت شویم بهتر است حالتی که بر یک جسم هم زمان چند نیرو اثر می کنند و این نیروها اثر همدیگر را خنثی می کنند به عبارت دیگر نیروها متوازن اند، بحث شود. در مورد حالت نیروهای متوازن در علوم نهم به اندازه کافی دانش آموزان مطالبی را خوانده اند: کافی است در اینجا فقط یادآوری هایی صورت گیرد.

شکل ۱.۳



در تمام حالت های روزانه با نیرو سروکار داریم. راه رفتن، باز و بسته کردن در و پنجره، نوشتن، کار با گونی، همراه نشستن و دوچرخه سواری نمونه هایی از این دست هستند و همچنین حرکت قطار، هواپیما، خودرو و... بدون اعمال نیرو انجام نمی شوند.

در فصل اول با کشتی های ماکان، تند، سرعت و شتاب آشنا شدیم و حرکت یک جسم را به کمک آنها توصیف کردیم اما از علت انواع حرکت، برشی 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 می ماند؟ و...

وقتی جسمی را می کشیم یا آن را هل می دهیم، به آن نیرو وارد می کنیم. نیرو، حاصل برهم کنش با اثر مطلق دو جسم بر یکدیگر است. نیرو کینتی برداری است که علاوه بر اندازه، جهت نیز دارد (شکل ۱-۲). معمولاً نیرو را با F نشان می دهند. در رسم نیرو از یک پاره خط جهت دار با مقیاس مناسب استفاده می شود، مثلاً در شکل ۱-۲، بردار وزن دو گلدان را مشاهده می کنید که با مقیاس مناسب رسم شده اند.

نیرو را به کمک نیروسنج اندازه گیری می کنیم و یکی آن، نیوتون است که با نماد N نشان داده می شود. از نیرو بر یک جسم به شکل های مختلف مانند شروع به حرکت کردن، توقف، کم و زیاد شدن اندازه سرعت (تندی)، تغییر جهت سرعت و غیره شکل آن جسم، خود را نشان می دهد. با توجه به آنچه در مورد سرعت فراگرفتیم، می توان به طور خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود.

به طور کلی در این فصل می خواهیم درباره نیروها، که نقش اساسی در تغییر سرعت یک جسم یا تغییر شکل جسم دارند، قوانین حرکت و حرکت را به بحث بکشیم. در کتاب علوم نهم با مفهوم نیرو و قوانین نیوتون درباره حرکت آشنا شدیم. در اینجا ضمن مرور و یادآوری آنها، مفاهیم فراگرفته شده را گسترش می دهیم تا توانایی درک شتاب در رابطه با مفهوم نیرو، عمق بیشتری پیدا کند و بتوانید بر اساس نیروهای وارد شده به یک جسم، حرکت آن را بررسی و تحلیل کنید.



شکل ۱-۲: یکی از انواع ماکان فرض می شود که تمام یک جسم بر یک نقطه، به نام مرکز جرم، متمرکز است و بهای آنکه نیرو، به فستهای مختلف جسم وارد شود به این نقطه وارد می شود.

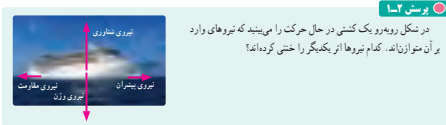
۱-۲-۱ قوانین حرکت نیوتون

ایزاک نیوتون (۱۶۴۳-۱۷۲۷) نخستین کسی بود که به رابطه میان نیرو و شتاب پی برد. این رابطه همراه با دیگر قانون های نیوتون، اساس مکانیک نیوتونی را تشکیل می دهند. در این بخش به بررسی سه قانون اصلی حرکت می پردازیم.

قانون اول نیوتون: در علوم نهم دیدیم که اگر به جسمی به طور هم زمان چند نیرو اثر کند و این نیروها اثر یکدیگر را خنثی کنند، به عبارت دیگر برایش نیروهای وارد بر جسم صفر شود، می گویم نیروهای وارد بر جسم متوازن هستند.

۳-۱-۲ مرکز لگنسی، Physics مکانیک نیوتون است.

فصل ۱۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای



قبل از سال ۱۶۰۰ میلادی دیدگاه رایج این بود که هر جسم در حال حرکتی برای ادامه 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 به صورت 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 نشده». 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.

در فیلمی علمی - تخیلی، موتور یک کشتی فضایی که در فضای خالی خارج از جو زمین و دور از هر سیاره و خورشید در حرکت است، از کار می‌افتد. در نتیجه حرکت کشتی فضایی کند می‌شود و می‌ایستد. آیا امکان وقوع چنین رویدادی وجود دارد؟ توضیح دهید.

دربارۀ آزمایش ذهنی گالیله تحقیق کنید و به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید در اتوبوسی نشسته‌اید و اتوبوس در یک جاده مستقیم حرکت می‌کند. اگر راننده ترمز کند و شما کمرتد خود را پشته بزنید، ممکن است به جلو پرتاب شوید (مثالی شود). 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» گویند.

پاسخ پرسش ۱-۲

این پرسش برای یادآوری حالت متوازن در نیروهاست؛ چون نیروها هم راستا 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 می‌کند.

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 رسمی مانند امتحانات نهایی و کنکور ضایع نشود.

در آموزش قانون اول نیوتون به نقش اساسی گالیله در این قانون اشاره شود. این نقش آن قدر مهم است که در برخی از کتاب‌های دنیا به قانون اول حرکت نیوتون قانون گالیله نیز می‌گویند. آزمایش‌های فکری - عملی گالیله نقش بسیار جدی برای رسیدن به این قانون داشتند. از قانون اول نیوتون نتیجه می‌گیریم: از نظر فیزیک، حالت سکون و حالت با سرعت ثابت معادل یکدیگر هستند.

پاسخ پرسش ۲-۲

هدف از این پرسش گسترش آموخته‌های دانش‌آموزان به دنیای واقعی آنهاست. دانش‌آموزان حتی وقتی یک کارتون را می‌بینند، باید با نگاهی علمی آن را تجزیه و تحلیل کنند و بتوانند تشخیص دهند که آنچه می‌بینند 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 بخواد 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.

پرسش ۱-۱



در شکل رویه‌ی یک کشتی در حال حرکت را می‌بینید که نیروهای وارد بر آن متوازن‌اند. کدام نیروها اثر یکدیگر را خنثی کرده‌اند؟

قبل از سال ۱۶۰۰ میلادی دیدگاه رایج این بود که هر جسم در حال حرکتی برای ادامه 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 به صورت 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 نشود». 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 ۲-۱

در فیلمی علمی-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 کند می‌شود و می‌ایستد. آیا امکان وقوع چنین رویدادی وجود دارد؟ توضیح دهید.

نکات ۱-۲

درباره آزمایش ذهنی گالیله تحقیق کنید و به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید در اتوبوسی نشسته‌اید و اتوبوس در یک جاده مستقیم حرکت می‌کند. اگر ایستاده بایستید و تماشا کنید خود را ایستاده، ممکن است به جلو برتاب شوید (شمالی شوید). با اگر اتوبوس ساکن باشد و ناگهان ترمز 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' گویند.

۱۸-Newton

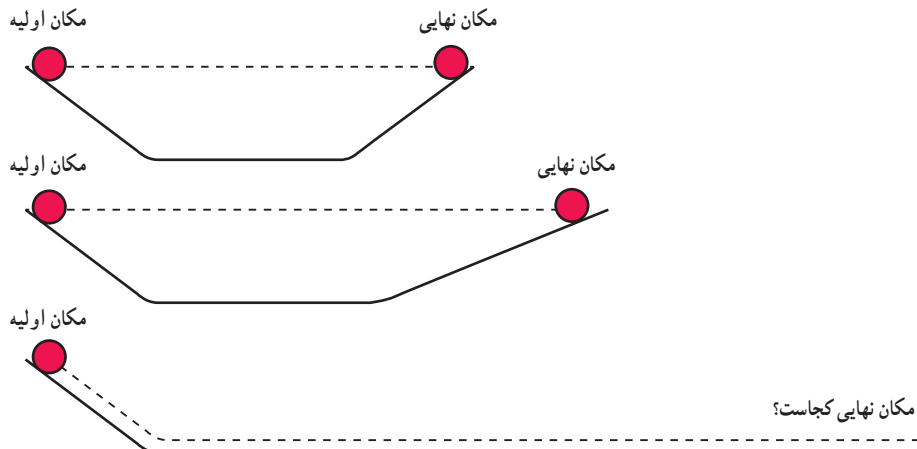
۳۱

پاسخ فعالیت ۱-۲

این آزمایش ذهنی، کمک زیادی کرد تا نیوتون قانون اول را بیان کند. دانستنی زیر کمک می‌کند تا در مورد آنچه دانش آموزان 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 روبه‌روی 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 به دست آورد. بدیهی است که هر چه شیب سطح 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 اولیه 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 - عملی نتیجه گرفت که برای حرکت یکنواخت جسم روی خط راست نیازی به وارد کردن نیرو به جسم نیست.



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 کمیته نرده‌ای که از قواعد حساب معمولی پیروی می‌کند.

پاراگراف آخر این صفحه (صفحه 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 شُس 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 ضربه زدن به انتهای دسته بیل یا کلنگ به زمین سبب سفت شدن بیل به دسته یا کلنگ می‌شوند.

پاسخ پرسش ۳-۲

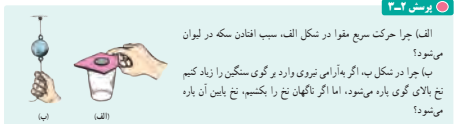
هدف این پرسش ارائه چند مثال از پدیده لختی است.

(الف) سکه تمایل دارد حالت سکون خود را براساس لختی حفظ کند. بنابراین وقتی وقتی مقوا سریع کشیده می‌شود (تغییر تکانه 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 اما 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.

فیزيكا ۳۳

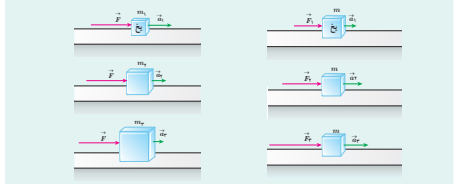
پرسش ۳-۲



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.

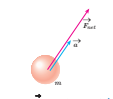
پرسش ۴-۱

در شکل‌های زیر، قطعه‌های راوی یک سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارند. استنباط خود را از این شکل‌ها بیان کنید.

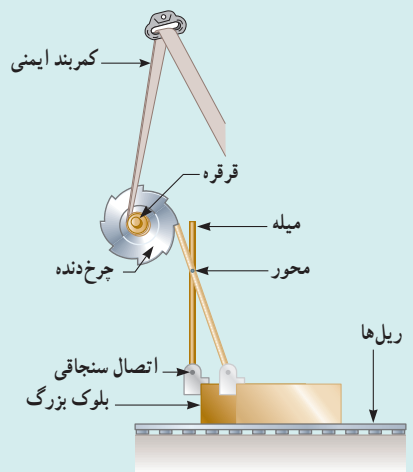


مشاهدات مختلف نشان می‌دهد، هر چه نیروی خالص وارد بر جسم بزرگتر باشد شتابی که جسم می‌گیرد نیز بیشتر خواهد بود. جرم جسم نیز روی شتابی که این جسم می‌گیرد مؤثر است. با یک نیروی خالص معین، هر چه جرم جسم بیشتر باشد، شتاب آن کمتر است. یعنی شتاب با جرم نسبت وارون دارد.

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 ۳۴-۱ شتاب جسم (a) بر جهت نیروی خالص وارد بر آن (F) است.



آرایش مکانیکی برای کمر بند ایمنی خودرو

کاربرد لختی در طراحی و ساخت دستگاه کمر بند ایمنی

می‌توان از لختی برای توصیف عملکرد یک نوع از سازوکار کمر بندهای ایمنی خودروها استفاده کرد. در صورت وقوع تصادف، هدف کمر بند ایمنی محکم نگه داشتن مسافر در جای خود نسبت به خودرو است تا مانع از جراحت جدی شود. شکل رویه‌رو نشان می‌دهد کمر بندی که از روی شانه گذرد چگونه کار می‌کند. در شرایط عادی، چرخ دنده آزادانه می‌چرخد تا با حرکت مسافر کمر بند دور قرقره پیچ بخورد یا باز شود. هنگام تصادف خودرو با شتاب زیاد متوقف می‌شود. بلوک بزرگ زیر صندلی به واسطه لختی، به حرکت رو به جلو در امتداد ریل‌ها ادامه می‌دهد. اتصال سنجاقی بین این بلوک و میل به باعث می‌شود که میل دور مرکزش بچرخد و چرخ دنده را درگیر کند. در این مرحله، چرخ دنده در جای خود قفل شده و کمر بند دیگر باز نمی‌شود.

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. در اینجا به کمک پرسش ۲-۴ می‌توان فرصتی دوباره به دانش‌آموزان داد تا خودشان بتوانند قانون دوم را کشف کنند.

پاسخ پرسش ۲-۴

از این شکل‌ها می‌توان استنباط کرد که: ۱- در همه حالت‌ها که بر جسم نیرو وارد شده، جسم نیز شتاب پیدا کرده است. ۲- در همه حالت‌ها، شتاب در جهت نیروی وارد بر جسم است. ۳- از شکل‌های ستون اول نتیجه می‌گیریم که وقتی جرم ثابت است، با افزایش نیرو، شتاب نیز به همان نسبت افزایش پیدا می‌کند. ۴- 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 برآیند (هر چند این دو معادل یکدیگر هستند اما نیروی خالص برای دانش‌آموزان قابل فهم‌تر است).

تورک ۳۳

پرسش ۲-۴

الف) چرا حرکت سریع متوازی در شکل الف، سبب افتادن سکه در لیوان می‌شود؟
 ب) چرا در شکل ب، اگر به آرامی نیرو وارد بر گوی سبکین را زیاد کنیم، نخ بالای گوی باره می‌شود، اما اگر ناگهان نخ را بکشیم، نخ پایین آن باره می‌شود؟

قانون دوم نیوتون: قانون اول نیوتون به بررسی حرکت جسمی می‌پردازد که نیروی خالصی 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 ۲-۴

در شکل‌های زیر، قطعه‌ها 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.

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 ۳۳-۴ شتاب جسم (a) بر جهت نیروی خالص وارد بر آن (F_{خالص}) است.

۴۲

فصل ۱۸: دینامیک و حرکت دایره‌ای

نسبت وارون دارد.

و یا:

(۱۳-۲) $\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a}$ (قانون دوم نیوتون)

نیروی موتور یک قایق موتوری که جرم آن با سرشتیش 400 kg است، به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در بازه زمانی معینی، همواره نیروی افقی خالص 800 N به طرف جلو بر قایق وارد می‌کند. (الف) شتاب این قایق چقدر و در چه جهتی است؟ (ب) اگر نیروی پشیران در یک لحظه 1200 N باشد، نیروی مقاومت در آن لحظه چقدر است؟

با چقدر طول می‌کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به 15 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 رابطه ۱۳-۲ را برای یک راستا به صورت $a = \frac{F_{\text{net}}}{m}$ نوشت:

$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{800 \text{ N}}{400 \text{ kg}} = 2 \text{ m/s}^2$$

با توجه به اینکه جهت شتاب همواره در جهت نیروی خالص است، شتاب قایق به طرف جلو خواهد بود.

(ب) نیروی پشیران و مقاومت در یک راستا هستند، بنابراین می‌توانیم بنویسیم:

$$F_{\text{net}} = F_{\text{پشیران}} - F_{\text{مقاومت}} \Rightarrow 800 \text{ N} = 1200 \text{ N} - F_{\text{مقاومت}} \Rightarrow F_{\text{مقاومت}} = 400 \text{ N}$$

(پ) از رابطه سرعت - زمان و سرعت - جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت استفاده می‌کنیم.

$$v = at + v_i \Rightarrow 15 \text{ m/s} = (2 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 7.5 \text{ s}$$

$$v^2 = v_i^2 + 2a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_i^2}{2a} = \frac{(15 \text{ m/s})^2 - (0 \text{ m/s})^2}{2(2 \text{ m/s}^2)} = 56.25 \text{ m}$$

به این ترتیب با داشتن نیروی خالص می‌توانیم کمیت‌های شتاب، زمان حرکت، مکان و جابه‌جایی را بدست آوریم.

(۱۸-۲) در زمان انگلیسی به معنی خالص است.

در این کتاب سعی شده است؛ هر رابطه 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 فهمی رایج بین دانش‌آموزان است. بسیاری از دانش‌آموزان فکر می‌کنند $m\vec{a}$ نیرو است.

بهرتر است بعد از آموزش قانون دوم و حل چند مثال، این کج فهمی را 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.

$$1\text{N} = (1\text{kg})(1\text{m/s}^2) \Rightarrow 1\text{N} \equiv 1\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$$

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 ۱-۲

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 دانش‌آموزان خواسته می‌شود براساس شتاب به دست آمده، سرعت و جابه‌جایی 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 آوریم.

توجه

نیرو باعث تغییر حرکت می‌شود. حرکت حتی در نبود نیروها هم صورت می‌گیرد. اما نیروی خالص سبب تغییر حرکت می‌شود.

توجه

قانون دوم نیوتون معادله‌ای برداری 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 به صورت نرده‌ای با هم جمع نمی‌کنیم.

شکل ۲-۲ نیروهای وارد بر توپ فوتبالی به جرم ۰.۴۲ کیلوگرم در بالاترین نقطه مسیرش نشان می‌دهد که در آن \vec{F}_1 نیروی مقاومت هوا و \vec{F}_2 وزن توپ است. جهت وزنی شتاب توپ در این نقطه را تعیین کنید. از نیروهای دیگر وارد بر توپ صرف‌نظر می‌نمود.

پاسخ: جهت شتاب در جهت نیروی خالص (برایند) است.

قانون سوم نیوتون: وقتی قری را می‌کنید، قری نیز شما را می‌کند. در برخورد راکت با توپ تیس، 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 آهن‌ریا بدون تماس با یکدیگر به هم نیروی مغناطیسی وارد می‌کنند (شکل ۲-۳). در این مثال‌ها نیرو اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است.

واکنش نامیده می‌شود. قانون سوم نیوتون رابطه‌ای بین نیروهای کنش و واکنش را به صورت زیر بیان می‌کند:

هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم نیز به جسم اول نیروی 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:

(۲-۳) $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21}$ (قانون سوم نیوتون)

توجه داریم ممکن است نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی شود؛ مثلاً هنگام کوبیدن میخ در قطعاتی چوب، چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و سبب فرورفتن میخ در چوب می‌شود. نیروی وارد از میخ به چکش حرکت چکش را کند و متوقف می‌کند (شکل ۲-۴).

توجه کنید که نیروهای کنش و واکنش همواره به دو جسم وارد می‌شوند و هیچ‌گاه مثلاً هر دو الکتریکی‌اند، یا هر دو مغناطیسی‌اند یا هر دو گرانشی‌اند و یا ...

(۱- بررسی حالت‌های که نیروها هم‌راستا یا عمود بر هم هستند خارج از رفته‌درس این کتاب است و باید مورد ارزیابی قرار گیرد.)

بسیاری از دانش‌آموزان فکر می‌کنند جهت نیروی خالص و شتاب حرکت با جهت حرکت یکی است. این مثال این کج فهمی رایج بین دانش‌آموزان را می‌تواند اصلاح کند.

بهتر است توجه دانش‌آموزان را به جهت حرکت، جهت نیروی خالص و جهت شتاب جلب کنیم.

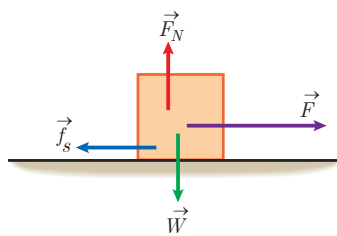
همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، نیروهای وارد بر توپ توسط مؤلف داده شده است. البته بعد از معرفی نیروهای خاص، دانش‌آموزان خودشان می‌توانند این نیروها را رسم کنند.

تصویرهای داده شده در شکل ۲-۴ نیروهای کنش و واکنش را برای حالت غیرتماسی نشان می‌دهد، اما شکل ۲-۵ نیروی کنش و واکنش را برای نیروهای تماسی رسم کرده است.

دانش‌آموزان در علوم نهم با قانون سوم نیوتون آشنا شده‌اند، اما در اینجا انتظار می‌رود به شکل گسترده‌تر و عمیق‌تر با این قانون آشنا شوند.

نظر دانش‌آموزان را باید به این نکته کتاب جلب کرد که نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی می‌شوند؛ مثلاً هنگام قدم زدن پای جلویی ما زمین را به عقب هل می‌دهد و زمین ما را به جلو هل می‌دهد. یا هنگام دوچرخه‌سواری، چرخ عقبی (در اثر اصطکاک بین چرخ و زمین) زمین را به عقب هل می‌دهد و زمین چرخ را به جلو هل 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، اما 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.

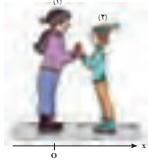


توجه مهم

در زیرنویس صفحه ۳۴ کتاب درسی نوشته شده است که: «بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا یا عمود بر هم نیستند خارج از برنامه درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد». از این زیرنویس نتیجه می‌شود که کلیه مسئله‌هایی که برای تجزیه و تحلیل آنها نیاز به تجزیه نیروها وجود دارد، خارج از برنامه درسی محسوب می‌شود و همچنین تمام حالت‌هایی که برای به دست آوردن نیروی خالص باید از رابطه $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}$ استفاده شود (به جز حالت‌هایی که زاویه α برابر صفر یا 90° یا 180° است) خارج از برنامه کتاب درسی محسوب می‌شود.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۳-۲



دو شخص به جرم‌های 750 kg و 500 kg با کفش‌های چرخ‌دار در یک سطح و صاف روی‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی 1000 N شخص دوم را به طرف راست هل می‌دهد.

الف) شتابی که شخص دوم می‌گیرد چقدر است؟
ب) شتابی که شخص اول می‌گیرد چقدر است؟

پاسخ: از قانون سوم نیوتون می‌دانیم نیروی که شخص اول به دوم وارد می‌کند (F_{12}) ها، اندازه و در خلاف جهت نیروی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند (F_{21}) . با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{12} &= -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = 1000\text{ N} \\ \vec{a}_2 &= \frac{\vec{F}_{12}}{m} = \frac{(1000\text{ N})\vec{i}}{500\text{ kg}} = (2\text{ m/s}^2)\vec{i} \\ \vec{a}_1 &= \frac{\vec{F}_{21}}{m} = \frac{-(1000\text{ N})\vec{i}}{750\text{ kg}} = -(1/3\text{ m/s}^2)\vec{i} \end{aligned}$$

توجه کنید نیروهای وارد بر هر دو نفر هم‌اندازه بوده است، اما به علت متفاوت بودن جرم‌ها، شتاب‌ها متفاوت شده است.

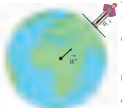
پرسش ۳-۲

شخص در حال هل دادن جعبه‌ای سنگین روی سطح افقی است و این جعبه در جهت این نیرو حرکت می‌کند. با توجه به آنکه نیروی که شخص به جعبه وارد می‌کند با نیروی که جعبه به شخص وارد می‌کند هم‌اندازه است، توضیح دهید چگونه جعبه حرکت می‌کند؟

۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

با به قانون دوم نیوتون $(\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a})$ 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 خواندید وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۲). 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:



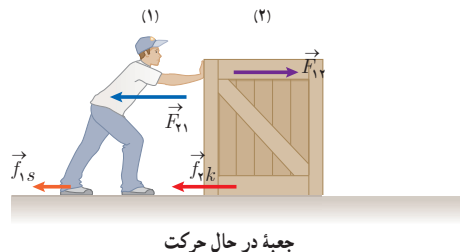
اگر جرم جسم را با m ، شتاب گرانشی را با \vec{g} و وزن را با \vec{W} نشان دهیم، رابطه بالا به شکل زیر درمی‌آید:

$$\vec{W} = m\vec{g} \quad (\text{وزن جسم}) \quad (2-2)$$

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. حل مثال ۳-۲ و تحلیل آن منجر به اصلاح این کج فهمی می‌شود.

پاسخ پرسش ۵-۲

شخص (۱) به جسم (۲) نیروی \vec{F}_{12} را وارد می‌کند و جسم به شخص نیروی هم‌اندازه اما 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 $F_{12} > f_{k2}$ باشد، جعبه به طرف راست شتاب می‌گیرد. توجه داریم به شخص در راستای افقی دو نیروی اصطکاک f_{s1} و F_{21} وارد می‌شود و برای آنکه شخص بتواند جعبه را هل دهد باید: $F_{12} \leq f_{s2\text{max}}$ باشد.



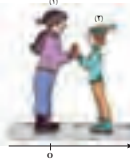
جعبه در حال حرکت

پیش‌پیشنهادهای

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 هم اندازه‌اند.
ب) با توجه به اینکه جرم خودروی سواری کمتر از جرم کامیون است، بنابراین با نیرویی هم اندازه، شتاب خودروی سواری بیشتر از کامیون است.

فصل ۴: حرکت و حرکت

مثال ۲-۲



دو شخص به چهره‌ای 75.0 kg و 50.0 kg با کنش‌های چرخه‌دار در یک سالن مسطح و صاف رویه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی 100 N شخص دوم را به طرف راست هل می‌دهد.

الف) شتابی که شخص دوم می‌گیرد چقدر است؟
ب) شتابی که شخص اول می‌گیرد چقدر است؟

پاسخ: از قانون سوم نیوتون می‌دانیم نیروی که شخص اول به دوم وارد می‌کند (\vec{F}_{12}) هاب‌اندازه و در خلاف جهت نیروی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند (\vec{F}_{21}) . با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

$$\begin{aligned}\vec{F}_{12} &= -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = 100\text{ N} \\ a_2 &= \frac{F_{12}}{m} = \frac{(100\text{ N})}{50\text{ kg}} = (2.00\text{ m/s}^2) \hat{i} \\ a_1 &= \frac{F_{21}}{m} = \frac{-(100\text{ N})}{75\text{ kg}} = -(1.33\text{ m/s}^2) \hat{i}\end{aligned}$$

توجه کنید نیروهای وارد بر هر دو نفر هاب‌اندازه بوده است، اما به علت متفاوت بودن جرم‌ها، شتاب‌ها متفاوت شده است.

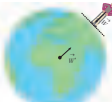
پیش ۲-۳

شخص در حال هل دادن چهره‌ای سنگین روی سطح افقی است و این چهره در جهت این نیرو حرکت می‌کند. با توجه به آنکه نیروی که شخص به چهره وارد می‌کند با نیرویی که چهره به شخص وارد می‌کند هاب‌اندازه است، توضیح دهید چگونه چهره حرکت می‌کند؟

۲-۳ معرفی برخی از نیروهای خاص

تا به قانون دوم نیوتون $(\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a})$ 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 غلظم هفتم خواندید وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۳۱). 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 جسم بی‌نویس نبود، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم:



شکل ۲-۳۱: زمین بر جسم نیروی گرانشی (\vec{W}) وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی (\vec{W}) وارد می‌کند.

شتاب \approx جرم جسم = وزن جسم
اگر جسم را با m ، شتاب گرانشی را با \vec{g} و وزن را با \vec{W} نشان دهیم، رابطه بالا به شکل زیر درمی‌آید:

$$\vec{W} = m\vec{g} \quad (\text{وزن جسم}) \quad (2-31)$$

راهبرد حل مسئله: مسئله‌هایی که با قانون دوم نیوتون حل می‌شوند می‌توانند بسیار پیچیده باشند ولی ما در کتاب درسی فقط حالت‌های نسبتاً ساده آن را بررسی می‌کنیم (حالت‌هایی که نیروها هم راستا 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 به گونه‌ای 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 به کار 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

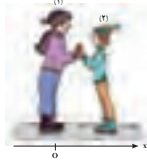
$$\text{ساده می‌شود. } (\sum F_y = 0 \text{ و } \sum F_x = 0)$$

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 ۲، دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۳-۲



دو شخص به جرم‌های 75 kg و 50 kg با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روی‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی 100 N شخص دوم را به طرف راست هل 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:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = 100\text{ N}$$

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{12}}{m} = \frac{(100\text{ N})\vec{i}}{50\text{ kg}} = (2\text{ m/s}^2)\vec{i}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{21}}{m} = \frac{-(100\text{ N})\vec{i}}{75\text{ kg}} = -(1.33\text{ m/s}^2)\vec{i}$$

توجه کنید نیروهای وارد بر هر دو نفر هم‌اندازه بوده است، اما به علت متفاوت بودن جرم‌ها، شتاب‌ها متفاوت شده است.

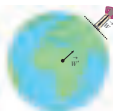
پرسش ۳-۱

شخصی در حال هل دادن جعبه‌ای سنگین روی سطح افقی است و این جعبه در جهت این نیرو حرکت می‌کند. با توجه به آنکه نیروی که شخص به جعبه وارد می‌کند با نیرویی که جعبه به شخص وارد می‌کند هم‌اندازه است. توضیح دهید چگونه جعبه حرکت می‌کند؟

۲-۳ معرفی برخی از نیروهای خاص

بنا به قانون دوم نیوتون $(\vec{F}_{\text{net}} = m\vec{a})$ 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 خواندید وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۳). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین می‌گیریم، 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:



شکل ۲-۳: وزن جسم نیروی گرانشی است که از طرف زمین وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی (\vec{W}) وارد می‌کند.

۳۵

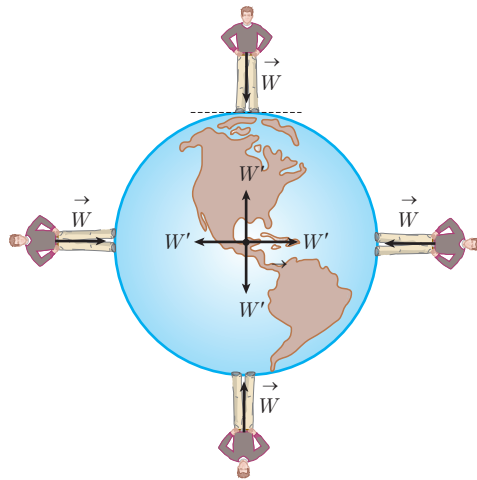
شتاب \times جرم جسم = وزن جسم

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:

$$\vec{W} = m\vec{g} \quad (\text{وزن جسم}) \quad (2-3)$$

۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

دانش‌آموزان با نیروی وزن کاملاً آشنا هستند. کج فهمی رایج در مورد شکل ۲-۶ 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).



پرسش پیشنهادی

سببی از درخت آویزان است. در اثر باد سبب 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 سبب 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 سبب 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 اما اندازه وزن آن در قطب بیشتر از اندازه وزن آن در استوا است.

پاسخ تمرین ۱-۲

در این تمرین وزن یک جسم روی یک سیاره دلخواه تعریف شده است. براساس این تعریف از دانش آموزان می‌خواهد وزن قطعه طلای 10° گرمی را در سطح زمین، ماه و مریخ به دست آورده و با هم مقایسه نمایند.

$$W_{\text{زمین}} = mg_{\text{زمین}} = (0/10^\circ \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg}) = 0/98 \text{ N} \quad (\text{الف})$$

$$W_{\text{ماه}} = mg_{\text{ماه}} = (0/10^\circ \text{ kg})(1/6 \text{ N/kg}) = 0/16 \text{ N} \quad (\text{ب})$$

$$W_{\text{مریخ}} = mg_{\text{مریخ}} = (0/10^\circ \text{ kg})(3/7 \text{ N/kg}) = 0/37 \text{ N} \quad (\text{پ})$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، چون شتاب گرانشی در سطح زمین بیشتر از مریخ و ماه است، وزن قطعه طلا نیز بیشتر است:

$$W_{\text{زمین}} > W_{\text{مریخ}} > W_{\text{ماه}}$$

$$\frac{W_{\text{زمین}}}{W_{\text{ماه}}} = \frac{mg_{\text{زمین}}}{mg_{\text{ماه}}} = \frac{g_{\text{زمین}}}{g_{\text{ماه}}} = 6/2 \quad \text{یا} \quad \frac{W_{\text{زمین}}}{W_{\text{مریخ}}} = \frac{mg_{\text{زمین}}}{mg_{\text{مریخ}}} = \frac{g_{\text{زمین}}}{g_{\text{مریخ}}} = 2/6$$

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 تکانه بیشتری را به جسم وارد می‌کنند. بنابراین نیروی مقاومت شاره به بزرگی جسم، تندی آن و ... بستگی دارد.

مثال ۴-۲: در مثال ۴-۲ توجه داریم که وقتی چتر باز چترش را باز می‌کند، نیروی مقاومت هوا حدود ۲ برابر وزن چتر باز می‌شود. پس در این‌گونه مثال‌ها که نیروی مقاومت شاره تا این حد بزرگ است، صرف‌نظر کردن از آن، عملاً حل مسئله را به بیراهه می‌کشاند و حتماً باید این نیرو در نظر گرفته شود. نکته مهم دیگر آن است که معمولاً نیروی مقاومت شاره متغیر است (البته در حالتی که جسم مانند چتر باز به تندی حدى 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 هوا به طرف زمین (مركز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است، اما وزن آن طبق رابطه ۳-۲ به مقدار g در آن مکان بستگی دارد. مثلاً اگر جرم شخصی 60 kg باشد، در محلی که $g = 9/8 \text{ N/kg}$ است، وزن آن 588 N و در بالونی که در ارتفاع زیاد حرکت می‌کند و در آن ارتفاع $g = 9/6 \text{ N/kg}$ است تقریباً 567 N است. شتاب جاذبه در سطح زمین تقریباً $9/8 \text{ N/kg}$ است.

تمرین ۳-۲

الف) وزن قطعه‌ای طلا به جرم 10° گرم را روی سطح زمین به دست آورید.
ب) وزن یک جسم در سطح یک سیاره برآی با نیروی گرانشی است که از طرف آن سیاره بر جسم وارد می‌شود. وزن این قطعه طلا را در سطح ماه و مریخ به دست آورید و با هم مقایسه کنید. ($g_{\text{زمین}} = 9/8 \text{ N/kg}$ ، $g_{\text{ماه}} = 1/6 \text{ N/kg}$ ، $g_{\text{مریخ}} = 3/7 \text{ N/kg}$)

توجه کنید، حتی اگر جسم در حال سقوط آزاد نباشد باز هم نیروی وزن (W) بر آن وارد می‌شود. مثلاً یک چتر باز قبل از پرش، در حال سقوط و حتی هنگام رسیدن به زمین، نیروی وزن وارد شده و از رابطه ۳-۲ به دست می‌آید.

نیروی مقاومت شاره: وقتی جسمی مانند یک توپ را از بالای ساختمانی رها می‌کنیم، علاوه بر وزن جسم، نیروی دیگری از طرف هوا به جسم در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود. به طور کلی وقتی جسمی در یک شاره (مایع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شاره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن نیروی مقاومت شاره می‌گویند و معمولاً آن را با F_D نشان می‌دهند. 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 ۴-۲

چتربازی به جرم 60 kg یعنی 588 N از یک کوش آزاد، چترش را باز می‌کند. ناگهان نیروی مقاومت هوا به 1120 N افزایش می‌یابد. شتاب چتر باز را در این لحظه به دست آورید و حرکت آن را تحلیل کنید. برای سادگی g را $9/8 \text{ N/kg}$ فرض کنید.

پاسخ: با توجه به شکل، نیروی وزن به طرف پایین و مقاومت هوا به طرف بالا است. اگر محور مختصات را رو به بالا انتخاب کنیم، برای محاسبه شتاب چتر باز در این حالت می‌توانیم بنویسیم:

$$F_D - W = ma \Rightarrow (1120 \text{ N}) - (588 \text{ N}) = (60 \text{ kg})(a) \Rightarrow a = \frac{532 \text{ N}}{60 \text{ kg}} = 8/9 \text{ m/s}^2$$

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید شتاب چتر باز در این حالت $8/9 \text{ m/s}^2$ و رو به بالا، یعنی در خلاف جهت حرکت آن است. پس به تدریج تندی چتر باز کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی مقاومت هوا نیز

کاهش می‌دهد. نیروی مقاومت شاره، با نیروی تندی که از قبل به هم با آن آشنا هستید، مقابله می‌کند. $D = 1/2 C \rho A v^2$ به معنای ساینس است.

همان لحظه‌ای که نیروی مقاومت هوا داده شده است، محاسبه کرد. در سطر دوم این مثال نوشته شده است: «حرکت چتر باز را تحلیل کنید» بنابراین در آزمون‌های رسمی نیز می‌توان پرسش‌هایی را مطرح کرد که از دانش آموز خواسته شود، حرکت یک جسم را بر اساس 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 $5^\circ/^\circ \text{g}$ است. نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت قطره باران چند میلی نیوتون است؟ ($g = 9/8 \text{ N/kg}$)

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:

$$f_D = mg = (5^\circ/^\circ \times 10^{-3} \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg}) = 4/9 \times 10^{-4} \text{ N} = 0/49 \text{ mN}$$

فصل ۱۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن هم‌اندازه شده و نیروهای وارد بر چتر باز متوازن شوند. پس از این چتر باز با تندی ثابت موسوم به **تندی حدی**، به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک چتر باز نوعی حدود 50 m/s و برای قطرات باران حدود 7 m/s است.

مثال ۵-۲

دو گوی هم‌اندازه را که جرم یک دو برابر دیگری است ($m_1 = 2m_2$) از بالای برجی به ارتفاع h به‌طور هم‌زمان رها می‌کنیم. فرض کنید که 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 در نظر گرفتن مقاومت هوا، هر چه m بیشتر باشد، شتاب حرکت بیشتر است.

در نتیجه $a_1 > a_2$ است.

طبق رابطه سرعت - جابه‌جایی می‌توانیم بنویسیم:

$$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta y \Rightarrow v^2 - 0 = 2a\Delta h \Rightarrow v = \sqrt{2a\Delta h} \Rightarrow v_1 > v_2$$

یعنی در این مثال تندی برخورد گوی سنگین‌تر، بیشتر از گوی سبک‌تر است.

تمرین ۲-۲

اگر در مثال ۵-۲ از مقاومت هوا صرف‌نظر کنیم، سرعت برخورد گوی‌ها با زمین را با هم مقایسه کنید.

نیروی عمودی سطح: مطابق شکل ۷-۲، لپتابی را روی سطح افقی می‌زی در نظر بگیرید. بر لپتاب سائگی روی میز افقی چه نیروهایی وارد می‌شود؟ با توجه به اینکه نیروی وزن بر لپتاب وارد می‌شود، چه نیروی سبب خشن شدن آن و سکون جسم می‌شود؟

همان‌طور که می‌دانیم نیروهای وارد بر جسم سائگی، متوازن‌اند، بنابراین در این حالت باید یک نیروی هم‌اندازه و در خلاف جهت وزن از طرف میز (سطح) بر لپتاب وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، **نیروی عمودی سطح** (کنک‌گاز) می‌گویند و آن را با F_N نشان می‌دهند.

نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح استخوانی یا یک تکیه قرار دهیم تغییر شکل سطح با تکیه 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 فیریک ۱ آن آشنا شدیم.

مثال ۵-۲: از این منظر بسیار مهم است که با در نظر گرفتن مقاومت هوا، شتاب جسم‌ها متفاوت با g بوده و بر اساس 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 دانش آموز 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 ($m_1 = 2m_2$ و $f_{D1} = f_{D2}$) جسم سنگین‌تر با شتاب بیشتری حرکت می‌کند پس با تندی بیشتری به زمین برخورد می‌کند و زمان حرکت آن نیز کمتر است.

پاسخ تمرین ۲-۲

هدف از طرح این تمرین آن است که بلافاصله دانش آموز 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.

تمرین ۲-۲

همانند شکل، جسمی به جرم $2/0\text{ kg}$ روی میز افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده بدست آورید.

نیروی عمودی تکیه‌گاه از طرف سطح به جسمی که روی آن قرار دارد وارد می‌شود، بنابراین واکنش این نیرو F_N به صورت عمودی و در خلاف جهت F_N از طرف جسم به سطح وارد می‌شود (شکل ۲-۲). همچنین واکنش نیروی وزن (W) نیروی است که از طرف جسم به زمین و در خلاف جهت W وارد می‌شود.

مثال ۲-۲

شخصی درون آسانسور ساکن، روی یک ترازوی فنی ایستاده است. در این حالت ترازو عدد 55 kg را نشان می‌دهد. (الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ (ب) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین $2/0\text{ m/s}^2$ دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (ج) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین $2/0\text{ m/s}^2$ دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (د) اگر ترازو 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 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 :

$$F_N - W = ma \Rightarrow F_N = W = mg$$

توجه داریم نیروی عمودی وارد بر خودش یعنی F_N که واکنش F_N را نشان می‌دهد. پس نویسیم اندازه F_N را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$F_N = \Delta m N \Rightarrow F_N = \Delta m N, F_N = W = mg \Rightarrow \Delta m N = m(g - a) \Rightarrow m = 55\text{ kg}$$

(ب)

$$F_N - W = ma \Rightarrow F_N = mg + ma = (55\text{ kg})(9/8\text{ N/kg}) + (55\text{ kg})(2/0\text{ N/kg})$$

$$F_N = 640\text{ N}$$

یعنی در این حالت، ترازو عددی بزرگ‌تر از اندازه وزن را نشان می‌دهد.

مثال ۲-۶ : 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.

پاسخ پرسش ۲-۶ :

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 ۲-۶ 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 $F_N - mg = 0 \Rightarrow F_N = mg$

پرسش ۲-۶

در مثال ۲-۶، در هر یک از حالت‌های زیر، عددی را که ترازوی فنی نشان می‌دهد با وزن شخص مقایسه کنید.

(الف) آسانسور به طرف پایین شروع به حرکت کند.

(ب) آسانسور به طرف پایین شروع به حرکت کند.

(ج) آسانسور در حالی که به طرف بالا حرکت می‌کند، متوقف شود.

(د) آسانسور در حالی که به طرف پایین حرکت می‌کند، متوقف شود.

نیروی اصطکاک : وقتی لایه‌ای می‌کنیم جسمی را روی سطحی به حرکت درآوریم، چه جسم حرکت کند و چه ساکن باشد، با غلظتی رو به روی می‌نویسیم که به آن نیروی اصطکاک گویند. اگر یک خودروی ساکن بر سطح افقی خیابان را هل دهیم، و نتوانیم آن را به حرکت درآوریم، در این حالت نیروی در خلاف جهت هل دادن شما بین لاستیک‌ها و سطح به وجود آمده است که با حرکت خودرو مخالفت می‌کند (شکل ۲-۳). این نیرو، نمونه‌ای از نیروی اصطکاک ایست است و آن را با F_f نشان می‌دهد. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننداش زیر کوره 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 می‌دهد.

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 زرد کفش و سطحی که روی آن حرکت می‌کنیم بستگی دارد. نیروی اصطکاک بین دو جسم به علت نامواری‌های محلی تماس دو جسم ایجاد می‌شود (شکل ۲-۴). حتی سطحی که بسیار هموار به نظر می‌آید، نامواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارد که سبب اصطکاک می‌شود.

نیروی اصطکاک عموماً به عنوان نیروی افقی شناخته می‌شود، با وجود این در زندگی روزمره لازم است، نگهداشتن یک قلم در دست، نوشتن، زدن، زدن و ... نیز کردن و ... بدون اصطکاک ممکن نیست. بدون اصطکاک حتی ایستادن ناممکن است، زیرا کتیرن چاه‌جایی سبب لغزیدن و افتادن می‌شود.

نیروی اصطکاک : بسیاری از دانش‌آموزان تصور می‌کنند وقتی جسمی ساکن روی یک سطح افقی قرار دارد (بدون آنکه هل داده شود یا کشیده شود) بین جسم و سطح اصطکاک وجود دارد. با بحث و گفت‌وگو می‌توان این کج فهمی را 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 جسمی روی جسم دیگر حرکت کند یا اینکه ساکن باشد اما تحت کشش یا رانش باشد، و نیروی اصطکاک به دو دسته نیروی اصطکاک ایستایی و جنبشی تقسیم‌بندی می‌شود (در این کتاب).

اندازه نیروی اصطکاک ایستایی را می‌توان از شرایط متوازن بودن نیروها به دست آورد. برای نیروی اصطکاک ایستایی رابطه مشخصی وجود ندارد اما نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه از رابطه ۲-۴ ($f_{s,max} = \mu_s F_N$) به دست می‌آید و نیروی اصطکاک جنبشی از رابطه ۲-۶ ($f_k = \mu_k F_N$) محاسبه می‌شود.

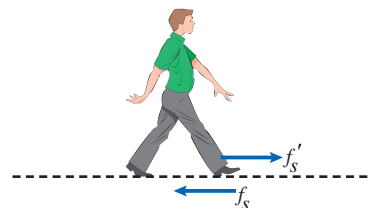
می‌توانیم از دانش‌آموزان بخواهیم، بگویند نیروی اصطکاک بین دو جسم به چه عواملی بستگی دارد؟ احتمالاً دانش‌آموزان به جنس دو جسم، زبری و نرمی آنها، رطوبت، دما و ... اشاره می‌کنند.

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 پی ببرند.

هدف از پرسش ۷-۲ درگیر کردن دانش‌آموزان به نقش مثبت اصطکاک در راه رفتن انسان، خودروها و ... است.

پاسخ پرسش ۷-۲

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 هل 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 اصطکاک که زمین به پا وارد می‌کند بسیار ناچیز است و راه رفتن به سختی ممکن خواهد بود و حتی ممکن است نتوانیم راه برویم.



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 مهمی هستند که می‌توان به آنها پرداخت.

فازیک ۳۰۲

پرسش ۷-۲

الف) بر اساس قانون سوم نیوتون و آنچه از اصطکاک آموختید، توضیح دهید راه رفتن با شروع از حالت سکون چگونه انجام می‌شود؟ (ب) چرا راه رفتن روی یک سطح شرمناک به سختی 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 فزای کاملاً صاف داشته باشند و نیروی هم‌گذاشته شوند، نمی‌توان به راحتی 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 قویاً 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 (معموداً 10^{-4} بار کوچک‌تر). با وجود این بسیاری از نقاط تماس با یکدیگر جوش می‌خورند. این جوش‌ها وقتی یک نیرو بخواهد دو سطح را روی هم بلغزاند، اصطکاک ایستایی ایجاد می‌کنند. اگر نیروی وارد شده برای کشیدن یک سطح روی دیگری به حد کافی بزرگ باشد، نخست جوش‌ها جدا می‌شوند (در لحظه شروع به حرکت) و پس از آن با شروع حرکت، جوش‌ها به‌طور پیوسته مجدداً تشکیل و سپس پاره می‌شوند.

در ادامه نیروی اصطکاک را در دو حالت بررسی می‌کنیم:

الف) اصطکاک ایستایی: جسمی مطابق شکل ۱۱-۲ روی یک سطح افقی ساکن است. به این جسم نیروی وزن (W) و نیروی عمودی سطح (F_N) در راستای قائم وارد می‌شود. در ابتدا نیروی افقی F_1 را به جسم وارد می‌کنیم به‌طوری که جسم ساکن بماند (شکل ۱۱-۲ الف). چون جسم ساکن است 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 اندازه نیروی F_1 را افزایش داده و به اندازه F_2 رسانده‌ایم (شکل ۱۱-۲ ب). اگر جسم همچنان ساکن بماند، با استدلالی شبیه قبل نتیجه می‌گیریم که نیروی اصطکاک ایستایی افزایش یافته و برابر اندازه F_2 شده است. بنابراین با افزایش نیروی افقی، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش این نیرو به جایی می‌رسیم که اگر اندازه آن برابر F_3 شود، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد (شکل ۱۱-۲ ب). به نیروی اصطکاک در این حالت نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه می‌گوییم.

شکل ۱۱-۲ ج با افزایش نیروی F_1 ، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینه می‌رسد.

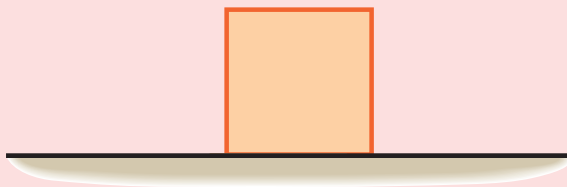
شکل ۱۱-۲ د با افزایش نیروی F_1 ، نیروی اصطکاک ایستایی به اندازه نیروی عمودی سطح (F_N) متناوب است.

۴۰

پرداختن به نیروی اصطکاک ایستایی به کمک شکل‌های ۱۱-۲ و ۱۲-۲، کمک زیادی به فهم نیروی اصطکاک می‌کند. تمرکز ابتدایی آموزش روی شکل ۱۱-۲ 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. ادامه مفهوم اصطکاک ایستایی را می‌توان با شکل‌های ۱۲-۲ توضیح داد. رسم همه نیروهای وارد بر جسم در شکل‌های ۱۱-۲ و ۱۲-۲ 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 6°N 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 12°N باشد، آیا قطعه در صورتی که نیروی افقی 10°N بر آن وارد شود حرکت می‌کند؟ در این حالت نیروی اصطکاک چقدر است؟ ت) اگر نیروی 15°N بر قطعه وارد شود، قطعه حرکت خواهد کرد؟



پاسخ: الف) $F_{\text{ا}} - f_{\text{ا}} = ma = 0, F_{\text{ا}} = 0 \rightarrow f_{\text{ا}} = 0$

ب) $F_{\text{ب}} - f_{\text{ب}} = ma = 0 \rightarrow f_{\text{ب}} = F_{\text{ب}} = 6^\circ\text{N}$

پ) خیر زیرا $F_{\text{پ}} < f_{\text{s,max}}$ است.

$F_{\text{پ}} - f_{\text{پ}} = ma = 0 \rightarrow f_{\text{پ}} = F_{\text{پ}} = 10^\circ\text{N}$

ت) بله زیرا $F_{\text{ت}} > f_{\text{s,max}}$ است.

توجه

- ۱ رابطه‌های ۲-۴ ($f_{s,\max} = \mu_s F_N$) و ۲-۵ ($f_k = \mu_k F_N$) معادله‌های برداری نیستند. جهت‌های \vec{f}_k و \vec{f}_s موازی سطح و در خلاف جهت نیروی 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 به صورت آزمایشگاهی تعیین شوند. مقدار آنها به ویژگی‌های معینی از جسم و سطح بستگی دارد؛ مثلاً مقدار μ_s میان تخم مرغ و تفلون ۰/۰۴ است ولی مقدار آن میان کفش‌های صخره‌نورد 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 معادله ۲-۵ ($f_s \leq \mu_s F_N$) علامت مساوی فقط وقتی به کار می‌رود که سطوح در آستانه‌رها شدن و سر خوردن هستند. در دام متداول استفاده از $f_s = \mu_s F_N$ در هر وضعیت ایستا قرار نگیریم.

فصل ۱۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

(۲-۴) (نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه)

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

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 رابطه ۲-۴ اندازه نیروی اصطکاک ایستایی را فقط در آستانه حرکت می‌دهد. در حالت کلی نیروی اصطکاک ایستایی کوچکتر و یا مساوی $f_{s,\max}$ است:

$$f_s \leq \mu_s F_N \quad (2-5)$$

تمرین ۲-۳

اگر در شکل ۱۲-۲، جرم جسم 4 kg و $F_1 = 40\text{ N}$ و بزرگی نیروها $F_2 = 40\text{ N}$ ، $F_3 = 40\text{ N}$ و $F_4 = 40\text{ N}$ باشد، الف) بزرگی نیروهای اصطکاک ایستایی در هر حالت چقدر است؟ ب) ضریب اصطکاک ایستایی را پیدا کنید.

آزمایش ۱۲-۳: اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ایستایی بین دو جسم
وسایل لازم: نیروسنج، قطعه چوبی به شکل مکعب مستطیل با وجوه یکنواخت، ترازو، خط کش
شرح آزمایش:
۱- مکعب چوبی را از طرف وجه بزرگ آن، روی سطح افقی میز قرار دهید.

۲- نیروسنج را مانند شکل به مکعب چوبی وصل کنید و سر دیگر نیروسنج را با دست بگیرید و به‌طور افقی بکشید.
۳- نیروی دستان را به‌آرامی افزایش دهید تا جایی که مکعب چوبی در آستانه لغزیدن قرار گیرد. در این حالت عددی را که نیروسنج نشان می‌دهد، در جدول یادداشت کنید (ارای اینکه دقت شما افزایش یابد لازم است آزمایش را چند بار تکرار کنید).
۴- اکنون مکعب چوبی را از طرف وجه کوچک‌تر روی سطح قرار دهید و مراحل ۲ و ۳ را تکرار کنید.
۵- با اندازه‌گیری جرم مکعب چوبی و استفاده از رابطه ۲-۴ مقدار μ_s را در هر آزمایش محاسبه و در جدول یادداشت کنید.

شماره آزمایش	مساحت سطح تماس قطعه با میز	وزن قطعه: عددی که نیروسنج نشان می‌دهد (نیروی)	μ_s

همراه با اعضای گروه خود، نتیجه‌های بدست آمده را تفسیر کنید.

پاسخ تمرین ۲-۴

(الف)

$$F_1 - f_s = ma = 0 \rightarrow f_s = F_1 = 40\text{ N}$$

$$F_2 - f_s = ma = 0 \rightarrow f_s = F_2 = 40\text{ N}$$

$$F_3 - f_{s,\max} = ma = 0 \rightarrow f_{s,\max} = F_3 = 40\text{ N}$$

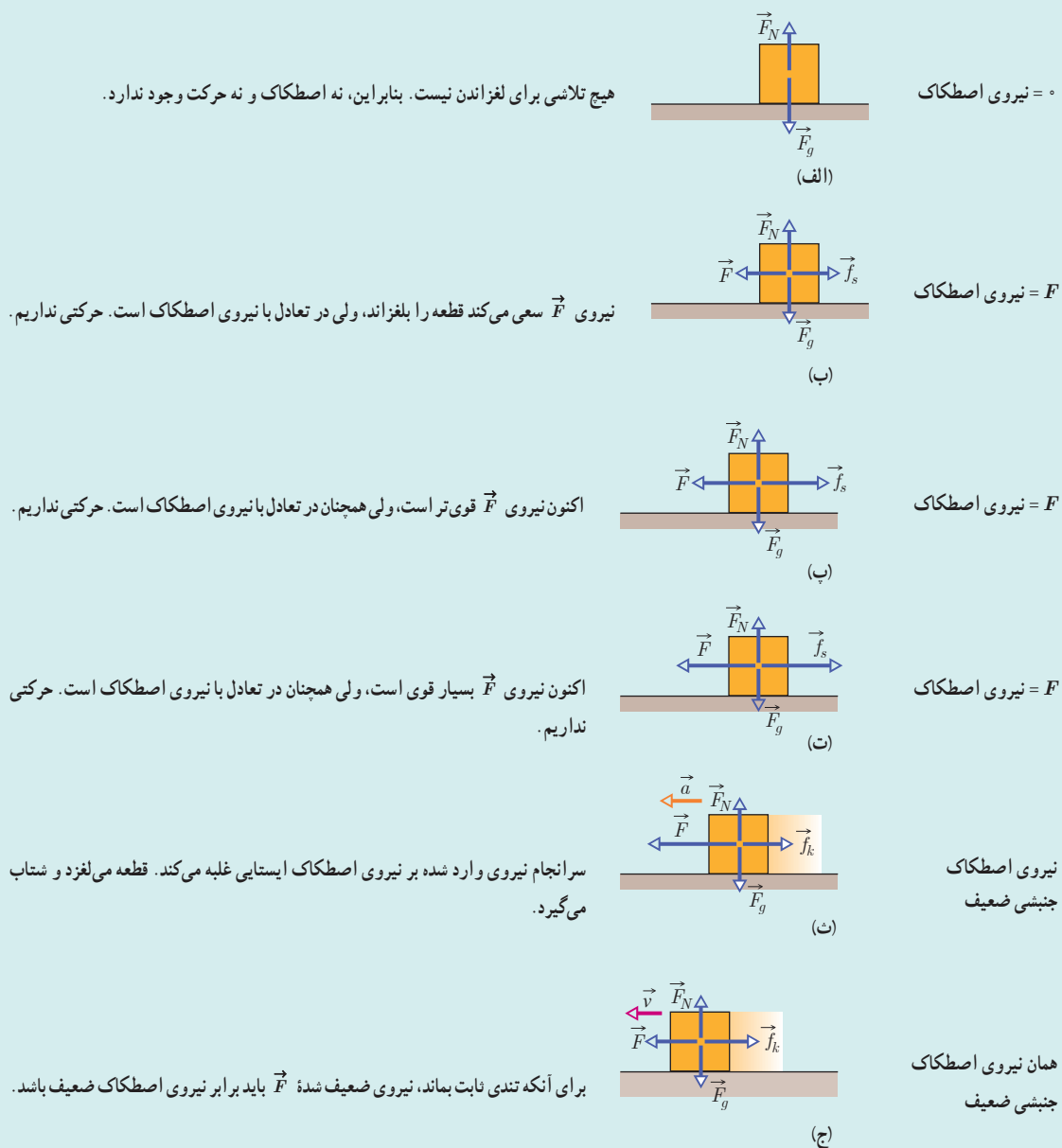
(ب)

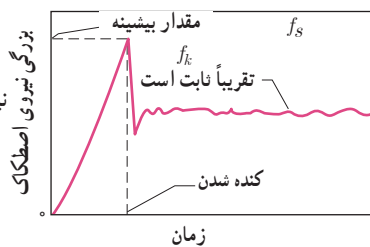
$$f_{s,\max} = \mu_s F_N \rightarrow \mu_s = \frac{f_{s,\max}}{F_N}, F_N = mg = (4\text{ kg})(9.8\text{ m/s}^2) = 39.2\text{ N} \rightarrow \mu_s = \frac{40\text{ N}}{39.2\text{ N}} = 1.02$$

در انجام این آزمایش (۱۲-۳) به یکنواخت بودن سطوح مکعب توجه شود. تکرار آزمایش و میانگین‌گیری توصیه می‌شود. در آزمون پایانی (نهایی) فیزیک ۳، یکی از سؤالات به «طراحی آزمایش» اختصاص می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود روی کلیه 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.





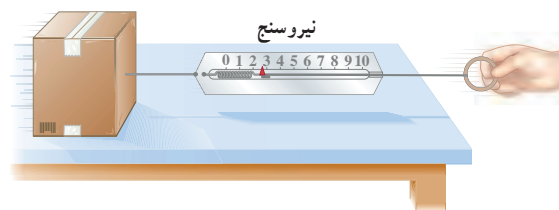
نیروی اصطکاک ایستایی فقط می‌تواند برابر نیروی رو به افزایش اعمالی باشد. یک مقدار دارد (مواز نه‌ای در کار نیست).

(ج)

شکل (الف) نیروی وارد بر یک قطعه 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 بیشینه 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 نتیجه تجربی برای حالت‌های (الف) تا (ج).

پاسخ فعالیت ۲-۲

به کمک نیروسنج و چند مکعب می‌توانیم این آزمایش را انجام دهیم.



ابتدا یک مکعب که وزن آن را اندازه‌گیری کردیم را با نیروسنج آن قدر می‌کشیم تا جسم در آستانه 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 به دست می‌آوریم و در جدول صفحه بعد قرار می‌دهیم.

فیزیک ۳

فعالیت ۲-۲

آزمایش طراحی کنید که نشان دهد f_s متناسب با F_N است.



بها 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 اندازه نیروی اصطکاک جنبشی متناسب با اندازه نیروی عمودی سطح است.

شکل ۱۳-۲۱: جریب‌های نیروی اصطکاک جنبشی

جدول ۱-۲: (نیروی اصطکاک جنبشی)

در این رابطه f_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 زری آنها و ... بستگی دارد. معمولاً ضریب اصطکاک جنبشی میان دو سطح، کمتر از ضریب اصطکاک ایستایی میان آن دو سطح است؛ یعنی $f_k < f_s$. جدول ۱-۲: تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

فعالیت ۳-۲

آزمایش 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 f_k را به دست آورید.
(ب) بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

مثال ۲-۲



شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبه ۷۵۰ کیلوگرمی با نیروی ۳۰۹۸ نیوتن سطح افقی است. نیروی 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؟ (گ) $(g = 9.8 \text{ N/kg})$

پاسخ: (الف) نیروهای وارد بر جعبه را رسم می‌کنیم. چون جسم در امتداد قائم شتاب ندارد از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برانده نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (750 \text{ kg})(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}}) = 7350 \text{ N}$$

۲۲

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.

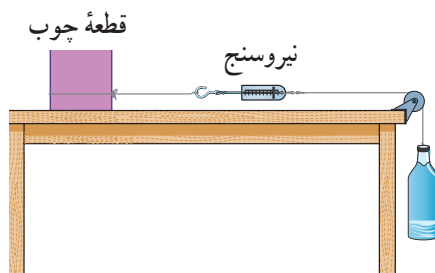
شمارهٔ آزمایش	وزن حجم (مکعب‌ها)	نیروی عمودی تکیه‌گاه	عددی که نیروسنج نشان می‌دهد ($f_{s,max}$)
۱			
۲			
۳			

توجه: به واژه «معمولاً» در ابتدای سطر ۱ 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 $\mu_k > \mu_s$ است.

پاسخ فعالیت ۳-۲

(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



تغییرات ۳۱



شکل ۳-۹: در جبهه‌های اسکی نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود.

نکات ۳-۲

آزمایشی طراحی کنید که نشان دهد، $f_{s,max}$ متناسب با F_N است.

بیا نیروی اصطکاک جنبشی: وقتی جسمی روی سطحی می‌لغزد از طرف سطح و 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.

$$f_k = \mu_k F_N \quad (\text{نیروی اصطکاک جنبشی}) \quad (3-2)$$

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 صاف 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 ۳-۲ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱

جنس دو سطح تماس	μ_s	μ_k
فولاد بر فولاد	۰/۵۷	۰/۴۴
فولاد بر آلومینیوم	۰/۴۷	۰/۳۶
فولاد بر مس	۰/۳۶	۰/۲۴
مس بر چدن	۰/۲۹	۰/۱۵
مس بر نئوپن	۰/۵۲	۰/۳۸
نئوپن و نئوپن	۰/۴۰	۰/۲۹
لاستیک بر بتن	۰/۷۵	۰/۳۰
لاستیک بر بتن خشک	۰/۸۰	۰/۶۰
فلز بر فلز	۰/۴	۰/۳

نکات ۳-۲

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 ۳-۲

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبهٔ ۷۵ کیلوگرمی با نیروی ۳۰۹ نیوتن 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 ۰/۴۰ باشد،



(الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر جعبه چقدر است؟

(ب) کتاف 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 ثابت نماند از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برآیند نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (75 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 735 \text{ N}$$

و می‌توانیم بنویسیم :



$$T - f_k = ma = 0 \rightarrow f_k = T = \text{آب محتوی بطری}$$

ب) جسم قسمت الف آزمایش را روی سطح‌های مختلف آن قرار داده و هر بار عددی که نیروسنج نشان می‌دهد (یا وزن آب) را اندازه‌گیری می‌کنیم. اگر ویژگی‌های سطح‌های مختلف جسم با هم یکسان باشد، عددی که به دست می‌آوریم تقریباً یکسان خواهند بود که نشان‌دهندهٔ مستقل بودن این نیرو از مساحت سطح تماس دو جسم است.

مثال ۷-۲

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.

فعالیت ۲-۲ آزمایش طراحی کنید که نشان دهد $f_{\text{کینتیک}}$ متناسب با F_N است.

بها 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.

$f_k = \mu_k F_N$ (نیروی اصطکاک جنبشی) (۴-۲)

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 ۱-۲ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲

جنس دو سطح تماس	μ_s	μ_k
فولاد بر فولاد	۰.۷۴	۰.۵۷
فولاد بر آلومینیوم	۰.۶۱	۰.۴۷
فولاد بر مس	۰.۵۴	۰.۴۶
مس بر چدن	۰.۵۱	۰.۴۹
مس بر نیشه	۰.۴۸	۰.۵۳
نیشه بر نیشه	۰.۹۲	۰.۴۰
لاستیک بر بتن تر	۰.۴۰	۰.۲۵
لاستیک بر بتن خشک	۰.۶۰	۰.۴۸
تفلون بر تفلون	۰.۰۴	۰.۰۴

فعالیت ۳-۲ آزمایش طراحی کنید که با آن بتوانید:

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر جسمی مانند یک قطعه چوب در حال لغزش روی سطح را اندازه‌گیری و با استفاده از آن μ_k را به دست آورید.

ب) بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

مثال ۷-۲

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبهٔ ۷۵۰ کیلوگرمی با نیروی ۳۰۹۸ نیوتن افقی است. نیروی 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؟ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)

پاسخ: الف) نیروهای وارد بر جعبه را رسم می‌کنیم. چون جسم در امتداد قائم شتاب ندارد از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برانته نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (750 \text{ kg})(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}}) = 7350 \text{ N}$$

فصل ۲: اصطکاک و حرکت دایره‌ای

با استفاده از رابطه ۲-۶ داریم:

$$f_s = \mu_s F_N \Rightarrow f_s = 0.7 \times 735 \text{ N} \Rightarrow f_s = 514.5 \text{ N}$$

بیا برآیند نیروهای افقی وارد بر جسم را با حاصل ضرب جرم در شتاب است:

$$F - f_s = ma \Rightarrow a = \frac{F - f_s}{m} \Rightarrow a = \frac{735 \text{ N} - 514.5 \text{ N}}{75 \text{ kg}} = 2.93 \text{ m/s}^2$$

تمرین ۵-۲

در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین ۰/۶۰۰ و جسم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای حرکت 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 ۲-۱۴). همچنین با تأثیر نیرو بر یک فنر آنرا شخم و می‌دانیم که اگر یک سر فنری را به نقطه‌ای محکم کنیم و سر دیگر آن را بکشیم، طول فنر افزایش می‌یابد. شکل ۲-۱۵: فنری را با طول عادی نشان می‌دهد که در آن، فنر به خنثی و نه کشیده شده است. اگر فنر را به اندازه x بکشیم یا فشرده کنیم (شکل ۲-۱۵ ب و پ)، فنر نیروی به طرف نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند. تجربه نشان می‌دهد هر چه فنر را بیشتر بکشیم یا فشرده کنیم (در محدوده‌ی معینی از تغییر طول فنر)، نیروی کشسانی فنر نیز بیشتر می‌شود.

برای بیشتر فنرها با تقریب قابل قبولی، نیروی کشسانی فنر با اندازه‌ی تغییر طول آن (د) رابطه مستقیم دارد:

$$F = kx \quad (\text{نیروی کشسانی فنر}) \quad (2-17)$$

ضریب k در رابطه ۲-۱۷، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است و به اندازه‌ی شکل و ساختار ماده‌ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد. در رابطه ۲-۱۷ نیرو بر حسب نیوتون (N) و x بر حسب متر (m) و k بر حسب نیوتون بر متر (N/m) است. معادله ۲-۱۷ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلیسی (۱۶۳۵-۱۷۰۳)، که این رابطه را کشف کرد، قانون هوک می‌نامند. برای یک فنر افقی (شکل ۲-۱۶): عددی کوچک (محدود ۱۰۰ N/m) و برای یک فنر سفت k عددی بزرگ (محدود ۱۰۰۰۰ N/m) است. نمودار نیروی کشسانی بر حسب تغییر طول برای سه فنر با k های متفاوت در شکل ۲-۱۸ رسم شده است.

نکات ۲-۲

تعدادی فنر متفاوت تهیه کنید. (الف) سختی آنها را مقایسه کنید. (ب) با طراحی یک آزمایش، ثابت هر فنر را بدست آورید.

(د. زومس) - در نگاه نیروی کشسانی فنر (F) در برابر تغییر طول (x) و صحن کشسانی است.

شکل ۲-۱۵: فنری که به نقطه تعادل است. فنر را به اندازه x بکشیم یا فشرده کنیم (شکل ۲-۱۵ ب و پ)، فنر نیروی به طرف نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند.

شکل ۲-۱۶: فنر افقی که به نقطه تعادل است. فنر را به اندازه x بکشیم یا فشرده کنیم (شکل ۲-۱۶ ب و پ)، فنر نیروی به طرف نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند.

شکل ۲-۱۸: نمودار تغییرات نیروی کشسانی (F) در برابر تغییر طول (x) برای سه فنر با k های متفاوت.

پاسخ تمرین ۵-۲

این تمرین کمک می‌کند تا مثال ۲-۷ 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 جعبه ساکن روی سطح افقی این است که $F \geq f_{s,max}$ باشد. بنابراین می‌توانیم حداقل نیروی لازم را به دست آوریم:

$$F_{\text{حداقل}} = f_{s,max} = \mu_s F_N, F_N = mg = 735 \text{ N}$$

$$F_{\text{حداقل}} = (0.7)(735 \text{ N}) = 514.5 \text{ N}$$

یعنی اگر به جسم که در ابتدا ساکن است نیرویی کمتر از ۵۱۴٫۵ نیوتون وارد کنیم شروع به حرکت نمی‌کند. اما پس از حرکت نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر آن ۲۹۴ نیوتون می‌شود و اگر $F = 294 \text{ N}$ باشد، حرکت آن با سرعت ثابت انجام می‌شود و اگر $F > 294 \text{ N}$ باشد، حرکت آن تندشونده و اگر $F < 294 \text{ N}$ باشد حرکت آن کند شونده خواهد بود.

تمرین پیشنهادی

جسمی روی سطح افقی همواری قرار دارد. الف) بزرگی نیروی اصطکاک وارد از سطح بر جسم چقدر است؟ ب) اگر اکنون نیروی افقی 6° N به جسم وارد شود، ولی جسم حرکت نکند، بزرگی نیروی اصطکاک وارد بر قطعه چند نیوتون است؟ پ) اگر مقدار بیشینه $f_{s,max}$ برابر ۱۲ نیوتون باشد، آیا قطعه در صورتی که نیروی افقی وارد بر آن ۱۱ نیوتون باشد، حرکت خواهد کرد؟ ت) اگر ۱۴ نیوتون باشد چطور؟ ث) بزرگی نیروی اصطکاک قسمت پ چقدر است؟

پاسخ: الف) صفر ب) $f_s = 6^\circ \text{ N}$ پ) (خیر) حرکت می‌کند ث) $f_s = 11 \text{ N}$

تمرین پیشنهادی

خودرویی با تبدی 10°m/s روی یک جاده افقی در حرکت است و راننده ترمز کرده و چرخ‌هایش قفل می‌شود. در هریک از حالت‌های زیر مسافت طی شده تا توقف را در مرحله ترمز به دست آورید. از مقاومت هوا و اثرهای دیگر صرف‌نظر می‌شود. (الف) جاده خشک بوده و ضریب اصطکاک جنبشی آن 6° است. (ب) جاده یخ‌بندان بوده و ضریب اصطکاک جنبشی آن 1° است.

پاسخ: (الف) $\Delta x \approx 8/3 \text{ m}$ (ب) $\Delta x \approx 50 \text{ m}$

در موضوع نیروی کشسانی فنر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

– کاربرد گسترده فنر در فناوری (ساعت، خودرو، ماشین‌های صنعتی و...)

– جهت نیروی کشسانی فنر در حالت کشیده یا فشرده

– در محدوده خاصی از کشش فنر $F \propto x$ است.

– در رابطه (۷-۲)، x اندازه تغییر طول فنر ($x = |\Delta L|$) است و F_e نیز اندازه نیروی کشسانی فنر است.

– اشاره به رابرت هوک

– مرتبه مقدار ثابت فنر برای فنرهای بزرگ و کوچک

– نشان داده شود که شیب نمودار F_e بر حسب x برابر k است ($\frac{F_e}{x} = k$)

پاسخ فعالیت ۲-۴

(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 وزنه یکسانی به انتهای آنها آویزان کنیم و تغییر طول فنرها را اندازه‌گیری نماییم. فزنی 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 خط کش طول فنر را قبل از اتصال و بعد از اتصال می‌خوانیم؛ در

$$\text{این صورت با رابطه: } mg = kx \rightarrow k = \frac{mg}{x}$$

k را تعیین می‌کنیم.



شکل ۱۸-۷: دیالکتیک و حرکت دایره‌ای

با استفاده از رابطه ۶-۲ داریم:

$$F_k = \mu_k F_N \Rightarrow f_k = 0.4 \times 735 \text{ N} \Rightarrow f_k = 294 \text{ N}$$

$$F - f_k = ma \Rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} = \frac{294 \text{ N} - 294 \text{ N}}{50 \text{ kg}} = 0 \text{ m/s}^2$$

تمرین ۵-۴

در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین 6° و جرم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای به حرکت درآوردن جعبه چقدر است؟



شکل ۱۸-۷: فنرهای به کار رفته در جرم‌های خودرو

جسم

(الف)

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

اینها

نیروی کشسانی فنر: همان‌طور که در فیزیک ۱ دیدیم فنرها اجزای مهمی در فناوری هستند و به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند (شکل ۱۸-۲). همچنین با تأثیر نیروی یک فنر آشنا شدیم و می‌دانیم که اگر یک سر فنر را به نقطه‌ای محکم کنیم و سر دیگر آن را بکشیم، طول فنر افزایش می‌یابد. شکل ۱۸-۳: فنری را با طول عادی نشان می‌دهد که در آن، فنر به فشرده و نه کشیده شده است. اگر فنر را به اندازه x بکشیم یا فشرده کنیم (شکل ۱۸-۴) و فنر نیروی به طرف نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند. تجربه نشان می‌دهد هر چه فنر را بیشتر بکشیم یا فشرده کنیم (در محدوده مدعی از تغییر طول فنر)، نیروی کشسانی فنر نیز بیشتر می‌شود.

برای بیشتر فنرها با تقریب قابل قبول، نیروی کشسانی فنر با اندازه تغییر طول آن (د) رابطه مستقیم دارد:

$$F = kx \quad (\text{نیروی کشسانی فنر})$$

ضرب k در رابطه ۷-۲، 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 رابطه ۷-۲، نیرو بر حسب نیوتون (N)، x بر حسب متر (m) و k بر حسب نیوتون بر متر (N/m) است. معادله ۷-۲ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلیسی (۱۶۳۵-۱۷۰۳)، که این رابطه را کشف کرد، قانون هوک می‌نامند. برای یک فنر اختلاف‌پذیر، k عددی کوچک (حدود 100 N/m) و برای یک فنر سخت، k عددی بزرگ (حدود 10000 N/m) است. نمودار نیروی کشسانی بر حسب تغییر طول برای سه فنر با k های متفاوت در شکل ۱۸-۴ رسم شده است.

نشان ۲-۲

تعدادی فنر متفاوت تهیه کنید. (الف) سختی آنها را مقایسه کنید. (ب) با طراحی یک آزمایش، ثابت هر فنر را به دست آورید.

۱- رومس، در تمام نیروی کشسانی فنر (F) سوزا k ثابت و مدعی کشسانی است.

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

نمودار تغییرات نیروی کشسانی فنر

مثال ۸-۲

می‌تواند تمرین مناسبی برای نیروی کشسانی باشد حتی این مثال به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا بتوانند قسمت ب فعالیت ۲-۴ صفحه 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 حاشیه این صفحه بسیار مهم است، زیرا اولاً مراحل را که دانش‌آموز در حل مسئله‌های دینامیک باید طی کند تا آن مسئله را حل کند آورده شده است. ثانیاً محدوده بحث و محاسبات برداری را تعیین می‌کند. تأکیدات اصلی عبارت‌اند از: ۱- نیروها فقط در راستای افقی و قائم هستند و نیازی به تجزیه نیروها نیست. ۲- فقط به بررسی مسئله‌های تک جسمی می‌پردازیم.

در موضوع نیروی کشش طناب (کابل، ریسمان و...) می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

– نیروی کشش طناب در راستای طناب و از جسم به طرف بیرون است.

– از جرم طناب صرف نظر می‌شود.

– از کش آمدن آن صرف نظر می‌شود.

– در شکل ۷-۲ طناب جسم و دست را با نیروی کشش T می‌کشد، حتی اگر جسم و طناب و دست دارای حرکت شتاب‌دار باشند.

مثال ۹-۲

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 گنج‌فهمی‌های مربوط به درس نیروی اصطکاک و کشش طناب را مشخص می‌کند. در بند پار تباط بین دینامیک و حرکت‌شناسی به وضوح دیده می‌شود.

فیزیک ۳

مثال ۸-۲

فتری به طول $L = 1 \text{ m}$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنه 200 گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L = 1.2 \text{ m}$ می‌رسد.

الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟

ب) اگر وزنه‌ای 300 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.

$$\begin{aligned} F_s - W &= ma \Rightarrow F_s - W = 0 \quad \text{و} \quad F_s = kx \Rightarrow kx = mg \\ k(1.2 - 1) &= 2 \times 10^{-3} \text{ kg} (9.8 \text{ N/kg}) \\ k &= 9.8 \text{ N/m} \\ kx &= mg \Rightarrow (9.8 \text{ N/m})x = (3 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) \Rightarrow \\ x &= 3 \times 10^{-3} \text{ m} = 3 \text{ mm} \\ x &= L - L_0 \Rightarrow 3 \text{ mm} = L - 1 \text{ m} \Rightarrow L = 1.003 \text{ m} \Rightarrow L = 1003 \text{ mm} \end{aligned}$$

ب)

نیروی کشش طناب: وقتی طناب (کابل، ریسمان و...) متصل به جسمی را مانند شکل ۷-۲ می‌کنیم، طناب جسم را با نیروی 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 T نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل می‌بینید طناب دست را نیز با نیروی T می‌کشد. بزرگی نیروی کشش طناب برابر با بزرگی نیروی T وارد بر جسم است. مثلاً اگر وزنی نیروی وارد بر جسم از طرف طناب 60 N باشد، کشش طناب نیز 60 N است. $(T = 60 \text{ N})$. در این کتاب از جرم طناب و همچنین از کش آمدن آن صرف نظر می‌شود. بنابراین طناب فقط به عنوان رابط بین دو جسم عمل می‌کند و هر دو جسم (دست و جسم) را با بزرگی نیروی یکسان T می‌کشد، حتی اگر این دو جسم و طناب شتاب‌دار باشند.



شکل ۷-۲: طناب جسم را با نیروی کشش T می‌کشد.

مثال ۹-۲

در شکل رویه‌رو، کارگری جعبه‌ای ساکن را با طنابی افقی با نیروی ثابت افقی 210 N می‌کشد. اگر جرم جعبه 100 kg و ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی بین جعبه و سطح به ترتیب 0.300 و 0.250 باشد، الف) آیا جعبه شروع به حرکت می‌کند؟



فیزیک ۳

مثال ۹-۲

فتری به طول $L = 1 \text{ m}$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنه 200 گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L = 1.2 \text{ m}$ می‌رسد.

الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟

ب) اگر وزنه‌ای 300 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.

$$\begin{aligned} F_s - W &= ma \Rightarrow F_s - W = 0 \quad \text{و} \quad F_s = kx \Rightarrow kx = mg \\ k(1.2 - 1) &= 2 \times 10^{-3} \text{ kg} (9.8 \text{ N/kg}) \\ k &= 9.8 \text{ N/m} \\ kx &= mg \Rightarrow (9.8 \text{ N/m})x = (3 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) \Rightarrow \\ x &= 3 \times 10^{-3} \text{ m} = 3 \text{ mm} \\ x &= L - L_0 \Rightarrow 3 \text{ mm} = L - 1 \text{ m} \Rightarrow L = 1.003 \text{ m} \Rightarrow L = 1003 \text{ mm} \end{aligned}$$

ب)

نیروی کشش طناب: وقتی طناب (کابل، ریسمان و...) متصل به جسمی را مانند شکل ۷-۲ می‌کنیم، طناب جسم را با نیروی 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 T نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل می‌بینید طناب دست را نیز با نیروی T می‌کشد. بزرگی نیروی کشش طناب برابر با بزرگی نیروی T وارد بر جسم است. مثلاً اگر وزنی نیروی وارد بر جسم از طرف طناب 60 N باشد، کشش طناب نیز 60 N است. $(T = 60 \text{ N})$. در این کتاب از جرم طناب و همچنین از کش آمدن آن صرف نظر می‌شود. بنابراین طناب فقط به عنوان رابط بین دو جسم عمل می‌کند و هر دو جسم (دست و جسم) را با بزرگی نیروی یکسان T می‌کشد، حتی اگر این دو جسم و طناب شتاب‌دار باشند.



شکل ۷-۲: طناب جسم را با نیروی کشش T می‌کشد.

مثال ۹-۲

در شکل رویه‌رو، کارگری جعبه‌ای ساکن را با طنابی افقی با نیروی ثابت افقی 210 N می‌کشد. اگر جرم جعبه 100 kg و ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی بین جعبه و سطح به ترتیب 0.300 و 0.250 باشد، الف) آیا جعبه شروع به حرکت می‌کند؟



فیزیک ۳

فصل ۱۸: دینامیک و حرکت کاربردی

ب) اگر جعبه حرکت کند، شتاب حرکت آن را حساب کنید.
 (ب) سرعت جعبه را $9/8 \text{ m/s}$ پس از حرکت بدست آورید. $(g = 9/8 \text{ m/s}^2)$
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:
 $F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (10 \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg}) = 98 \text{ N}$
 برای اینکه جسم شروع به حرکت کند، باید $T > f_{s, \max}$ باشد. پس ابتدا $f_{s, \max}$ را از معادله 2.2 بدست می‌آوریم:
 $f_{s, \max} = \mu_s F_N = (0.30)(98 \text{ N}) = 29.4 \text{ N}$
 با توجه به اینکه $T = 31 \text{ N} > 29.4 \text{ N}$ است، جعبه شروع به حرکت می‌کند.
 (ب) نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت بر جعبه اثر می‌کند و برابر است با:
 $f_k = \mu_k F_N = (0.25)(98 \text{ N}) = 24.5 \text{ N}$
 $T - f_k = ma \Rightarrow 31 \text{ N} - 24.5 \text{ N} = (10 \text{ kg})a \Rightarrow a = 0.65 \text{ m/s}^2$
 (ب) چون شتاب جعبه ثابت است، از رابطه سرعت - زمان در حرکت با شتاب ثابت روی مسیر مستقیم استفاده می‌کنیم:
 $v = at + v_0 \Rightarrow v = (0.65 \text{ m/s}^2)(9/8 \text{ s}) + (0 \text{ m/s}) \Rightarrow v = 2.9 \text{ m/s}$
 سرعت نیز در جهت محور x است.

تمرین ۶-۲

کارگری یک سطل محتوی مصالح به جرم 16 kg را با طناب سبکی به طرف بالا می‌کشد. اگر شتاب رو به بالای سطل $1/7 \text{ m/s}^2$ باشد، نیروی کشش طناب چقدر است؟

مثال ۱-۲
 در شکل رویه‌برداری به جرم 200 kg به دیوار قائم بدون اصطکاک تکیه داده شده است. ضربه اصطکاک ایستایی بین زمین و دیوار 240 N است. در آنسایه شریخوردن دیوار، (الف) زمین به دیوار چه نیروی وارد می‌کند؟
 (ب) چه نیروی از دیوار به زمین وارد می‌شود؟
پاسخ: (الف) نخست نیروهای وارد بر دیوار را رسم می‌کنیم که عبارت‌اند از:
 نیروی عمودی سطح دیوار (F_N)، نیروی وزن (W)، نیروی عمودی سطح زمین (F_{Nz}) و نیروی اصطکاک ایستایی بین زمین و دیوار ($f_{s, \max}$).

۲۵

پاسخ تمرین ۶-۲

بر سطل دو نیروی کشش طناب (رو به بالا) و وزن (رو به پایین وارد می‌شود). اگر محور مختصات را رو به بالا انتخاب کنیم، می‌توانیم بنویسیم:

$$T - mg = ma \rightarrow T = mg + ma = m(g + a) = 16/0 \text{ kg}$$

$$(9/8 \text{ m/s}^2 + 1/7 \text{ m/s}^2) = 176 \text{ N} \approx 1/8 \times 10^3 \text{ N}$$

مثال ۲-۱: 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 به گونه‌ای 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؟

۳-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون

شاید مقدمه زیر کمک کند تا دانش‌آموزان بیشتر ترغیب شوند به بحث تکانه توجه کنند. تجربه نشان می‌دهد که متوقف کردن هر چیزی که تکانه زیادی داشته باشد، دشوار است. به لحاظ فیزیکی هرچه تکانه جسم بیشتر باشد، برای متوقف کردن آن در زمان معین باید نیروی بیشتری به آن وارد کرد. یک نهنگ که به آرامی حرکت می‌کند، تکانه زیادی دارد و همچنین گلوله کوچکی که از دهانه 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 v_1 حرکت می‌کند آغاز می‌شود و قانون دوم را برای این جسم می‌نویسد و از دل رابطه قانون دوم تکانه را تعریف می‌کند.

یک دستگاه مختصات انتخاب می‌کنیم. بتارین نیروی حاصل در راستای قائم و افقی صفر است.
 $F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (200 \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg}) = 196 \text{ N}$
 $f_{s, \max} = \mu_s F_N = (0.24)(196 \text{ N}) = 47 \text{ N} \Rightarrow F_{Nz} = 90/2 \text{ N}$
 از طرف زمین بر دیوار دو نیروی عمودی F_{Nz} و افقی $f_{s, \max}$ وارد می‌شود. بنابراین برآیند این دو نیرو که آن را \vec{R} نشان می‌دهیم، نیرویی است که زمین بر دیوار وارد می‌کند:
 $\vec{R} = \vec{F}_{Nz} + \vec{f}_{s, \max}$
 که بزرگی آن برابر است با:
 $R = \sqrt{F_{Nz}^2 + f_{s, \max}^2} = \sqrt{(90/2 \text{ N})^2 + (47 \text{ N})^2} = 216 \text{ N}$
 (ب) برآیند نیروهای افقی وارد بر دیوار صفر است، پس:
 $F_N - f_{s, \max} = 0 \Rightarrow F_N = f_{s, \max} = 90/2 \text{ N}$
 در نبود نیروی اصطکاک بین دیوار و دیوار، نیروی F_{Nz} همان نیروی وارد از دیوار به دیوار است.

۳-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون

قانون‌های نیوتون به ما امکان حل بسیاری از مسائل مکانیک را می‌دهند. قانون دوم نیوتون را می‌توان به صورت 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 بازه زمانی Δt از v_1 به v_2 برسد. در این صورت قانون دوم نیوتون به صورت زیر درمی‌آید:

$\vec{F}_{\text{net}} = m \vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$
 فرض کنید سرعت جسم m می‌توانیم جرم را در کنار سرعت (v) قرار دهیم.
 حاصل ضرب جرم جسم m در سرعت آن (v) ، تکانه جسم نامیده می‌شود و آن را با \vec{p} نشان می‌دهیم.

پاسخ تمرین ۷-۲

هدف از این تمرین پیدا کردن رابطه بین انرژی جنبشی و اندازه 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، تکانه جسم را در دو لحظه نشان داده در شکل ۱۸-۲ رسم کنند. در رسم تکانه‌ها به جهت و اندازه بردار تکانه توجه کنند.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (\text{تکانه جسم}) \quad (8-2)$$

تکانه کمیتی برداری است زیرا سرعت، یک کمیت برداری و جرم، یک کمیت نرده‌ای است. جهت تکانه همان جهت سرعت است. یکای تکانه SI $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ است. با توجه به تعریف تکانه، قانون دوم نیوتون برای نیروی ثابت را می‌توان چنین نوشت:

$$\vec{F}_{\text{net}} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (\text{قانون دوم نیوتون برحسب تکانه برای نیروی ثابت}) \quad (9-2)$$

یعنی نیروی خالص وارد بر جسم برابر با تغییر تکانه جسم تقسیم بر زمان تغییر آن است. همچنین از این رابطه نتیجه می‌گیریم که تغییر تکانه برابر با حاصل ضرب نیرو در مدت زمان تأثیر آن است.

$$\Delta \vec{p} = \vec{F}_{\text{net}} \Delta t \quad (10-2)$$

تمرین ۷-۲

نشان دهید بین اندازه تکانه (p) و انرژی جنبشی (K) جسمی به جرم m ، رابطه $K = \frac{p^2}{2m}$ برقرار است.

مثال ۱۱-۲

گلوله‌ای به جرم $1/10 \text{ kg}$ با سرعت $\vec{v} = (5/\text{m/s})\hat{i}$ در حال حرکت است. الف) تکانه گلوله را تعیین کنید. ب) انرژی جنبشی گلوله را بدست آورید.

پاسخ: الف) با استفاده از معادله ۸-۲، تکانه جسم را بدست می‌آوریم:

$$\vec{p} = m\vec{v} = (1/10 \times 10^{-3} \text{ kg})(5/\text{m/s})\hat{i} \\ = (5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m/s})\hat{i} \Rightarrow P = 5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

ب) برای بدست آوردن انرژی جنبشی می‌توانیم از رابطه $K = \frac{p^2}{2m}$ یا $K = \frac{1}{2}mv^2$ استفاده کنیم. در اینجا از رابطه اول استفاده می‌کنیم:

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{(5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m/s})^2}{2 \times 10^{-3} \text{ kg}} = 0.125 \text{ J}$$

در شرایط واقعی نیروی وارد بر یک جسم به‌نحویت ثابت نیست. اگر نیرو ثابت نباشد، معادله‌های داده شده را فقط برای بازه‌های زمانی ای می‌توان به کار برد که بسیار کوچک باشد و بتوان نیرو را در این بازه‌ها تقریباً ثابت در نظر گرفت. برای بازه زمانی بزرگ به جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصله زمانی مورد نظر را به کار برد و بنابراین رابطه (۹-۲) چنین می‌شود:

$$\vec{F}_{\text{av}} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (\text{نیروی خالص متوسط برحسب تکانه}) \quad (11-2)$$

این نتیجه به کاربردهای جالبی در توجیه و بررسی پدیده‌های فیزیکی می‌انجامد.

پرسش‌های پیشنهادی

دو جسم به جرم‌های m_1 و m_2 ($m_1 < m_2$) دارای انرژی جنبشی برابر هستند. اندازه 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:

$$m_2 > m_1 \rightarrow \frac{p_2^2}{p_1^2} > 1 \rightarrow p_2 > p_1$$

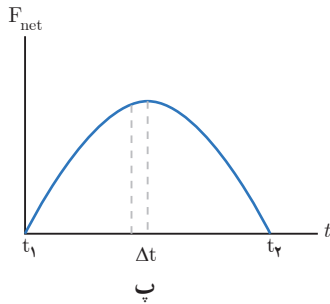
توجه

اعتبار رابطه $K = \frac{p^2}{2m}$ برای اجسامی که با اندازه تندی‌های بسیار کمتر از تندی نور حرکت می‌کنند معتبر است. (البته در این کتاب مسئله‌ای داده نمی‌شود که این رابطه اعتبار نداشته باشد).

مثال ۱۱-۲

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 ۱۱-۲، 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} به صورت شکل زیر تغییر کند. در این صورت معادله ۱-۲ فقط برای بازه‌های زمانی بسیار بسیار کوچک قابل استفاده است و $F_{net}\Delta t$ برابر با مساحت سطح زیر نمودار در بازه زمانی نشان داده شده است. یعنی تغییر تکانه را در این حالت می‌توان از مساحت سطح زیر نمودار نیروی خالص - زمان به دست آورد. یعنی: $|\Delta \vec{p}| = \text{مساحت زیر نمودار}$



در این گونه موارد برای بازه زمانی بزرگ t_1 تا t_2 ، به جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصله زمانی مورد نظر را به کار برد. این نیروی خالص به گونه‌ای تعیین می‌شود که مساحت زیر آن برابر با مساحت سطح زیر نمودار نیروی خالص بر حسب زمان باشد.

نظر دانش‌آموزان را به سطح زیر نمودار $F_{av} - t$ و $F - t$ 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.

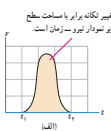
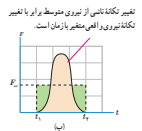
توجه داریم در رابطه ۱۱-۲، اگر \vec{F}_{av} برابر صفر باشد، یعنی تغییر تکانه جسم در بازه زمانی Δt صفر باشد، تکانه جسم در t_1 با تکانه جسم در t_2 برابر است ($\vec{p}_1 = \vec{p}_2$) همچنین در رابطه ۱-۲، اگر \vec{F}_{net} صفر باشد، $\Delta \vec{p}$ صفر می‌شود و این بدان معناست که در بازه زمانی Δt ، تکانه ثابت بوده و تغییر نمی‌کند. (اصطلاحاً تکانه پایسته می‌ماند)

مثال ۱۲-۲

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 تکانه یک جسم (یعنی $\Delta \vec{p} = \vec{F}_{net} \Delta t$) را می‌توان از سطح زیر نمودار نیرو - زمان نیز به دست آورد (شکل ۱۹-۳).



شکل ۱۹-۳ الف) تغییر تکانه برای یک جسم می‌تواند بر حسب زمان تغییر کند. ب) مقدار نیروی متوسط (خط چین افقی) به گونه‌ای است که مساحت مستطیل $F_{av} - t$ برابر با مساحت سطح زیر منحنی $F - t$ باشد.



شکل ۱۹-۴: شکل روبرو صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم 1200 kg به دیواری برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب 50 km/h و 40 km/h باشد و تصادف 0.15 s طول بکشد، (الف) تغییر تکانه 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 رابطه ۱-۲ به دست می‌آوریم.

$$v_1 = +50 \text{ km/h} = +13.9 \text{ m/s} \quad v_2 = -40 \text{ km/h} = -11.1 \text{ m/s}$$

$$p_1 = mv_1 = (1200 \text{ kg})(+13.9 \text{ m/s}) = +1.67 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

$$p_2 = mv_2 = (1200 \text{ kg})(-11.1 \text{ m/s}) = -1.33 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

$$\Delta p = (-1.33 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}) - (+1.67 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}) = -3.0 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

(ب) نیروی متوسط وارد بر اتومبیل با استفاده از رابطه ۱-۲ برای است با:

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-3.0 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}}{0.15 \text{ s}} = -2.0 \times 10^5 \text{ N}$$

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 به دست آوردیم.

۴-۲ حرکت دایره‌ای یکنواخت

تاکنون درباره 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 ۲۰-۱).

تمرین پیشنهادی

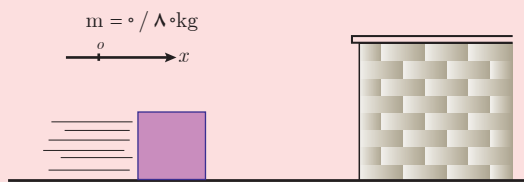
در شکل زیر جسمی با تندی 5 m/s به دیوار برخورد کرده و با تندی 2 m/s برمی‌گردد. اگر زمان برخورد 0.2 s باشد؛

الف) تغییر تکانه جسم را پیدا کنید.

ب) اندازه و جهت نیروی متوسط وارد بر جسم را تعیین کنید.

پاسخ: الف) $\Delta \vec{p} = -(5/6\text{ kg m/s}) \vec{i}$

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 لایه‌دار می‌پوشند. چگونه این دستکش‌ها مانع آسیب دیدن مغز آنها می‌شوند؟ همچنین، چرا مشت‌زن‌ها معمولاً با ضربه مشت می‌چرخند؟

توضیح: مغز در ضربه گیر داخل جمجمه غوطه‌ور است. اگر مشت برهنه ناگهان به مغز برخورد، جمجمه به سرعت شتاب می‌گیرد. این نیروی بزرگ ناگهانی (F_{av} بزرگ و Δt کوچک) می‌تواند باعث آسیب جدی به مغز شود. دستکش‌های لایه‌دار زمان اعمال نیرو به سر (Δt) را زیاد می‌کنند. برای ضربه معین $F_{av}\Delta t$ ، دستکش بازه زمانی طولانی‌تر از مشت برهنه را به وجود 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 ضربه مشت» به کار برد. اگر هنگام برخورد مشت، سر ثابت بماند، بازه زمانی اعمال نیرو نسبتاً کوتاه و نیروی متوسط بزرگ می‌شود. اگر سر در جهت ضربه مشت حرکت کند، بازه زمانی طولانی می‌شود و نیروی متوسط کاهش می‌یابد.

تمرین پیشنهادی

به یک توپ گلف به جرم $10^{-2} \text{ kg} \times 5/^\circ$ ، با چوگان ضربه زده می‌شود. نیروی وارد بر توپ از صفر در هنگام تماس تا مقدار بیشینه (هنگام تغییر شکل بیشینه توپ) تغییر می‌کند و سپس، مطابق نمودار نیرو بر حسب زمان در شکل ۲-۱۹، هنگام جدا شدن چوگان از توپ به صفر برمی‌گردد. فرض کنید توپ با سرعت 44 m/s چوگان را ترک کند. (الف) اندازه تغییر تکانه ناشی از برخورد را به دست آورید. (ب) مدت برخورد و نیروی متوسط وارد بر توپ را برآورد کنید.

پاسخ: الف) $\Delta p = +2/2 \text{ kgm/s}$

ب) مسافتی که توپ جمع می‌شود را حدود $2/^\circ \text{ cm}$ فرض می‌کنیم و با استفاده از رابطه $\Delta t = \frac{\Delta x}{v_{av}}$ زمان را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta t = \frac{2/^\circ \times 10^{-2} \text{ m}}{22 \text{ m/s}} = 9/1 \times 10^{-4} \text{ s}$$

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{+2/2 \text{ kgm/s}}{9/1 \times 10^{-4} \text{ s}} = +2/4 \times 10^3 \text{ N}$$

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 جراحات پوست، رگ‌های خونی، و اعضای داخلی است. در اینجا، به مقایسه آستانه‌های غیر دقیق آسیب‌دیدگی انسان با نمونه نیروها و شتاب‌هایی می‌پردازیم که معمولاً در تصادف خودرو با آنها مواجه می‌شویم.

فشار نیروی 90 kN (20000 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 150 g به مدت 4 ms یا 50 g برای 60 ms در 5% موارد کشنده است. این جراحات‌های ناشی از شتاب‌گیری سریع اغلب باعث آسیب دیدن اعصاب نخاع در جایی می‌شود که اعصاب وارد پایه مغز می‌شوند. آستانه آسیب‌دیدگی پوست، رگ‌های خونی، و اعضای داخلی را می‌توان از داده‌های مربوط به برخورد با تمام بدن به دست آورد که در آن نیرو به صورت یکنواخت در سطح جلویی به مساحت 7 m^2 تا 9 m^2 توزیع شده باشد. این داده‌ها نشان می‌دهند اگر برخورد کمتر از حدود 70 ms طول بکشد، شخص در صورتی زنده می‌ماند که فشار برخورد (نیرو به ازای واحد سطح) تمام بدن کمتر از $10^5 \text{ N/m}^2 \times 1/9$ (28 lb/in^2) باشد. فشار ضربه $10^5 \text{ N/m}^2 \times 3/4$ (50 lb/in^2) به تمام بدن در 50% 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 کمرندهای

ایمنی، کیسه‌های هوا، و تودوزی‌های لایه‌دار می‌توانند احتمال مرگ یا جراحات جدی در برخورد را کم کنند. برخوردی شامل یک مسافر ۷۵kg بدون کمربند ایمنی را در نظر بگیرید، که هنگام جراحات با سرعت ۲۷m/s (۹۷km/h) پس از برخورد با داشبورد بدون لایه ظرف ۰/۰۱s متوقف می‌شود. با استفاده $F_{av}\Delta t = mv_f - mv_i$ ، درمی‌یابیم که:

$$F_{av} = \frac{mv_f - mv_i}{\Delta t} = \frac{0 - (75 \text{ kg})(27 \text{ m/s})}{0.01 \text{ s}} = -2.0 \times 10^5 \text{ N}$$

و شتاب برابر است با:

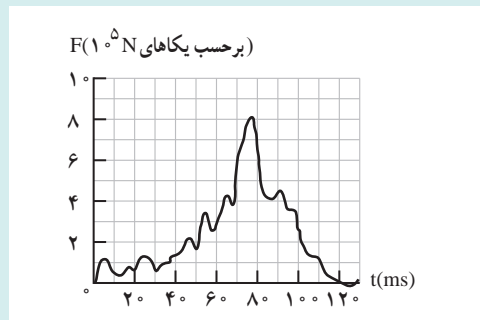
$$a = \left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = \frac{27 \text{ m/s}}{0.01 \text{ s}} = 2700 \text{ m/s}^2 = \frac{2700 \text{ m/s}^2}{9.8 \text{ m/s}^2} g = 280 g$$

اگر فرض کنیم سر و سینه مسافر با مجموع مساحت 0.5 m^2 با داشبورد و شیشه جلوی خودرو برخورد کند، و در معرض نیرو قرار گیرد، فشار وارد بر تمام بدن او برابر می‌شود با:

$$\frac{F_{av}}{A} = \frac{2.0 \times 10^5 \text{ N}}{0.5 \text{ m}^2} \approx 4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

مشاهده می‌کنیم که نیرو، شتاب، و فشار تمام بدن همه فراتر از آستانه کشنده بودن یا شکستگی استخوان‌ها هستند و این برخورد بدون حفاظ در ۹۷km/h بی‌شک کشنده 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 مرتبه 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 0.5 m^2 پخش می‌کنند، و مانع از زخم‌های عمیق یا شکستگی می‌شوند. کیسه‌های هوا باید به سرعت وارد کار شوند (در

کمتر از 10 ms تا شخصی را که با سرعت 27 m/s در حرکت است پیش از متوقف شدن در برابر میل فرمان در فاصله حدود 3 m متوقف کنند. برای این آماده‌سازی سریع، شتاب‌سنج‌ها، سیگنالی را به منظور تخلیه یک ردیف خازن می‌فرستند، که با اشتعال یک ماده منفجره، کیسه هوا را به سرعت پراز گاز می‌کند. بار الکتریکی لازم برای اشتعال در خازن‌ها ذخیره می‌شود تا اطمینان پیدا کنیم که کیسه 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 استفاده هم‌زمان از کمربندهای ایمنی و کیسه‌های هوا به صورت زیر خلاصه می‌شود: اگر یک شخص 75 kg را که با سرعت 27 m/s در حرکت است، کمربند ایمنی در 15 s متوقف کند، شخص در معرض نیروی متوسط $9/8\text{ kN}$ ، شتاب متوسط 18 g ، و فشار تمام بدن 4 N/m^2 برای $2/8 \times 10^4$ برای سطح تماس 5 m^2 قرار می‌گیرد. این مقدار حدود یک مرتبه بزرگی کمتر از آنهایی هستند که قبلاً برای شخص محافظت نشده حساب کردیم و بسیار پایین‌تر از آستانه جراحتهایی خواهند بود که زندگی را تهدید می‌کنند.

۲-۴ حرکت دایره‌ای یکنواخت

حرکت چرخشی بخش مهمی از زندگی روزمره است. دوران زمین به دور خودش شب و روز را به وجود 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 ۳۴

تغییر تکانه یک جسم (یعنی $\Delta p = F_{\text{متوسط}} \Delta t$) را می‌توان از سطح زیر نمودار نیرو-زمان نیز به دست آورد (شکل ۱۲-۲).

تغییر تکانه برای یک جسم با سرعت متوسط برابر با تغییر تکانه نیروی اهرمی معادل زمان است.

شکل ۱۲-۲: ابعاد نیروی خالص وارده بر یک جسم می‌تواند موجب تغییر در آن مقدار نیروی متوسط (از $F_{\text{متوسط}}$) اهرمی به گونه‌ای است که مساحت مستطیل $F_{\text{متوسط}} \Delta t$ برابر با مساحت سطح زیر منحنی شکل الف باشد.

شکل ۱۲-۲: شکل رویارو صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم 1200 kg به دیواری برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب 54 km/h و 40 km/h باشند و تصادف 0.15 s طول بکشد، (الف) تغییر تکانه خودرو را پیدا کنید. (ب) اندازه و جهت نیروی متوسط وارد بر خودرو را تعیین کنید. پاسخ: (الف) جهت معبر x را به طرف راست انتخاب می‌کنیم و تکانه‌ها را با استفاده از رابطه ۱۲-۲ به دست می‌آوریم.

$$v_1 = +54/10\text{ km/h} = +15\text{ m/s} \text{ و } v_2 = -40/10\text{ km/h} = -14\text{ m/s}$$

$$p_1 = mv_1 = (1200\text{ kg})(+15\text{ m/s}) = +1.8 \times 10^4\text{ kg.m/s}$$

$$p_2 = mv_2 = (1200\text{ kg})(-14\text{ m/s}) = -1.7 \times 10^4\text{ kg.m/s}$$

$$\Delta p = (-1.7 \times 10^4\text{ kg.m/s}) - (+1.8 \times 10^4\text{ kg.m/s}) = -3.5 \times 10^4\text{ kg.m/s}$$

(ب) نیروی متوسط وارد بر اتومبیل با استفاده از رابطه ۱۲-۲ برابر است با:

$$F_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-3.5 \times 10^4\text{ kg.m/s}}{0.15\text{ s}} = -2.3 \times 10^5\text{ N}$$

یعنی نیروی خالص متوسطی که از دیوار به خودرو وارد می‌شود در خلاف جهت معبر x (یعنی به طرف چپ) است. توجه داریم اگر خودرو پس از برخورد، برگردد نیروی متوسط وارد بر خودرو کوچک‌تر از مقداری است که اکنون به دست آوردیم.

۲-۴ حرکت دایره‌ای یکنواخت

تاکنون درباره 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 ۲-۴).

۴۸

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای



شکل ۲-۱۰ حرکت جسمی مختلف در مسیرهای دایره‌ای

بدین منظور ذره‌ای را در نظر می‌گیریم که روی یک مسیر دایره‌ای با تندی ثابت حرکت می‌کند (شکل ۲-۱۰). 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 نخ پیوسته شده و در یک مسیر دایره‌ای در حرکت است. صرف نظر از آنکه این ذره چه جسمی است، همواره بردار سرعت ذره (\vec{v}) همواره بر مسیر حرکت دایره‌ای است.

پرسش ۲-۱

چرا در حرکت دایره‌ای یکنواخت، ذره در بازه‌های زمانی برابر، مسافت‌های یکسانی را طی می‌کند؟

دوره: در حرکت دایره‌ای یکنواخت، مدت زمان لازم برای پیوندن یک دور محیط دایره را دوره 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:

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad (\text{دوره})$$

یگای دوره ثانیه، (s) است.

پرسش ۲-۲

دوره عقربه ثانیه‌شمار، دقیقه‌شمار و ساعت‌شمار یک ساعت عقربه‌ای چیست؟



به تعریف حرکت دایره‌ای یکنواخت توجه شود. رابطه ۲-۱۲ 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 رابطه ۱-۱ می‌تواند دوره را تعریف کند.

توجه داریم با اینکه در حرکت دایره‌ای یکنواخت، اندازه 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 ۲-۲۱ جلب کرد.

پاسخ پرسش ۲-۸

چون تندی ذره ثابت است بنابراین در بازه‌های زمانی یکسان، مسافت یکسانی را طی می‌کنند:

$$l = v \Delta t \Rightarrow \text{مسافت} = \text{تندی} \times \text{زمان}$$

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots, v_1 = v_2 = \dots, l_1 = v_1 \Delta t_1, l_2 = v_2 \Delta t_2, \dots \Rightarrow$$

$$l_1 = l_2 = \dots$$

توجه داریم برای حرکت دایره‌ای یکنواخت نیازی به تعریف بسامد (f) نیست. ضمناً تعریف ω_{ang} و ω نیز در کتاب درسی نیامده است.

پاسخ پرسش ۲-۹

دوره عقربه ثانیه‌شمار، 60 s ، دوره عقربه دقیقه‌شمار، 3600 s و ساعت‌شمار 43200 s است.

در مثال ۱۳-۲

تعداد دور در دقیقه (rpm) میل‌لنگ داده شده است. یکای rpm امروزه بسیار کاربردی است و دانش‌آموزان باید این توانایی را داشته باشند که از روی آن دوره حرکت (T) را به دست آورند. ساده‌ترین روش به دست آوردن T از روی rpm، استفاده از رابطه $T = \frac{t}{n}$ است. مثلاً در این مثال T را به این روش به دست آورند:

$$T = \frac{t}{n} = \frac{60\text{ s}}{240 \text{ دور}} = \frac{1}{4} \text{ s} = 0.25 \text{ s}$$

این مثال یک مثال کاربردی در مورد خودروهاست. دانش‌آموزان rpm میل‌لنگ خودرو را از عقربه‌ای که در جلوی راننده قرار دارد می‌توانند بخوانند.



میل‌لنگ یک خودرو که قطر محور آن ۲/۰ cm است، در هر دقیقه ۲۴۰۰ دور می‌چرخد (۲۴۰۰ rpm). تندی نقطه‌ای روی لبه محور این میل‌لنگ چقدر است؟

پاسخ: ابتدا زمان یک دور، یعنی دوره تناوب آن را به روش تبدیل زنجیره‌ای محاسبه می‌کنیم:

$$T = \frac{1 \text{ min}}{2400 \text{ دور}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = \frac{1}{40} \text{ s} = 0.025 \text{ s}$$

با استفاده از رابطه $T = \frac{2\pi r}{v}$ و اینکه $r = 2/0 \text{ cm}$ است، تندی این نقطه را برای است:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi (2/0 \text{ cm})}{0.025 \text{ s}} = 500 \text{ m/s}$$

مثال ۱۴-۲

یوه یک بالگرد با دوره ۰/۰۲۰ s به طور یکنواخت می‌چرخد.

الف) تعداد دور بر دقیقه (rpm) یوه بالگرد چقدر است؟

ب) اگر شعاع یوه ۲/۰۰ m باشد، نوک یوه به چه تندی می‌چرخد؟

پاسخ: الف) یک دور چرخش در زمان T انجام می‌شود، بنابراین تعداد دور در یک دقیقه (۶۰ s) برابر است با:

$$\text{rpm} = \left(\frac{60 \text{ s}}{T(s)} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = \left(\frac{60}{0.020} \right) \left(\frac{1}{60} \right) = 500 \text{ rpm}$$

دقیقه/دور = ۳۰۰۰ دور/دور = ۰/۰۲۰ s

ب) با توجه به رابطه $T = \frac{2\pi r}{v}$ می‌توان تندی حرکت نوک یوه بالگرد را همین‌گونه:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi (2/00 \text{ m})}{0.020 \text{ s}} = 628 \text{ m/s}$$

مثال ۱۵-۲



یک دیسک گردان در تفریحی‌زار در نظر بگیرید که توسط یک موتور الکتریکی در هر دقیقه ۵۰۰ دور می‌چرخد. فرض کنید افرادی در فاصله‌های ۰/۱ m و ۲/۰ m و ۴/۰ m از مرکز آن قرار دارند.

تندی این افراد را به دست یآورید و با هم مقایسه کنید.

پاسخ: ابتدا دوره حرکت را محاسبه می‌کنیم.

$$T = \frac{1 \text{ min}}{500 \text{ دور}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 12/0 \text{ s}$$

برای محاسبه تندی افراد در فاصله‌های مختلف از مرکز دیسک گردان، از رابطه ۱۳-۲ استفاده می‌کنیم.

تعداد دور در دقیقه: revolutions per minute

۵۰

در مثال ۱۴-۲ دانش‌آموزان با همان رابطه ۱۲-۲ 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 ۱۵-۲ آن است که دانش‌آموزان پس از حل این مسئله به این نتیجه‌ها برسند:

۱- rpm همه افراد یکسان است.

۲- دوره همه افراد یکسان است.

۳- تندی افراد که در فاصله‌های مختلف ایستاده‌اند، متفاوت است و هرچه از مرکز چرخش دورتر می‌شویم، تندی بیشتر می‌شود.

فصل ۲، دینامیک و حرکت دایره‌ای

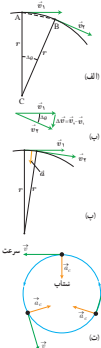
$$T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$v_1 = 1/4 \text{ m} \Rightarrow v_1 = \frac{2\pi(1/4 \text{ rad})(1/4 \text{ m})}{1/2 \text{ s}} = 0.5 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 2/4 \text{ m} \Rightarrow v_2 = \frac{2\pi(2/4 \text{ rad})(2/4 \text{ m})}{1/2 \text{ s}} = 1.0 \text{ m/s}$$

$$v_3 = 3/4 \text{ m} \Rightarrow v_3 = \frac{2\pi(3/4 \text{ rad})(3/4 \text{ m})}{1/2 \text{ s}} = 1.5 \text{ m/s}$$

نتیجه می‌گیریم که هر چه از مرکز دیسک دور می‌شویم، تندی حرکت بیشتر می‌شود در حالی که دوره تناوب برای همه افراد یکسان است.



تمرین ۸-۲ مسافتی را که هر یک از افراد در مثال بالا در مدت ۳/۵ ثانیه طی کرده‌اند محاسبه کنید.

شتاب مرکزگرا و قانون دوم نیوتون: در حرکت دایره‌ای یکواخت، اندازه سرعت ثابت است اما جهت آن دائماً تغییر می‌کند. به همین دلیل حرکت دایره‌ای، حرکتی شتاب‌دار است (شکل ۲۲-۲ الف و ب). در فصل ۱ دیدیم که شتاب متوسط، از نسبت تغییر سرعت به زمان تغییر آن بدست می‌آید ($a_{avg} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$) و اگر بازه 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 بازه زمانی خیلی کوچک انتخاب می‌شود، جهت a_{avg} به طرف مرکز دایره خواهد بود. پس جهت شتاب لحظه‌ای نیز به طرف مرکز خواهد بود (شکل ۲۲-۲ ب). به همین دلیل به آن شتاب مرکزگرا می‌گویند و آن را با a_c نشان می‌دهند (شکل ۲۲-۲ ت). اندازه شتاب مرکزگرا از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (\text{اندازه شتاب مرکزگرا}) \quad (22-3)$$

نوشته ۱۳-۲ نشان دهید در حرکت دایره‌ای یکواخت، شتاب مرکزگرا از رابطه $a_c = \frac{v^2}{r}$ نیز بدست می‌آید که در آن v و T به ترتیب دوره تناوب و شعاع دایره است.

۱- زیوس، در کتاب شتاب (۱) سوزانه conisoidal به جای مرکزگرا است.

پاسخ تمرین ۸-۲

به کمک رابطه ۱-۱ می‌توانیم مسافت طی شده توسط افراد را محاسبه کنیم:

$$l_1 = v_1 \Delta t = (0.5 \text{ m/s})(3/5 \text{ s}) = 1/5 \text{ m}$$

$$l_2 = v_2 \Delta t = (1.0 \text{ m/s})(3/5 \text{ s}) = 3/5 \text{ m}$$

$$l_3 = v_3 \Delta t = (1.5 \text{ m/s})(3/5 \text{ s}) = 4/5 \text{ m}$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هرچه فاصله افراد از مرکز دیسک بیشتر باشد، هم تندی آنها بیشتر است و هم مسافتی که طی می‌کنند.

می‌توان آموزش شتاب مرکزگرا را با این سؤال شروع کرد که حرکت دایره‌ای یکواخت 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 ۲۲-۲ 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 هم اندازه ولی جهت آنها در نقاط مختلف متفاوت است و همچنین \vec{v} ها هم اندازه ولی جهت آنها در نقاط مختلف متفاوت است.

توجه

در شکل ۲۲-۲ 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 است.

فصل ۳، دینامیک و حرکت دایره‌ای

$$T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$r_1 = 1/4 \text{ m} \Rightarrow v_1 = \frac{2\pi r_1}{T} = \frac{2\pi(1/4 \text{ rad})(1/4 \text{ m})}{1/2 \text{ s}} = 1/5 \text{ m/s}$$

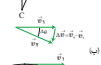
$$r_2 = 1/2 \text{ m} \Rightarrow v_2 = \frac{2\pi r_2}{T} = \frac{2\pi(1/2 \text{ rad})(1/2 \text{ m})}{1/2 \text{ s}} = 1/4 \text{ m/s}$$

$$r_3 = 3/4 \text{ m} \Rightarrow v_3 = \frac{2\pi r_3}{T} = \frac{2\pi(3/4 \text{ rad})(3/4 \text{ m})}{1/2 \text{ s}} = 3/5 \text{ m/s}$$

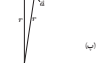
نتیجه می‌گیریم که هر چه از مرکز دیسک دور می‌شویم، تبدی حرکت بیشتر می‌شود در حالی که دوره تناوب برای همه افراد یکسان است.



(الف)



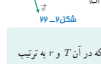
(ب)



(ج)



(د)



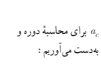
(ه)



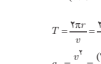
(و)



(ز)



(ح)



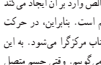
(ط)



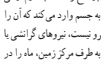
(ی)



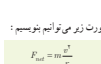
(ک)



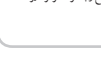
(ل)



(م)



(ن)



(س)



(ص)



(ض)



(ط)



(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

(ک)

(ل)

(م)

(ن)

(س)

(ص)

(ض)

(ط)

(ی)

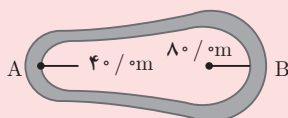
(ک)

(ل)

(م)

تمرین پیشنهادی

یک پیست اتومبیل‌رانی طوری ساخته شده است که دو کمان به شعاع‌های 80 m در B و 40 m در A را با دو مسیر مستقیم به هم متصل می‌سازد. در یک دور آزمایشی راننده‌ای با تندی 50 m/s یک دور کامل می‌زند. شتاب مرکزگرا را در A و B به دست آورید.



پاسخ:

$$a_B = \frac{(50\text{ m/s})^2}{80\text{ m}} = 31.25\text{ m/s}^2 \quad \text{و} \quad a_A = \frac{(50\text{ m/s})^2}{40\text{ m}} = 62.5\text{ m/s}^2$$

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.

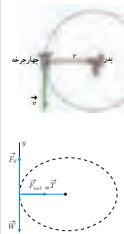
دانستنی

نیروهای مجازی

هرکسی که سوار چرخ و فلک شده باشد در معرض چیزی قرار گرفته است که احساس نیروی «فرار کردن از مرکز» را به وجود می‌آورد. نگه داشتن زده و حرکت به طرف مرکز مانند بالا رفتن از یک تپه یا شیب تند است. در واقع، این نیرو به اصطلاح مرکزگرن 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 مرکزگرایی کوچک‌تری را به او وارد می‌کند. اگر دست شخص سوار بلغزد، به صورت شعاعی به بیرون پرتاب نمی‌شود، بلکه روی خط راست مماس بر نقطه‌ای از فضا که دستش از زده 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.

فصل ۲، جنبش دایره‌ای و حرکت دایره‌ای

مثال ۱۷-۲



په‌ی فرزند ۲۰ کیلوگرمی خود را در یک چهارچرخه این ۵۰ کیلوگرمی قرار می‌دهد و با یک طناب ۲/۰ متری، چهارچرخه را روی سطح افقی زمین به گونه‌ای می‌کشد تا چهارچرخه روی دایره‌ای حرکت کند. با فرض بکواخت بودن حرکت چهارچرخه و صرف‌نظر کردن از اصطکاک و با فرض اینکه نیروی کشش طناب ۱۰۰ N باشد، تندی و دورا چهارچرخه را به دست آورید.

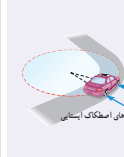
پاسخ: چرخه چهارچرخه را به صورت یک ذره فرض می‌کنیم که در یک مسیر دایره‌ای با نیروی مرکزگرای ۱۰۰ N حرکت می‌کند. بر ذره سه نیروی وزن، نیروی عمودی سطح (در راستای عمودی) و نیروی کشش نخ (مرکزگرا) به طرف مرکز دایره وارد می‌شود. نیروی وزن و نیروی عمودی سطح همدیگر را خنثی می‌کنند و بنابراین تنها نیروی T به عنوان نیروی حائض در نظر گرفته می‌شود.

$$m = 20 \text{ kg}, r = 2 \text{ m}, F_{\text{net}} = T = 100 \text{ N}$$

$$F_{\text{net}} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{F_{\text{net}} r}{m}} = \sqrt{\frac{(100 \text{ N})(2 \text{ m})}{20 \text{ kg}}} = 2 \text{ m/s}$$

$$T = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow T = \frac{(20 \text{ kg})(2 \text{ m/s})^2}{2 \text{ m}} = 40 \text{ N}$$

تمرین ۱۷-۲



خودرویی به جرم ۱۵۰۰ kg را در نظر بگیرید که می‌خواهد در یک پیچ سطح افقی به شعاع ۵۰/۰ m بدون آنکه بلغزد، دور بزند. اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک و سطح جاده ۷/۰ باشد، حداکثر تندی خودرو چقدر می‌تواند باشد؟ (راهنمایی: با اینکه خودرو می‌خواهد یک چهارم دایره را طی کند، می‌توانید خودرو را به صورت یک ذره در نظر بگیرید که در یک چهارم دایره، حرکت دایره‌ای بکواخت 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.)

۵-۲ نیروی گرانشی

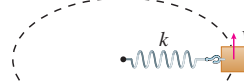


وقتی سببی از یک درخت جدا می‌شود، چه نیرویی سبب سقوط آن به طرف زمین می‌شود؟ وقتی تیر آب را باز می‌کنیم، چه نیرویی سبب می‌شود آب به طرف زمین شتابان کند؟ چرا وقتی یک جسم را به بالا پرتاب می‌کنیم پس از مدتی به پایین می‌افتد؟ منشأ نیروی مرکزگرای که سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود چیست؟ زمین به همراه هفت سیاره دیگر نیز به دور خورشید می‌چرخد؛ منشأ نیروی مرکزگرای وارد بر زمین و سیارات دیگر چیست؟

۵۴

پاسخ مثال ۱۷-۲

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 دوره حرکت را به دست آوریم و این توانایی مهمی برای دانش‌آموزان محسوب می‌شود. در این نوع مثال‌ها می‌توان به جای 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. بقیه محاسبات نیز مانند مثال ۱۷-۲ خواهد بود.



پاسخ تمرین ۱۷-۲

هدف از این تمرین ارائه یک مثال کاربردی در دور زدن خودروها در پیچ‌های مسطح و افقی یا میدان‌های درون شهری است. در این 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 به طور 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:

$$F_{\text{net}} = ma \rightarrow f_s = m \frac{v^2}{r}$$

برای حالتی که f_s پیشینه است و خودرو با تندی حداکثر می‌تواند حرکت کند:

$$f_{s,\text{max}} = m \frac{v_{\text{max}}^2}{r}, f_{s,\text{max}} = \mu_s F_N = \mu_s mg$$

$$\mu_s mg = m \frac{v_{\text{max}}^2}{r} \rightarrow v_{\text{max}} = \sqrt{\mu_s rg} = \sqrt{(1/0)(50/0 \text{ m})(10 \text{ m/s}^2)} = 10\sqrt{5} \text{ m/s} \approx 22 \text{ m/s} = 81 \text{ km/h}$$

توجه داریم μ_s داده شده برای لاستیک و سطح (آسفالت استاندارد باشد) برای حالت خشک در نظر گرفته شده است به طوری 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 اندازه کافی بزرگ نیست و ممکن است خودرو روی خط مماس بر مسیر دایره‌ای شُر بخورد و از جاده خارج شود.

تمرین ۲-۱۰ را برای حالتی که پیچ جاده مرطوب بوده و ضریب اصطکاک 0.23° است، حل کنید.

۲-۵ نیروی گرانشی

محتوای بخش نیروی گرانش به گونه‌ای 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؟ شاهرکار 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 صفحه 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 ۱۲، جلد ۱ دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۱۷-۲

هری فرزند ۲۰ کیلوگرمی خود را در یک چهارچرخه آیین ۵۰ کیلوگرمی قرار می‌دهد و با یک طناب ۲/۰ متری، چهارچرخه را روی سطح افقی زمین به گونه‌ای می‌کشد تا چهارچرخه روی دایره‌ای حرکت کند. با فرض بکواخت بودن حرکت چهارچرخه و صرف‌نظر کردن از اصطکاک و با فرض اینکه نیروی کشش طناب ۱۰۰ N باشد، تندی و دورهٔ چهارچرخه را به دست آورید.

پاسخ: به چهارچرخه را به صورت یک ذره فرض می‌کنیم که در یک مسیر دایره‌ای با نیروی مرکزگرای 100 N حرکت می‌کند. بر ذره سه نیروی وزن، نیروی عمودی سطح (در راستای عمودی) و نیروی کشش بچ (مرکزگرا) به طرف مرکز دایره وارد می‌شود. نیروی وزن و نیروی عمودی سطح همدیگر را خنثی می‌کنند و بنابراین تنها نیروی T به‌عنوان نیروی حاصل در نظر گرفته می‌شود.

$$m = 20\text{ kg}, r = 2\text{ m}, F_{\text{net}} = T = 100\text{ N}$$

$$F_{\text{net}} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{F_{\text{net}} r}{m}} = \sqrt{\frac{100 \times 2}{20}} = 2\text{ m/s}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi \times 2}{2} = 2\text{ s}$$

تمرین ۱۸-۲

خودرویی به جرم 1500 kg را در نظر بگیرید که می‌خواهد در یک پیچ سطح افقی به شعاع 50 m بدون آنکه بلغزد، دور بزند. اگر ضریب اصطکاک استاتی بین لاستیک و سطح جاده $1/10$ باشد، حداکثر تندی خودرو چقدر می‌تواند باشد؟ (راهنمایی: با اینکه خودرو می‌خواهد یک‌چهارم دایره را طی کند، می‌توانیم خودرو را به صورت یک ذره در نظر بگیریم که در یک‌چهارم دایره، حرکت دایره‌ای بکواخت دارد. در راستای عمود بر سطح، نیروی وزن و نیروی عمودی سطح و خودرو وارد می‌شود و نیروی اصطکاک استاتی 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.)

۲-۵ نیروی گرانشی

وقتی سیبی از یک درخت جدا می‌شود، چه نیرویی سبب سقوط آن به طرف زمین می‌شود؟ وقتی تیر آبی را باز می‌کنیم، چه نیرویی سبب می‌شود آب به طرف زمین شتابی کُنداً چرا وقتی جسم را به بالا پرتاب می‌کنیم پس از مدتی به پایین می‌افتد؟ منشأ نیروی مرکزگرای که سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود چیست؟ زمین به همراه سیارهٔ دیگر نیز به دور خورشید می‌چرخند؛ منشأ نیروی مرکزگرای وارد بر زمین و سیارات دیگر چیست؟

تاسل ۱۶۸۷ دادهای زیادی در مورد حرکت ماه و سیارات گردآوری شده بود، اما کسی شناخت روشی از نیروهای مؤثر بر آنها نداشت. در آن سال ایزاک نیوتون، دانشمند انگلیسی، با انتشار کتاب اصول خود را این معما را بیان کرد. از قانون‌های نیوتون می‌دانیم که باید نیروی خاصی بر ماه وارد شود. اگر چنین نیروی 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 نیروی است که اجسام نزدیک به سطح زمین مانند سیب را جذب می‌کند. نیوتون نشان داد هر جسمی در عالم، اجسام دیگری را به خود جذب می‌کند و این الیاهم بخشی برای قانون قانون عمومی بود که بیان می‌دارد:

نیروی گرانشی میان دو ذره با حاصل‌ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصلهٔ آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = F$$

اگر مطابق شکل ۲۵-۱، 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 به دست می‌آید:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (15-2)$$

(نیروی گرانشی بین دو ذره)

در این رابطه، G ثابت گرانش عمومی نام دارد و برابر است با:

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$

ثابت گرانشی

ثابت گرانشی G را اولین بار هری کاولندین* در سال ۱۷۸۸ اندازه‌گیری کرد. در مورد روش اندازه‌گیری G توسط هری کاولندین تحقیق کنید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

مثال ۱۸-۲

جرم زمین و ماه به ترتیب حدود $5.98 \times 10^{24}\text{ kg}$ و $7.36 \times 10^{22}\text{ kg}$ و فاصلهٔ متوسط آنها از یکدیگر حدود $3.84 \times 10^8\text{ m}$ است. نیروی گرانشی را که زمین و ماه به یکدیگر وارد می‌کنند پیدا کنید.

پاسخ: فاصلهٔ دو ذره در این مثال خیلی بزرگ‌تر از قطر کره‌هاست. بنابراین می‌توان کره‌ها را ذره فرض کرد.

به کمک رابطهٔ ۱۵-۲، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F_{12} = F_{21} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(7.36 \times 10^{22} \text{ kg})}{(3.84 \times 10^8 \text{ m})^2} = 1.99 \times 10^4 \text{ N}$$

این نیرو سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود.

* اگر فاصلهٔ دو جسم از یکدیگر زیاد باشد به‌جای r باید از r_0 استفاده کرد. r_0 به فاصلهٔ آنها به‌صورتی که مرکز آن دو جسم را به هم وصل می‌کند و به مرکز جاذبه می‌گویند.

بسیاری از دانش‌آموزان ممکن است به هم اندازه بودن نیروی کشش و واکنش توجه نکنند. در اینجا می‌توانیم با مثال‌هایی که جرم‌های دو جسم متفاوت اند و رسم نیروهای کشش و واکنش این کج‌فهمی‌ها را برطرف کرد.

پاسخ فعالیت ۲-۵

انتظار می‌رود دانش‌آموزان در مورد ثابت گرانشی (G) تحقیق کرده و به صورت 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 ۲-۱۸

با حل این مثال دانش آموز متوجه می شود، با اینکه فاصله ماه از زمین نسبتاً زیاد است اما نیروی گرانشی همچنان بزرگ بوده و سبب چرخش ماه به دور زمین می شود (البته زمین و ماه بر اثر نیروی گرانش وارد بر یکدیگر حول مرکز جرم زمین و ماه که تقریباً در فاصله سه چهارم از مرکز زمین قرار دارد می چرخند). نکته دیگری که در این مثال باید به آن توجه کرد این است که؛ فاصله دو کره در این مثال خیلی بزرگ تر از قطر کره هاست. بنابراین می توان کره ها را به صورت دو ذره فرض کرد که جرم آنها در مرکز کره ها قرار دارند.

مثال ۲-۱۹

هدف از ارائه این مثال آن است که :

۱- دانش آموزان 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 در نظر گرفته نمی شود. مثلاً یک فرد کنار یک خودرو ایستاده است، نیروی گرانشی بین شخص و خودرو محاسبه نمی شود.

۲- وقتی کره ها همگن باشند؛ حتی اگر فاصله آنها زیاد هم نباشد، می توان جرم کل کره را در مرکز آن در نظر گرفت و از رابطه نیروی گرانشی بین دو ذره را محاسبه کرد.

مثال ۲-۲۰

مثال مهمی است که در آن دانش آموزان متوجه می شوند :

۱- نیروی مرکز گرای لازم برای چرخش ماهواره به دور زمین را نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین تأمین می کند.

۲- با دانستن فاصله ماهواره از زمین، می توان تندی ماهواره،

ناسا ۱۶۸۷ داده های زیادی در مورد حرکت ماه و سیارات گردآوری شده بود، اما کسی نتوانست روشنی از نیروهای مؤثر بر آنها اعانت. در آن سال ایزاک نیوتون، دانشمند انگلیسی، با انتشار کتاب اصول خود راز این معما را بیان کرد. از قانون های نیوتون می دانیم که پایه نیروی جاذبه و ماه وارد شود. اگر چنین نبود، ماه به جای مدار تقریباً دایره ای به گرد زمین، پاره خط راست حرکت می کرد. نیوتون استدلال کرد که این نیرو ناشی از نیروی جاذبه بین ماه و زمین است و گفت این نیرو همان نیروی است که اجسام نزدیک به سطح زمین را مانند سیب را جذب می کند. نیوتون نشان داد هر جسمی در عالم، اجسام دیگری را به خود جذب می کند و این الیه بخشی از برای قانون گرانش عمومی بود است که بیان می دارد :

نیروی گرانشی میان دو ذره^۱ با حاصل ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصله آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.

اگر مطابق شکل ۲۰-۲، جرم دو ذره m_1 و m_2 و فاصله آنها از یکدیگر r باشد، اندازه نیروی گرانشی میان دو ذره یعنی F از رابطه زیر به دست می آید :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (۲۰-۲)$$

در این رابطه، G ثابت گرانش عمومی نام دارد و برابر است با :

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$$

نکات ۱-۲۰

ثابت گرانشی G را اولین بار هزلی کانتانت^۲ در سال ۱۷۹۸ اندازه گیری کرد. در مورد روش اندازه گیری G توسط هزلی کانتانت تحقیق کنید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

مثال ۲-۱۸

جرم زمین و ماه به ترتیب حدود $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ و $7.36 \times 10^{22} \text{ kg}$ و فاصله متوسط آنها از یکدیگر حدود $3.84 \times 10^8 \text{ m}$ است. نیروی گرانشی را که زمین و ماه به یکدیگر وارد می کنند پیدا کنید.

پاسخ : فاصله دو کره در این مثال خیلی بزرگتر از قطر کره هاست. بنابراین می توان کره ها را ذره فرض کرد. به کمک رابطه ۲۰-۲، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می کنند محاسبه می کنیم :

$$F_{12} = F_{21} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(7.36 \times 10^{22} \text{ kg})}{(3.84 \times 10^8 \text{ m})^2} = 1.99 \times 10^4 \text{ N}$$

این نیرو سبب چرخش ماه به دور زمین می شود.

۱- اگر فاصله دو جسم از یکدیگر بیان داشته که بران از ابعاد هر یک از دو جسم در خطی با فاصله آنها بشود می گویند. می توان در صورت در نظر گرفت. ۲- Henry Cavendish

فصل ۳- حرکت دایره ای و حرکت دایره ای

مثال ۲-۱۹

دو کره هگن به جرم های 800 kg و 1200 kg را در نظر بگیرید که فاصله مرکز آنها از یکدیگر 100 m است. نیروی گرانشی را که این دو کره به یکدیگر وارد می کنند محاسبه کنید.

پاسخ : برای محاسبه نیروی که دو کره هگن به هم وارد می کنند می توانیم فرض کنیم همه جرم های دو کره در مرکز آنها قرار دارد. بنابراین کره ها را به صورت ذراتی در نظر می گیریم که همان جرم کره ها را داشته باشند. به کمک رابطه ۲۰-۲، نیروی گرانشی را که دو کره به یکدیگر وارد می کنند محاسبه می کنیم :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(800 \text{ kg})(1200 \text{ kg})}{(100 \text{ m})^2} = 6.4 \times 10^{-9} \text{ N}$$

همان طور که محاسبه این مثال نشان می دهد، نیروی گرانشی میان جسم های با جرم کوچک قابل ملاحظه نیست.

مثال ۲-۲۰

ماهواره ها در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار تقریباً دایره ای به دور زمین می چرخند. اگر جرم ماهواره 2000 kg و فاصله آن از سطح زمین 2600 km باشد، کمیت های زیر را محاسبه کنید :

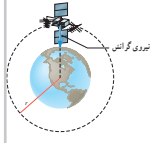
(الف) نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین

(ب) تندی مداری ماهواره

(ج) دوره گردش ماهواره ($T = 2\pi R/v$)

(د) شعاع زمین

پاسخ : ماهواره را به صورت کره ای هگن که جرم آن در مرکز آن قرار دارد در نظر می گیریم و به کمک رابطه ۲۰-۲، نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه می کنیم.



$$r = R_e + h = 6400 \text{ km} + 2600 \text{ km} = 9000 \text{ km} = 9.0 \times 10^6 \text{ m}$$

$$F = G \frac{M_1 m}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(2000 \text{ kg})}{(9.0 \times 10^6 \text{ m})^2} = 9.80 \text{ N}$$

(ب) از رابطه ۲۰-۲، برای پیدا کردن تندی ماهواره استفاده می کنیم :

$$F_{\text{cent}} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow 9.80 \text{ N} = (2000 \text{ kg}) \frac{v^2}{9.0 \times 10^6 \text{ m}} \Rightarrow v = 6.66 \times 10^3 \text{ m/s}$$

(ج) با استفاده از رابطه بین سرعت و دوره یعنی رابطه ۲۰-۲، می توانیم دوره را محاسبه کنیم :

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi (9.0 \times 10^6 \text{ m})}{6.66 \times 10^3 \text{ m/s}} = 8.4 \times 10^3 \text{ s} = 2.3 \text{ Ph}$$

یعنی این ماهواره در هر ۲.۳ Ph یک بار به دور زمین می چرخد.

دوره ماهواره و شتاب مرکزگرای ماهواره را محاسبه کرد.

۳- با اینکه وزن ماهواره در این فاصله نسبتاً کم است (وزن ماهواره در سطح زمین حدود 1960 N و در این فاصله 985 N است) اما همین نیروی کم، نیروی لازم برای گردش ماهواره روی مدار را تأمین می‌کند.

پاسخ تمرین ۱۱-۲

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 در نظر گرفته شده است.

$$F = m \frac{v^2}{r} \rightarrow G \frac{M_e m}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \rightarrow \quad (\text{الف})$$

$$r^3 = \frac{GM_e T^2}{4\pi^2} \rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{GM_e T^2}{4\pi^2}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(86400 \text{ s})^2}{4(\pi)^2}}$$

$$= 1.05 \sqrt[3]{754979/5974} \text{ m} = 4.23 \times 10^7 \text{ m}$$

(ب)

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi(4.23 \times 10^7 \text{ m})}{86400 \text{ s}} = 3.08 \times 10^3 \text{ m/s}$$

پاسخ پرسش ۱۱-۲

متناسب بودن T^2 با r^3 قانون سوم کپلر است که به کمک قانون گرانش نیوتون به سادگی به دست می‌آید:

$$F = m \frac{v^2}{r} = m \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

$$G \frac{M_e m}{r^2} = m \frac{4\pi^2 r}{T^2} \rightarrow 4\pi^2 r^3 = GM_e T^2 \rightarrow T^2 \propto r^3$$

وزن و نیروی گرانشی

به کمک رابطه نیروی گرانشی می‌توانیم وزن یک جسم را در هر فاصله‌ای از مرکز زمین به دست آوریم. مثلاً وزن یک جسم به جرم m در ارتفاع h از سطح زمین از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W = G \frac{M_e m}{(R_e + h)^2}$$

تمرین ۱۱-۲

مدار هنگام با زمین و ماهواره‌های مخابراتی: از دیدگاه مخابراتی، باقی ماندن ماهواره در یک محل نسبت به مکانی در روی زمین (مثلاً پای ایران) امتیاز محسوب می‌شود. این در صورتی رخ می‌دهد که دوره گردش ماهواره به دور زمین با مدت زمان یک دور چرخش زمین به دور خودش، یعنی $24 \times 60 \times 60$ ثانیه باشد. (الف) در چه فاصله‌ای از زمین می‌توان این مدار هنگام با زمین را یافت؟ (ب) تندی مداری این ماهواره چقدر است؟

پرسش ۱۱-۲

نشان دهید مربع دوره گردش ماهواره‌ها به دور زمین متناسب با مکعب فاصله ماهواره از مرکز زمین است.

وزن و نیروی گرانشی: در بخش ۲-۲، 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 ۲-۲۴). اگر جرم جسم را با m ، جرم زمین را با M و شعاع زمین را با R_e نمایش دهیم، وزن جسم روی سطح زمین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = G \frac{M_e m}{R_e^2} \quad (2-24)$$

نشان دهید شتاب گرانشی روی زمین برابر است با: $g = G \frac{M_e}{R_e^2}$

تمرین ۱۲-۲

تلسکوپ فضایی هابل با تندی 7560 m/s گرد زمین می‌چرخد. (الف) فاصله این تلسکوپ از سطح زمین چند کیلومتر است؟ (ب) وزن این تلسکوپ در این ارتفاع چند برابر وزن آن روی زمین است؟ (پ) دوره تناوب این تلسکوپ را پیدا کنید. ($R_e = 6380 \text{ km}$)

۵۶

فهرست ۳۱

تمرین ۱۲-۲

مدار هنگام با زمین 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 دوره گردش ماهواره به دور زمین با مدت زمان یک دور چرخش زمین به دور خودش، یعنی $24 \times 60 \times 60$ ثانیه یکسان باشد. (الف) در چه فاصله‌ای از زمین می‌توان این مدار هنگام با زمین را یافت؟ (ب) تندی مداری این ماهواره چقدر است؟

پوشش ۱۲-۲

نشان دهید مرجع دوره گردش ماهواره‌ها به دور زمین متناسب با مکعب فاصله ماهواره از مرکز زمین است.

وزن و نیروی گرانشی: در بخش ۲-۲، 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 ۲-۱۴). اگر جسم m را با M_e جرم زمین را با R_e شعاع زمین را با R_e نمایش دهیم، وزن جسم روی سطح زمین از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W = G \frac{M_e m}{R_e^2} \quad (\text{وزن جسم در سطح زمین}) \quad (12-2)$$

شکل ۲-۱۴: وزن نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند.

تمرین ۱۲-۲

نشان دهید شتاب گرانشی روی زمین برابر است با: $g = G \frac{M_e}{R_e^2}$

تمرین ۱۳-۲

تلسکوپ فضایی هابل با تندی 7560 m/s گرد زمین می‌چرخد. (الف) فاصله این تلسکوپ از سطح زمین چند کیلومتر است؟ (ب) وزن این تلسکوپ در این ارتفاع چند برابر وزن آن روی زمین است؟ (ج) دوره تناوب این تلسکوپ را پیدا کنید. ($R_e = 6380 \text{ km}$)

۵۶

پاسخ تمرین ۱۲-۲

به کمک رابطه وزن داده شده، شتاب گرانشی را می‌توان در ارتفاع h از سطح زمین یا در سطح زمین به دست آورد:

$$W = mg \rightarrow G \frac{M_e m}{(R_e + h)^2} = mg \rightarrow g = \frac{GM_e}{(R_e + h)^2}$$

$$\text{اگر } h = 0 \rightarrow g = \frac{GM_e}{R_e^2}$$

پاسخ تمرین ۱۳-۲ (الف):

$$F = m \frac{v^2}{r} \rightarrow G \frac{M_e m}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \rightarrow v^2 = \frac{GM_e}{r} \rightarrow r = \frac{GM_e}{v^2} \rightarrow$$

$$r = \frac{(6/67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2)(5/98 \times 10^{24} \text{ kg})}{(7560 \text{ m/s})^2} = 698 \times 10^4 \text{ m} = 6/98 \times 10^3 \text{ km}$$

$$r = R_e + h \rightarrow h = r - R_e = 6/98 \times 10^3 \text{ km} - 6400 \text{ km}$$

$$h = 580 \text{ km}$$

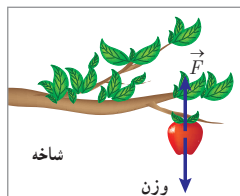
$$\frac{W}{W_e} = \frac{R_e^2}{(R_e + h)^2} = \left(\frac{6380 \text{ km}}{6980 \text{ km}} \right)^2 = 0/835 \quad (\text{ب})$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2 \times 3/14 \times 6/98 \times 10^3 \times 10^3 \text{ m}}{7560 \text{ m/s}} = 5/8 \times 10^3 \text{ s} = 1/6 \text{ h} \quad (\text{پ})$$

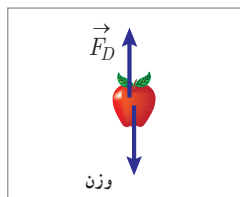
راهنمای پاسخ‌یابی پرشی‌ها و مسئله‌های فصل ۲

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 متوازن اند. 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 (شاخه \vec{W}).

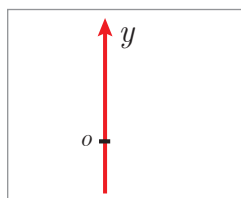


واکنش وزن سیب، نیروی گرانشی است که از طرف سیب به زمین وارد شده و آن را به طرف بالا می‌کشد (\vec{W}').

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}').

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.



$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = W + ma = mg + ma$$

الف)

$$a = 0$$

$$F_N = mg + 0 = (50/10 \text{ kg})(9/10 \text{ N/kg}) = 490 \text{ N}$$

ب) وقتی آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند باز هم شتاب صفر است ($a = 0$)

$$F_N = mg + 0 = (50/10 \text{ kg})(9/10 \text{ N/kg}) = 490 \text{ N}$$

$$a = +1/2 \text{ m/s}^2 \quad \text{پ)}$$

$$F_N = mg + ma = (50/10 \text{ kg})(9/10 \text{ N/kg}) + (50/10 \text{ kg})(1/2 \text{ m/s}^2) = 550 \text{ N}$$

$$a = -1/2 \text{ m/s}^2 \quad \text{ت)}$$

$$F_N = mg + ma = (50/10 \text{ kg})(9/10 \text{ N/kg}) + (50/10 \text{ kg})(-1/2 \text{ m/s}^2) = 430 \text{ N}$$

پرشی‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۱-۲-۳-۴-۵-۶-۷-۸-۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰-۲۱-۲۲-۲۳-۲۴-۲۵-۲۶-۲۷-۲۸-۲۹-۳۰-۳۱-۳۲-۳۳-۳۴-۳۵-۳۶-۳۷-۳۸-۳۹-۴۰-۴۱-۴۲-۴۳-۴۴-۴۵-۴۶-۴۷-۴۸-۴۹-۵۰-۵۱-۵۲-۵۳-۵۴-۵۵-۵۶-۵۷-۵۸-۵۹-۶۰-۶۱-۶۲-۶۳-۶۴-۶۵-۶۶-۶۷-۶۸-۶۹-۷۰-۷۱-۷۲-۷۳-۷۴-۷۵-۷۶-۷۷-۷۸-۷۹-۸۰-۸۱-۸۲-۸۳-۸۴-۸۵-۸۶-۸۷-۸۸-۸۹-۹۰-۹۱-۹۲-۹۳-۹۴-۹۵-۹۶-۹۷-۹۸-۹۹-۱۰۰-۱۰۱-۱۰۲-۱۰۳-۱۰۴-۱۰۵-۱۰۶-۱۰۷-۱۰۸-۱۰۹-۱۱۰-۱۱۱-۱۱۲-۱۱۳-۱۱۴-۱۱۵-۱۱۶-۱۱۷-۱۱۸-۱۱۹-۱۲۰-۱۲۱-۱۲۲-۱۲۳-۱۲۴-۱۲۵-۱۲۶-۱۲۷-۱۲۸-۱۲۹-۱۳۰-۱۳۱-۱۳۲-۱۳۳-۱۳۴-۱۳۵-۱۳۶-۱۳۷-۱۳۸-۱۳۹-۱۴۰-۱۴۱-۱۴۲-۱۴۳-۱۴۴-۱۴۵-۱۴۶-۱۴۷-۱۴۸-۱۴۹-۱۵۰-۱۵۱-۱۵۲-۱۵۳-۱۵۴-۱۵۵-۱۵۶-۱۵۷-۱۵۸-۱۵۹-۱۶۰-۱۶۱-۱۶۲-۱۶۳-۱۶۴-۱۶۵-۱۶۶-۱۶۷-۱۶۸-۱۶۹-۱۷۰-۱۷۱-۱۷۲-۱۷۳-۱۷۴-۱۷۵-۱۷۶-۱۷۷-۱۷۸-۱۷۹-۱۸۰-۱۸۱-۱۸۲-۱۸۳-۱۸۴-۱۸۵-۱۸۶-۱۸۷-۱۸۸-۱۸۹-۱۹۰-۱۹۱-۱۹۲-۱۹۳-۱۹۴-۱۹۵-۱۹۶-۱۹۷-۱۹۸-۱۹۹-۲۰۰-۲۰۱-۲۰۲-۲۰۳-۲۰۴-۲۰۵-۲۰۶-۲۰۷-۲۰۸-۲۰۹-۲۱۰-۲۱۱-۲۱۲-۲۱۳-۲۱۴-۲۱۵-۲۱۶-۲۱۷-۲۱۸-۲۱۹-۲۲۰-۲۲۱-۲۲۲-۲۲۳-۲۲۴-۲۲۵-۲۲۶-۲۲۷-۲۲۸-۲۲۹-۲۳۰-۲۳۱-۲۳۲-۲۳۳-۲۳۴-۲۳۵-۲۳۶-۲۳۷-۲۳۸-۲۳۹-۲۴۰-۲۴۱-۲۴۲-۲۴۳-۲۴۴-۲۴۵-۲۴۶-۲۴۷-۲۴۸-۲۴۹-۲۵۰-۲۵۱-۲۵۲-۲۵۳-۲۵۴-۲۵۵-۲۵۶-۲۵۷-۲۵۸-۲۵۹-۲۶۰-۲۶۱-۲۶۲-۲۶۳-۲۶۴-۲۶۵-۲۶۶-۲۶۷-۲۶۸-۲۶۹-۲۷۰-۲۷۱-۲۷۲-۲۷۳-۲۷۴-۲۷۵-۲۷۶-۲۷۷-۲۷۸-۲۷۹-۲۸۰-۲۸۱-۲۸۲-۲۸۳-۲۸۴-۲۸۵-۲۸۶-۲۸۷-۲۸۸-۲۸۹-۲۹۰-۲۹۱-۲۹۲-۲۹۳-۲۹۴-۲۹۵-۲۹۶-۲۹۷-۲۹۸-۲۹۹-۳۰۰-۳۰۱-۳۰۲-۳۰۳-۳۰۴-۳۰۵-۳۰۶-۳۰۷-۳۰۸-۳۰۹-۳۱۰-۳۱۱-۳۱۲-۳۱۳-۳۱۴-۳۱۵-۳۱۶-۳۱۷-۳۱۸-۳۱۹-۳۲۰-۳۲۱-۳۲۲-۳۲۳-۳۲۴-۳۲۵-۳۲۶-۳۲۷-۳۲۸-۳۲۹-۳۳۰-۳۳۱-۳۳۲-۳۳۳-۳۳۴-۳۳۵-۳۳۶-۳۳۷-۳۳۸-۳۳۹-۳۴۰-۳۴۱-۳۴۲-۳۴۳-۳۴۴-۳۴۵-۳۴۶-۳۴۷-۳۴۸-۳۴۹-۳۵۰-۳۵۱-۳۵۲-۳۵۳-۳۵۴-۳۵۵-۳۵۶-۳۵۷-۳۵۸-۳۵۹-۳۶۰-۳۶۱-۳۶۲-۳۶۳-۳۶۴-۳۶۵-۳۶۶-۳۶۷-۳۶۸-۳۶۹-۳۷۰-۳۷۱-۳۷۲-۳۷۳-۳۷۴-۳۷۵-۳۷۶-۳۷۷-۳۷۸-۳۷۹-۳۸۰-۳۸۱-۳۸۲-۳۸۳-۳۸۴-۳۸۵-۳۸۶-۳۸۷-۳۸۸-۳۸۹-۳۹۰-۳۹۱-۳۹۲-۳۹۳-۳۹۴-۳۹۵-۳۹۶-۳۹۷-۳۹۸-۳۹۹-۴۰۰-۴۰۱-۴۰۲-۴۰۳-۴۰۴-۴۰۵-۴۰۶-۴۰۷-۴۰۸-۴۰۹-۴۱۰-۴۱۱-۴۱۲-۴۱۳-۴۱۴-۴۱۵-۴۱۶-۴۱۷-۴۱۸-۴۱۹-۴۲۰-۴۲۱-۴۲۲-۴۲۳-۴۲۴-۴۲۵-۴۲۶-۴۲۷-۴۲۸-۴۲۹-۴۳۰-۴۳۱-۴۳۲-۴۳۳-۴۳۴-۴۳۵-۴۳۶-۴۳۷-۴۳۸-۴۳۹-۴۴۰-۴۴۱-۴۴۲-۴۴۳-۴۴۴-۴۴۵-۴۴۶-۴۴۷-۴۴۸-۴۴۹-۴۵۰-۴۵۱-۴۵۲-۴۵۳-۴۵۴-۴۵۵-۴۵۶-۴۵۷-۴۵۸-۴۵۹-۴۶۰-۴۶۱-۴۶۲-۴۶۳-۴۶۴-۴۶۵-۴۶۶-۴۶۷-۴۶۸-۴۶۹-۴۷۰-۴۷۱-۴۷۲-۴۷۳-۴۷۴-۴۷۵-۴۷۶-۴۷۷-۴۷۸-۴۷۹-۴۸۰-۴۸۱-۴۸۲-۴۸۳-۴۸۴-۴۸۵-۴۸۶-۴۸۷-۴۸۸-۴۸۹-۴۹۰-۴۹۱-۴۹۲-۴۹۳-۴۹۴-۴۹۵-۴۹۶-۴۹۷-۴۹۸-۴۹۹-۵۰۰-۵۰۱-۵۰۲-۵۰۳-۵۰۴-۵۰۵-۵۰۶-۵۰۷-۵۰۸-۵۰۹-۵۱۰-۵۱۱-۵۱۲-۵۱۳-۵۱۴-۵۱۵-۵۱۶-۵۱۷-۵۱۸-۵۱۹-۵۲۰-۵۲۱-۵۲۲-۵۲۳-۵۲۴-۵۲۵-۵۲۶-۵۲۷-۵۲۸-۵۲۹-۵۳۰-۵۳۱-۵۳۲-۵۳۳-۵۳۴-۵۳۵-۵۳۶-۵۳۷-۵۳۸-۵۳۹-۵۴۰-۵۴۱-۵۴۲-۵۴۳-۵۴۴-۵۴۵-۵۴۶-۵۴۷-۵۴۸-۵۴۹-۵۵۰-۵۵۱-۵۵۲-۵۵۳-۵۵۴-۵۵۵-۵۵۶-۵۵۷-۵۵۸-۵۵۹-۵۶۰-۵۶۱-۵۶۲-۵۶۳-۵۶۴-۵۶۵-۵۶۶-۵۶۷-۵۶۸-۵۶۹-۵۷۰-۵۷۱-۵۷۲-۵۷۳-۵۷۴-۵۷۵-۵۷۶-۵۷۷-۵۷۸-۵۷۹-۵۸۰-۵۸۱-۵۸۲-۵۸۳-۵۸۴-۵۸۵-۵۸۶-۵۸۷-۵۸۸-۵۸۹-۵۹۰-۵۹۱-۵۹۲-۵۹۳-۵۹۴-۵۹۵-۵۹۶-۵۹۷-۵۹۸-۵۹۹-۶۰۰-۶۰۱-۶۰۲-۶۰۳-۶۰۴-۶۰۵-۶۰۶-۶۰۷-۶۰۸-۶۰۹-۶۱۰-۶۱۱-۶۱۲-۶۱۳-۶۱۴-۶۱۵-۶۱۶-۶۱۷-۶۱۸-۶۱۹-۶۲۰-۶۲۱-۶۲۲-۶۲۳-۶۲۴-۶۲۵-۶۲۶-۶۲۷-۶۲۸-۶۲۹-۶۳۰-۶۳۱-۶۳۲-۶۳۳-۶۳۴-۶۳۵-۶۳۶-۶۳۷-۶۳۸-۶۳۹-۶۴۰-۶۴۱-۶۴۲-۶۴۳-۶۴۴-۶۴۵-۶۴۶-۶۴۷-۶۴۸-۶۴۹-۶۵۰-۶۵۱-۶۵۲-۶۵۳-۶۵۴-۶۵۵-۶۵۶-۶۵۷-۶۵۸-۶۵۹-۶۶۰-۶۶۱-۶۶۲-۶۶۳-۶۶۴-۶۶۵-۶۶۶-۶۶۷-۶۶۸-۶۶۹-۶۷۰-۶۷۱-۶۷۲-۶۷۳-۶۷۴-۶۷۵-۶۷۶-۶۷۷-۶۷۸-۶۷۹-۶۸۰-۶۸۱-۶۸۲-۶۸۳-۶۸۴-۶۸۵-۶۸۶-۶۸۷-۶۸۸-۶۸۹-۶۹۰-۶۹۱-۶۹۲-۶۹۳-۶۹۴-۶۹۵-۶۹۶-۶۹۷-۶۹۸-۶۹۹-۷۰۰-۷۰۱-۷۰۲-۷۰۳-۷۰۴-۷۰۵-۷۰۶-۷۰۷-۷۰۸-۷۰۹-۷۱۰-۷۱۱-۷۱۲-۷۱۳-۷۱۴-۷۱۵-۷۱۶-۷۱۷-۷۱۸-۷۱۹-۷۲۰-۷۲۱-۷۲۲-۷۲۳-۷۲۴-۷۲۵-۷۲۶-۷۲۷-۷۲۸-۷۲۹-۷۳۰-۷۳۱-۷۳۲-۷۳۳-۷۳۴-۷۳۵-۷۳۶-۷۳۷-۷۳۸-۷۳۹-۷۴۰-۷۴۱-۷۴۲-۷۴۳-۷۴۴-۷۴۵-۷۴۶-۷۴۷-۷۴۸-۷۴۹-۷۵۰-۷۵۱-۷۵۲-۷۵۳-۷۵۴-۷۵۵-۷۵۶-۷۵۷-۷۵۸-۷۵۹-۷۶۰-۷۶۱-۷۶۲-۷۶۳-۷۶۴-۷۶۵-۷۶۶-۷۶۷-۷۶۸-۷۶۹-۷۷۰-۷۷۱-۷۷۲-۷۷۳-۷۷۴-۷۷۵-۷۷۶-۷۷۷-۷۷۸-۷۷۹-۷۸۰-۷۸۱-۷۸۲-۷۸۳-۷۸۴-۷۸۵-۷۸۶-۷۸۷-۷۸۸-۷۸۹-۷۹۰-۷۹۱-۷۹۲-۷۹۳-۷۹۴-۷۹۵-۷۹۶-۷۹۷-۷۹۸-۷۹۹-۸۰۰-۸۰۱-۸۰۲-۸۰۳-۸۰۴-۸۰۵-۸۰۶-۸۰۷-۸۰۸-۸۰۹-۸۱۰-۸۱۱-۸۱۲-۸۱۳-۸۱۴-۸۱۵-۸۱۶-۸۱۷-۸۱۸-۸۱۹-۸۲۰-۸۲۱-۸۲۲-۸۲۳-۸۲۴-۸۲۵-۸۲۶-۸۲۷-۸۲۸-۸۲۹-۸۳۰-۸۳۱-۸۳۲-۸۳۳-۸۳۴-۸۳۵-۸۳۶-۸۳۷-۸۳۸-۸۳۹-۸۴۰-۸۴۱-۸۴۲-۸۴۳-۸۴۴-۸۴۵-۸۴۶-۸۴۷-۸۴۸-۸۴۹-۸۵۰-۸۵۱-۸۵۲-۸۵۳-۸۵۴-۸۵۵-۸۵۶-۸۵۷-۸۵۸-۸۵۹-۸۶۰-۸۶۱-۸۶۲-۸۶۳-۸۶۴-۸۶۵-۸۶۶-۸۶۷-۸۶۸-۸۶۹-۸۷۰-۸۷۱-۸۷۲-۸۷۳-۸۷۴-۸۷۵-۸۷۶-۸۷۷-۸۷۸-۸۷۹-۸۸۰-۸۸۱-۸۸۲-۸۸۳-۸۸۴-۸۸۵-۸۸۶-۸۸۷-۸۸۸-۸۸۹-۸۹۰-۸۹۱-۸۹۲-۸۹۳-۸۹۴-۸۹۵-۸۹۶-۸۹۷-۸۹۸-۸۹۹-۹۰۰-۹۰۱-۹۰۲-۹۰۳-۹۰۴-۹۰۵-۹۰۶-۹۰۷-۹۰۸-۹۰۹-۹۱۰-۹۱۱-۹۱۲-۹۱۳-۹۱۴-۹۱۵-۹۱۶-۹۱۷-۹۱۸-۹۱۹-۹۲۰-۹۲۱-۹۲۲-۹۲۳-۹۲۴-۹۲۵-۹۲۶-۹۲۷-۹۲۸-۹۲۹-۹۳۰-۹۳۱-۹۳۲-۹۳۳-۹۳۴-۹۳۵-۹۳۶-۹۳۷-۹۳۸-۹۳۹-۹۴۰-۹۴۱-۹۴۲-۹۴۳-۹۴۴-۹۴۵-۹۴۶-۹۴۷-۹۴۸-۹۴۹-۹۵۰-۹۵۱-۹۵۲-۹۵۳-۹۵۴-۹۵۵-۹۵۶-۹۵۷-۹۵۸-۹۵۹-۹۶۰-۹۶۱-۹۶۲-۹۶۳-۹۶۴-۹۶۵-۹۶۶-۹۶۷-۹۶۸-۹۶۹-۹۷۰-۹۷۱-۹۷۲-۹۷۳-۹۷۴-۹۷۵-۹۷۶-۹۷۷-۹۷۸-۹۷۹-۹۸۰-۹۸۱-۹۸۲-۹۸۳-۹۸۴-۹۸۵-۹۸۶-۹۸۷-۹۸۸-۹۸۹-۹۹۰-۹۹۱-۹۹۲-۹۹۳-۹۹۴-۹۹۵-۹۹۶-۹۹۷-۹۹۸-۹۹۹-۱۰۰۰-۱۰۰۱-۱۰۰۲-۱۰۰۳-۱۰۰۴-۱۰۰۵-۱۰۰۶-۱۰۰۷-۱۰۰۸-۱۰۰۹-۱۰۱۰-۱۰۱۱-۱۰۱۲-۱۰۱۳-۱۰۱۴-۱۰۱۵-۱۰۱۶-۱۰۱۷-۱۰۱۸-۱۰۱۹-۱۰۲۰-۱۰۲۱-۱۰۲۲-۱۰۲۳-۱۰۲۴-۱۰۲۵-۱۰۲۶-۱۰۲۷-۱۰۲۸-۱۰۲۹-۱۰۳۰-۱۰۳۱-۱۰۳۲-۱۰۳۳-۱۰۳۴-۱۰۳۵-۱۰۳۶-۱۰۳۷-۱۰۳۸-۱۰۳۹-۱۰۴۰-۱۰۴۱-۱۰۴۲-۱۰۴۳-۱۰۴۴-۱۰۴۵-۱۰۴۶-۱۰۴۷-۱۰۴۸-۱۰۴۹-۱۰۵۰-۱۰۵۱-۱۰۵۲-۱۰۵۳-۱۰۵۴-۱۰۵۵-۱۰۵۶-۱۰۵۷-۱۰۵۸-۱۰۵۹-۱۰۶۰-۱۰۶۱-۱۰۶۲-۱۰۶۳-۱۰۶۴-۱۰۶۵-۱۰۶۶-۱۰۶۷-۱۰۶۸-۱۰۶۹-۱۰۷۰-۱۰۷۱-۱۰۷۲-۱۰۷۳-۱۰۷۴-۱۰۷۵-۱۰۷۶-۱۰۷۷-۱۰۷۸-۱۰۷۹-۱۰۸۰-۱۰۸۱-۱۰۸۲-۱۰۸۳-۱۰۸۴-۱۰۸۵-۱۰۸۶-۱۰۸۷-۱۰۸۸-۱۰۸۹-۱۰۹۰-۱۰۹۱-۱۰۹۲-۱۰۹۳-۱۰۹۴-۱۰۹۵-۱۰۹۶-۱۰۹۷-۱۰۹۸-۱۰۹۹-۱۱۰۰-۱۱۰۱-۱۱۰۲-۱۱۰۳-۱۱۰۴-۱۱۰۵-۱۱۰۶-۱۱۰۷-۱۱۰۸-۱۱۰۹-۱۱۱۰-۱۱۱۱-۱۱۱۲-۱۱۱۳-۱۱۱۴-۱۱۱۵-۱۱۱۶-۱۱۱۷-۱۱۱۸-۱۱۱۹-۱۱۲۰-۱۱۲۱-۱۱۲۲-۱۱۲۳-۱۱۲۴-۱۱۲۵-۱۱۲۶-۱۱۲۷-۱۱۲۸-۱۱۲۹-۱۱۳۰-۱۱۳۱-۱۱۳۲-۱۱۳۳-۱۱۳۴-۱۱۳۵-۱۱۳۶-۱۱۳۷-۱۱۳۸-۱۱۳۹-۱۱۴۰-۱۱۴۱-۱۱۴۲-۱۱۴۳-۱۱۴۴-۱۱۴۵-۱۱۴۶-۱۱۴۷-۱۱۴۸-۱۱۴۹-۱۱۵۰-۱۱۵۱-۱۱۵۲-۱۱۵۳-۱۱۵۴-۱۱۵۵-۱۱۵۶-۱۱۵۷-۱۱۵۸-۱۱۵۹-۱۱۶۰-۱۱۶۱-۱۱۶۲-۱۱۶۳-۱۱۶۴-۱۱۶۵-۱۱۶۶-۱۱۶۷-۱۱۶۸-۱۱۶۹-۱۱۷۰-۱۱۷۱-۱۱۷۲-۱۱۷۳-۱۱۷۴-۱۱۷۵-۱۱۷۶-۱۱۷۷-۱۱۷۸-۱۱۷۹-۱۱۸۰-۱۱۸۱-۱۱۸۲-۱۱۸۳-۱۱۸۴-۱۱۸۵-۱۱۸۶-۱۱۸۷-۱۱۸۸-۱۱۸۹-۱۱۹۰-۱۱۹۱-۱۱۹۲-۱۱۹۳-۱۱۹۴-۱۱۹۵-۱۱۹۶-۱۱۹۷-۱۱۹۸-۱۱۹۹-۱۲۰۰-۱۲۰۱-۱۲۰۲-۱۲۰۳-۱۲۰۴-۱۲۰۵-۱۲۰۶-۱۲۰۷-۱۲۰۸-۱۲۰۹-۱۲۱۰-۱۲۱۱-۱۲۱۲-۱۲۱۳-۱۲۱۴-۱۲۱۵-۱۲۱۶-۱۲۱۷-۱۲۱۸-۱۲۱۹-۱۲۲۰-۱۲۲۱-۱۲۲۲-۱۲۲۳-۱۲۲۴-۱۲۲۵-۱۲۲۶-۱۲۲۷-۱۲۲۸-۱۲۲۹-۱۲۳۰-۱۲۳۱-۱۲۳۲-۱۲۳۳-۱۲۳۴-۱۲۳۵-۱۲۳۶-۱۲۳۷-۱۲۳۸-۱۲۳۹-۱۲۴۰-۱۲۴۱-۱۲۴۲-۱۲۴۳-۱۲۴۴-۱۲۴۵-۱۲۴۶-۱۲۴۷-۱۲۴۸-۱۲۴۹-۱۲۵۰-۱۲۵۱-۱۲۵۲-۱۲۵۳-۱۲۵۴-۱۲۵۵-۱۲۵۶-۱۲۵۷-۱۲۵۸-۱۲۵۹-۱۲۶۰-۱۲۶۱-۱۲۶۲-۱۲۶۳-۱۲۶۴-۱۲۶۵-۱۲۶۶-۱۲۶۷-۱۲۶۸-۱۲۶۹-۱۲۷۰-۱۲۷۱-۱۲۷۲-۱۲۷۳-۱۲۷۴-۱۲۷۵-۱۲۷۶-۱۲۷۷-۱۲۷۸-۱۲۷۹-۱۲۸۰-۱۲۸۱-۱۲۸۲-۱۲۸۳-۱۲۸۴-۱۲۸۵-۱۲۸۶-۱۲۸۷-۱۲۸۸-۱۲۸۹-۱۲۹۰-۱۲۹۱-۱۲۹۲-۱۲۹۳-۱۲۹۴-۱۲۹۵-۱۲۹۶-۱۲۹۷-۱۲۹۸-۱۲۹۹-۱۳۰۰-۱۳۰۱-۱۳۰۲-۱۳۰۳-۱۳۰۴-۱۳۰۵-۱۳۰۶-۱۳۰۷-۱۳۰۸-۱۳۰۹-۱۳۱۰-۱۳۱۱-۱۳۱۲-۱۳۱۳-۱۳۱۴-۱۳۱۵-۱۳۱۶-۱۳۱۷-۱۳۱۸-۱۳۱۹-۱۳۲۰-۱۳۲۱-۱۳۲۲-۱۳۲۳-۱۳۲۴-۱۳۲۵-۱۳۲۶-۱۳۲۷-۱۳۲۸-۱۳۲۹-۱۳۳۰-۱۳۳۱-۱۳۳۲-۱۳۳۳-۱۳۳۴-۱۳۳۵-۱۳۳۶-۱۳۳۷-۱۳۳۸-۱۳۳۹-۱۳۴۰-۱۳۴۱-۱۳۴۲-۱۳۴۳-۱۳۴۴-۱۳۴۵-۱۳۴۶-۱۳۴۷-۱۳۴۸-۱۳۴۹-۱۳۵۰-۱۳۵۱-۱۳۵۲-۱۳۵۳-۱۳۵۴-۱۳۵۵-۱۳۵۶-۱۳۵۷-۱۳۵۸-۱۳۵۹-۱۳۶۰-۱۳۶۱-۱۳۶۲-۱۳۶۳-۱۳۶۴-۱۳۶۵-۱۳۶۶-۱۳۶۷-۱۳۶۸-۱۳۶۹-۱۳۷۰-۱۳۷۱-۱۳۷۲-۱۳۷۳-۱۳۷۴-۱۳۷۵-۱۳۷۶-۱۳۷۷-۱۳۷۸-۱۳۷۹-۱۳۸۰-۱۳۸۱-۱۳۸۲-۱۳۸۳-۱۳۸۴-۱۳۸۵-۱۳۸۶-۱۳۸۷-۱۳۸۸-۱۳۸۹-۱۳۹۰-۱۳۹۱-۱۳۹۲-۱۳۹۳-۱۳۹۴-۱۳۹۵-۱۳۹۶-۱۳۹۷-۱۳۹۸-۱۳۹۹-۱۴۰۰-۱۴۰۱-۱۴۰۲-۱۴۰۳-۱۴۰۴-۱۴۰۵-۱۴۰۶-۱۴۰۷-۱۴۰۸-۱۴۰۹-۱۴۱۰-۱۴۱۱-۱۴۱۲-۱۴۱۳-۱۴۱۴-۱۴۱۵-۱۴۱۶-۱۴۱۷-۱۴۱۸-۱۴۱۹-۱۴۲۰-۱۴۲۱-۱۴۲۲-۱۴۲۳-۱۴۲۴-۱۴۲۵-۱۴۲۶-۱۴۲۷-۱۴۲۸-۱۴۲۹-۱۴۳۰-۱۴

۳ الف) در هر دو حالت جسم ساکن است و نیروی اصطکاک ایستایی در خلاف جهت نیروی \vec{F} بر جسم وارد می‌شود.

$$F_1 = 20^\circ \text{ N}, a = 0, v = 0$$

$$F - f_s = ma \rightarrow f_s = F = 20^\circ \text{ N}$$

$$F_2 = 30^\circ \text{ N}, a = 0, v = 0$$

$$F_2 - f_{s, \max} = ma \rightarrow f_{s, \max} = F_2 = 30^\circ \text{ N}$$

(ب)

$$f_{s, \max} = \mu_s F_N, F_N = mg \rightarrow 30^\circ \text{ N} = \mu_s (9^\circ/\text{kg}) \times (9/8^\circ \text{ N/kg})$$

$$\mu_s = \frac{30^\circ \text{ N}}{(9^\circ/\text{kg})(9/8^\circ \text{ N/kg})} = 0/34$$

(پ)

$$f_k = \mu_k F_N = \mu_k (mg) = (0/20) (9^\circ/\text{kg}) (9/8^\circ \text{ N/kg}) = 176/2 \text{ N}$$

جهت محور افقی را به طرف راست انتخاب می‌کنیم :

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۱. و ۲. قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص
 الف) سببی را در نظر بگیرید که به شانه‌ای درختی آویزان است و سببی از درخت جدا می‌شود.
 الف) با رسم شکل نیروهای وارده بر سببی را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. (با هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟)
 الف) دانش‌آموزی به جرم $50^\circ/\text{kg}$ روی یک ترازوی فیزی در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟
 الف) (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.
 (د) در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200° N جسم $90^\circ/\text{kg}$ را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300° N جسم را هل می‌دهد، جسم در آنسای 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 200° N جسم را هل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم $0/20$ باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

۳. در شکل روبه‌رو وقتی وزنه $20^\circ/\text{kg}$ را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 14° cm می‌شود. و وقتی وزنه $50^\circ/\text{kg}$ را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 15° cm می‌شود.
 الف) ثابت فنر چقدر است؟ (با طول عادی فنر بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟
 الف) در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارده 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) کنش‌های با سرعت ثابت در حال حرکت است.
 (پ) تانکرایی در حال بارو زدن است.
 (د) چترپازی در هوای آزاد و در امتداد قائم در حال سقوط است.
 (ه) هواپیمایی در یک سطح و رازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.
 ج) تری در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.
 الف) راننده خودرویی که با سرعت $72^\circ/\text{km/h}$ در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مأمور ایستادن پلیس متوقف می‌شود.
 الف) شتاب خودرو در مدت $2/0 \text{ s}$ متوقف می‌شود.
 (ب) از لحظه ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟
 (پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
 جرم خودرو را $1200^\circ/\text{kg}$ فرض کنید.
 الف) چترپازی از یک پلگرد عریضاً سانی که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌رود و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترپازی را از لحظه پرتاب تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

۴

$$F - f_k = ma \rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} = \frac{20^\circ \text{ N} - 176/2 \text{ N}}{90^\circ/\text{kg}} = 0/26 \text{ m/s}^2$$

$$F_e - mg = ma, a = 0 \Rightarrow F_e = mg$$

$$F_e = kx, x = l_2 - l_1 \Rightarrow k(l - l_0) = mg$$

(الف)

$$k(14^\circ/\text{cm} \times 10^{-2} \text{ m} - l_0) = (4^\circ/\text{kg})(9/8^\circ \text{ N/kg})$$

$$k(15^\circ/\text{cm} \times 10^{-2} \text{ m} - l_0) = (5^\circ/\text{kg})(9/8^\circ \text{ N/kg})$$

$$k(15^\circ/\text{cm} \times 10^{-2} \text{ m} - 14^\circ/\text{cm} \times 10^{-2} \text{ m}) = 9/8^\circ \text{ N} \rightarrow k = 98^\circ \text{ N/m}$$

(ب) مقدار به دست آمده را در یکی از روابط بالا قرار می‌دهیم :

$$(98^\circ \text{ N/m})(14^\circ/\text{cm} \times 10^{-2} \text{ m} - l_0) = (4^\circ/\text{kg})(9/8^\circ \text{ N/kg})$$

$$l_0 = 10^\circ/\text{cm} \times 10^{-2} \text{ m} = 10^\circ/\text{cm}$$

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 به وجود می‌آید؛ \vec{f}_s) زمین نیز چرخ‌ها را به جلو هل می‌دهد که به این نیرو، نیروی پیشران می‌گویند ($\vec{F}_{\text{پیشران}}$).

وقتی خودرو شروع به حرکت می‌کند نیروی مقاومت هوا به خودرو نیروی 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



۱. در شکل رویه‌رو وقتی وزن 20 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 14 cm می‌شود، و وقتی وزن 30 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 15 cm می‌شود.

الف) ثابت فنر چقدر است؟ (ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

۲. 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.

ج) قایقرانی در حال بارو زدن است.

د) چترپازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.

ه) هواپیمایی در یک سطح ورازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.

۳. نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟

الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟

ب) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ج) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

د) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ه) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

و) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ز) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ح) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ط) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ی) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ک) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ل) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

م) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ن) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

س) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ص) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ض) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ط) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ی) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ک) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ل) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

م) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ن) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

س) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ص) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ض) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ط) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ی) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ک) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

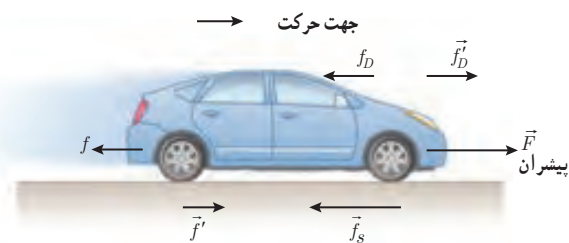
ل) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

م) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

ن) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد، و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت چقدر خواهد شد؟

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}').



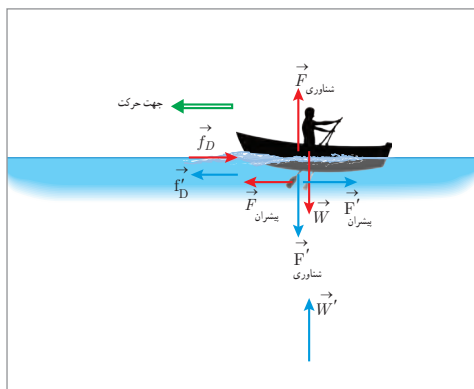
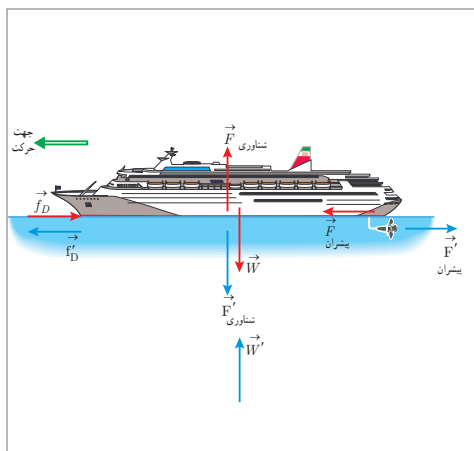
ب) \vec{f}_D : نیروی مقاومت شاره (آب) در خلاف جهت حرکت از طرف شاره بر کشتی وارد می‌شود.

شنواری \vec{F} : نیروی شنواری که از طرف شاره (آب) به طرف بالا بر کشتی وارد می‌شود.

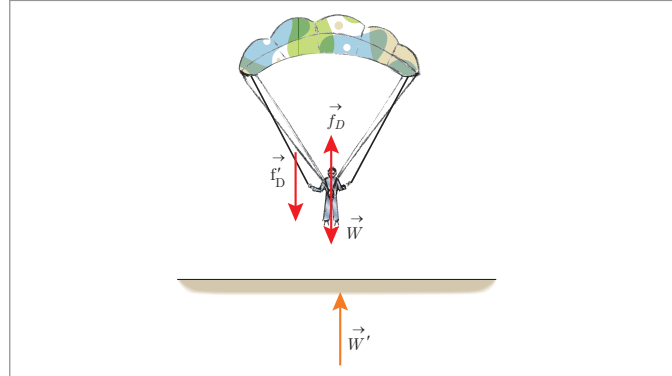
\vec{W} : نیروی وزن که از طرف زمین به جسم به طرف پایین وارد می‌شود.

پیشران \vec{F} : نیرویی که از طرف شاره به کشتی به طرف جلو وارد می‌شود. این نیرو به علت مثلاً چرخش پروانه‌ها و هل دادن آب به طرف عقب حاصل می‌شود یعنی وقتی موتور کشتی سبب چرخش پره‌ها می‌شود، در چرخش پره‌ها، آب دریا به طرف عقب هل داده می‌شود و آب نیز پره‌ها را به طرف جلو هل می‌دهد که به این نیرو، نیروی پیشران می‌گوییم. واکنش این نیروها در شکل مشخص شده است. ضمناً از نیروی مقاومت هوا می‌توانیم صرف نظر کنیم.

پ) قایقران با پارو آب را به طرف عقب هل می‌دهد، آب نیز به پارو نیرویی رو به جلو وارد می‌کند که می‌توانیم نام آن را نیروی پیشران (\vec{F}) بگذاریم. نیروی وزن، شنواری و نیروی مقاومت شاره نیروهای دیگری هستند که به قایق وارد می‌شوند. این نیروها و واکنش آنها روی شکل نشان داده شده است.



ت) بر چتر باز (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} بالابری) که به علت اختلاف فشار لایه هوایی زیر بال و بالای بال به وجود می‌آید و نیروی پیشران وقتی موتور هواپیما روشن بوده و کار می‌کند، مخلوط سوخت و هوا با شدت زیادی به طرف عقب هل 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 پیشران \vec{F} نشان می‌دهند. در مورد هواپیماهای ملخی هوا به عقب هل 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.

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۱-۲ و ۲-۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص
۱. سبی را در نظر بگیرید که به شانه درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.
الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سبی را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. آیا در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟
۲. دانش‌آموزی به جرم 50 kg روی یک ترازوی فیزی در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ ($g = 9.8 \text{ N/kg}$)
الف) آسانسور ساکن است.
ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
ج) آسانسور با شتاب 1.7 m/s^2 به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.
د) آسانسور با شتاب 1.7 m/s^2 به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.
۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۴. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۵. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۶. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۷. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۸. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۹. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۱۰. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۱۱. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۱۲. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۱۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۱۴. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۱۵. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

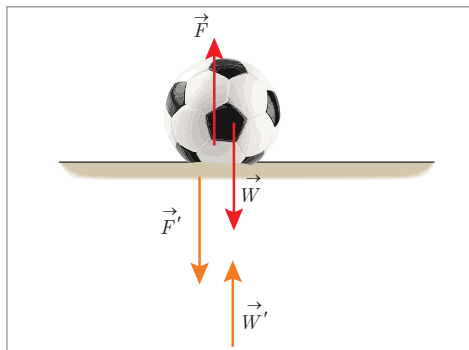
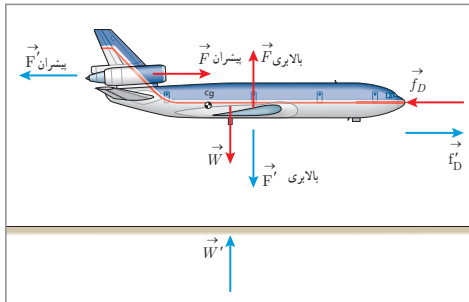
۱۶. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۱۷. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۱۸. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۱۹. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.

۲۰. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 900 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.



$$v^{\text{f}} = v_0^{\text{f}} + a \Delta x \rightarrow a = \frac{v^{\text{f}} - v_0^{\text{f}}}{\Delta x} = \frac{0 - (20 \text{ m/s})^{\text{f}}}{2(20 \text{ m})} = -10 \text{ m/s}^2 \quad \text{الف)}$$

$$\Delta x = \frac{v + v_0}{2} t \rightarrow t = \frac{v + v_0}{\Delta x} = \frac{0 + (20 \text{ m/s})}{2(20 \text{ m})} = 0.5 \text{ s} \quad \text{ب)}$$

فصل دوم : دینامیک و حرکت دایره‌ای ۱۰۵

پرستش‌ها و مسئله‌های فصل ۲



۱. در شکل روبه‌رو وقتی وزنه 200 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 140 cm می‌شود، و وقتی وزنه 300 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 150 cm می‌شود.

الف) ثابت فنر چقدر است؟ (ب) طول عادی فنر (یعنی وزنه) چند سانتی‌متر است؟

۲. 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.

ج) تانکری در حال بارون‌زدن است.

د) چترپازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.

ه) هواپیمایی در یک سطح پروازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.

۳. چترپازی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد. راننده خودرویی که با سرعت 72 km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دماغین اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت 200 m متوقف می‌شود.

الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟

ب) از لحظه ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟

پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟

ج) جرم خودرو را 1400 kg فرض کنید.

۴. چترپازی از یک پالتگر طریاً سبک‌تر است که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌رود و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترپازی را از لحظه پرتاب تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

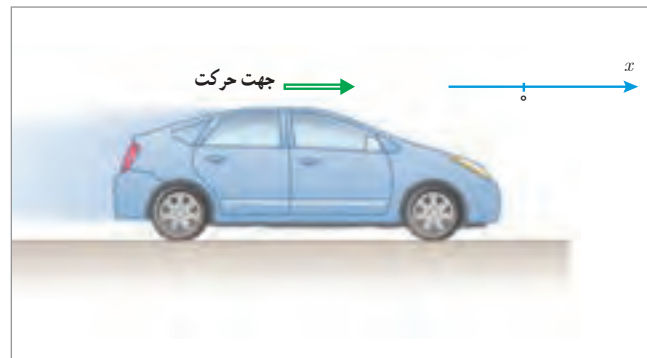


الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟
ب) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد و ضربه اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.20 باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

پ) جرم خودرو را 1200 kg در نظر 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:

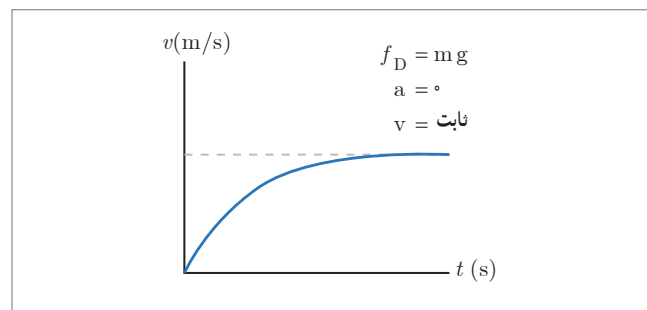
$$-f_{\text{اصطکاک}} = ma \rightarrow -f_{\text{اصطکاک}} = (1200\text{ kg})(-10\text{ m/s}^2)$$

$$f_{\text{اصطکاک}} = 12000\text{ N}$$



۷ حرکت چترپاز را در سه حالت بحث می‌کنیم. در همه حالت‌ها فرض می‌کنیم چترپاز روی مسیر مستقیم حرکت می‌کند و اثر باد و عوامل دیگر را در نظر نمی‌گیریم.

الف) چترپاز بلافاصله پس از پرش، چتر خود را باز می‌کند. در این حالت نیروی مقاومت هوا در ابتدا ناچیز است. با افزایش تندی چترپاز این نیرو افزایش پیدا می‌کند تا اینکه اندازه این نیرو با اندازه وزن برابر شود. در این حالت شتاب چترپاز صفر شده و چترپاز با تندی حدی به حرکت خود ادامه می‌دهد تا به زمین برسد.



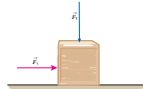
۱. در شکل زیر، نیروی F_1 و F_2 بزرگی 200 N و 300 N به جسم وارد شده است. اما چه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم F_3 که چه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کیت‌های را چگونه تغییر می‌کند؟

۲. وزنه‌ای با جرم 200 kg را به انتهای فنری به طول 12 cm که ثابت آن 200 N/cm است می‌نیمیم 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 2 m/s رو به پایین در حرکت است. پ) آسانسور با شتاب ثابت 2 m/s^2 از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند. ت) آسانسور با شتاب ثابت 2 m/s^2 از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۳. برای یک راننده داشتن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، کل مسافت توقف، دو قسمت دارد: مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظه دیدن مانع تا ترمز گرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).

۴. دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بررسی کنید. ب) زمان واکنش راننده‌ای 0.4 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18 m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید. پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 5 s 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 1500 kg فرض کنید. پ) یک خودروی باری با قطب افقی محکم، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 22 N و

فیزیک ۳



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جسم ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جسم ب) اندازه پیشینی نیروی اصطکاک ایستایی ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۵. می‌خواهیم جسمی که بر آن 1500 kg است، شتاب 200 m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نمود. الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند. ب) جسم روی سطح افقی با ضربه اصطکاک 0.20 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.

۶. قطعه چوبی را با سرعت افقی 10 m/s روی سطحی افقی رها می‌کنیم. ضربه اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.20 است.

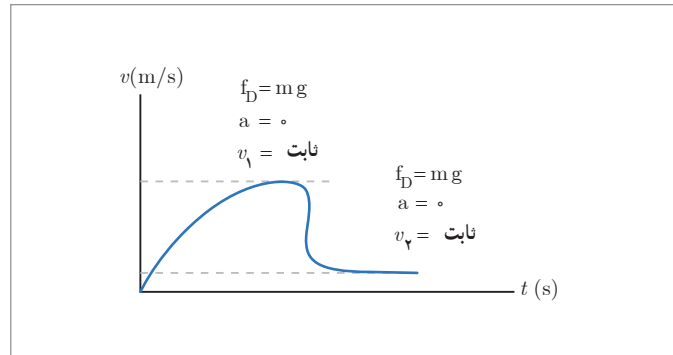
الف) چوب پس از پیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟

ب) اگر از یک قطعه چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه چوب اول و ضربه اصطکاک جنبشی آن با سطح

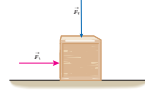
افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت رها شود، مسافت پیموده شده آن چند برابری می‌شود؟

۵۸

ب) چتر باز مدتی پس از پرش، چترش را باز می‌کند. در این حالت تندی چتر باز 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 چتر باز کند خواهد شد و نیروی مقاومت هوا آن قدر کاهش پیدا می‌کند تا با وزن هم‌اندازه شود، در این حالت به تندی حدی ثانویه می‌رسد.



الف) در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی 20 N به جبهه وارد شده است. اما جبهه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت وزنی نیروی قائم F_2 که جبهه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟



الف) اندازه نیروی عمودی صعودی سطح وارد بر جبهه
ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جبهه
ج) اندازه پیشینه نیروی اصطکاک ایستایی

د) می‌خواهیم به جسمی که جرم آن 10 kg است، شتاب 2 m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نمود.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک 0.2 به طرف راست حرکت کند، و شتاب نیز به طرف راست باشد.

ج) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.
د) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

ه) قطعه چوبی را با سرعت افقی 10 m/s روی سطحی افقی برتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.2 است.

الف) چوب پس از بیرون چه مسافتی می‌پیماید؟
ب) اگر از یک قطعه چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح

افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت برتاب شود، مسافت پیموده شده آن چند برابر می‌شود؟

الف) آسانسور با سرعت ثابت 2 m/s رو به پایین در حرکت است.

ب) آسانسور با شتاب ثابت 2 m/s^2 از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.

ج) آسانسور با شتاب ثابت 2 m/s^2 از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

د) 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 لحظه دیدن مانع تا برترگرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).

الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
ب) زمان واکنش راننده‌ای 0.4 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 8 m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

ج) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 0.5 s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
د) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را 1500 kg فرض کنید.

ه) یک خودروی باری با شتاب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 220 N و

کل مسافت ترمز - مسافت ترمز - مسافت واکنش

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

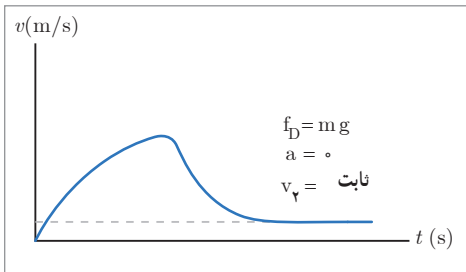
کل مسافت توقف

مسافت واکنش

مسافت ترمز

کل مسافت توقف

اگر چتر باز قبل از رسیدن به تندی حدی اولیه چترش را باز کند، نمودار به صورت شکل روبه‌رو خواهد شد.



۸ نیروهای وارد بر جسم متوازن اند. بنابراین $a = 0$ است و داریم:

$$F_N = W + F_\gamma, F_\gamma = f_s$$

$$(F_N = F_\gamma + W) \quad \text{الف) افزایش می‌یابد}$$

$$(f_s = F_\gamma) \quad \text{ب) ثابت می‌ماند (ثابت)}$$

$$(f_{s, \max} = \mu_s F_N = \mu_s (F_\gamma + W)) \quad \text{پ) افزایش می‌یابد}$$

$$(f_s = 0) \quad \text{ت) ثابت می‌ماند (نیروی خالص در همه حالت‌ها صفر باقی می‌ماند)}$$

$$F - f_k = ma \rightarrow F = ma = (5 \text{ kg})(2 \text{ m/s}^2) = 10 \text{ N} \quad \text{الف)}$$

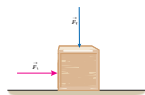
$$F_N = mg = (5 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 49 \text{ N} \quad \text{ب)}$$

$$f_k = \mu_k F_N = (0.2)(49 \text{ N}) = 9.8 \text{ N}$$

فصل دوم : دینامیک و حرکت دایره‌ای ۱۰۷

فصل دوم

۱. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی 20 N به جبهه وارد شده است، اما هیچ‌چیز مانع آن نیست. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم F_2 که جبهه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جبهه
ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستای وارد بر جبهه
ج) اندازه نیروی اصطکاک ایستای وارد بر جبهه
د) نیروی خالص وارد بر جبهه

۲. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن 15 kg است، شتاب 2 m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نمود.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک 0.2 به طرف راست حرکت کند، و شتاب نیز به طرف راست باشد.
ج) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.
د) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۳. قطعه چوبی را با سرعت افقی 10 m/s روی سطحی افقی رها می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.4 است.
الف) چوب پس از پیوند چه مسافتی می‌پیماید؟
ب) اگر از یک قطعه چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت رها شود، مسافت پیموده آن چند برابر می‌شود؟

۴. آسانسور با سرعت ثابت 2 m/s رو به پایین در حرکت است.

۵. آسانسور با شتاب ثابت 2 m/s^2 از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.

۶. آسانسور با شتاب ثابت 2 m/s^2 از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۷. برای یک راننده داشتن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، کل مسافت توقف، دو قسمت دارد: مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظه دیدن مانع تا بریزگرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمزگرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).



۸. دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.

۹. زمان واکنش رانندگی 0.75 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 10 m را طی می‌کند. فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

۱۰. اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 50 m متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.

۱۱. وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را 1500 kg فرض کنید.

۱۲. یک خودروی باری با قطب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 220 N و

$$F - f_k = ma \rightarrow F = f_k + ma = (9/8 \text{ N}) + (5/0 \text{ kg})(2/0 \text{ m/s}^2) = 19/8 \text{ N}$$

(پ)

$$F - mg = ma \rightarrow F = mg + ma = m(g + a) = (5/0 \text{ kg})(9/8 \text{ m/s}^2 + 2/0 \text{ m/s}^2) = 59 \text{ N}$$

(ت)

$$F - mg = ma, a = -2/0 \text{ m/s}^2$$

$$F = m(g + a) = (5/0 \text{ kg})(9/8 \text{ m/s}^2 + (-2/0 \text{ m/s}^2)) = 39 \text{ N}$$

خوب است پس از حل این مسئله، از دانش آموزان بخواهیم که بگویند از حل آن چه نتیجه‌ای گرفتند؟

۱۰

الف) نیروها در راستای قائم متوازن اند :

$$F_N - mg = 0 \rightarrow F_N = mg$$

قانون دوم را در راستای حرکت به کار می‌بریم :

$$0 - f_k = ma \rightarrow -\mu_k F_N = ma \rightarrow -\mu_k mg = ma \rightarrow a = -\mu_k g$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شتاب حرکت مستقل از جرم است.

$$a = 0/2 \text{ (} 9/8 \text{ m/s}^2 \text{)} = -1/96 \text{ m/s}^2$$

$$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta x \rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - v_0^2}{-2\mu_k g} = \frac{v_0^2}{2\mu_k g}$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مسافت طی شده نیز مستقل از جرم است.

$$\Delta x = \frac{(10/0 \text{ m/s})^2}{2(0/2)(9/8 \text{ m/s}^2)} = 25/0 \text{ m}$$

ب) همان‌طور که در قسمت الف گفته شد، شتاب و جابه‌جایی مستقل از جرم هستند.

۱۱

الف و ب) برای سادگی g را 10 m/s^2 فرض می‌کنیم.

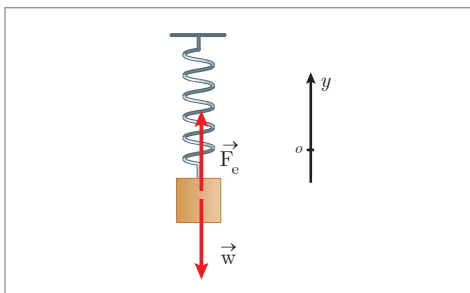
$$F_e - W = ma, a = 0$$

$$F_e = W \rightarrow k(l - l_0) = mg$$

$$(20 \times 10^3 \text{ N/m})(l - 12 \times 10^{-2} \text{ m}) = (2/0 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)$$

$$l - 12 \times 10^{-2} \text{ m} = 1/0 \times 10^{-2} \text{ m} \rightarrow l = 13 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$l = 13 \text{ cm}$$



(پ)

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

$$F_e - mg = ma \rightarrow F_e = mg + ma = m(g + a)$$

$$k(l - l_e) = m(g + a) \rightarrow (2^\circ \times 1^\circ \text{N/m})(l - 12 \times 1^\circ \text{m}) = (2/^\circ \text{kg})(1^\circ \text{m/s}^2 - 2/^\circ \text{m/s}^2)$$

$$l - 12 \times 1^\circ \text{m} = \frac{16 \text{N}}{2^\circ \times 1^\circ \text{N/m}} = 8 \times 1^\circ \text{m}$$

$$l = 12/8 \times 1^\circ \text{m} = 12/8 \text{ cm}$$

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

(ت)

$$F_e = m(g + a) \rightarrow k(l - 12 \times 1^\circ \text{m}) = (2/^\circ \text{kg})(1^\circ \text{m/s}^2 + 2/^\circ \text{m/s}^2)$$

$$l - 12 \times 1^\circ \text{m} = \frac{24 \text{N}}{2^\circ \times 1^\circ \text{N/m}} \rightarrow l = 13/2 \times 1^\circ \text{m} = 13/2 \text{ cm}$$

۱۲

الف) اندازه سرعت خودرو و زمان واکنش (طبق رابطه $\Delta x = v\Delta t$)

$$\Delta x = v\Delta t \rightarrow v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{18 \text{ m}}{6^\circ \text{s}} = 3^\circ \text{m/s} = 1^\circ 8 \text{ km/h}$$

(ب)

$$\Delta x = \left(\frac{v + v_0}{2}\right)\Delta t = \left(\frac{0 + 3^\circ \text{m/s}}{2}\right)(5^\circ \text{s}) = 75 \text{ m}$$

(پ)

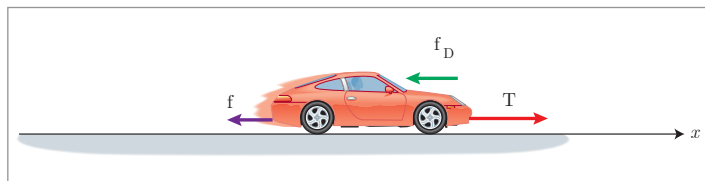
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{\Delta t} = \frac{0 - 3^\circ \text{m/s}}{5^\circ \text{s}} = -6^\circ \text{m/s}^2$$

$$\text{نیروی خالص} = F_{\text{net}} = ma = (150^\circ \text{kg})(-6^\circ \text{m/s}^2) = -9/^\circ \times 1^\circ \text{N}$$

(ت)

علامت منفی نشان می‌دهد جهت نیروی خالص در خلاف جهت حرکت خودرو است.

۱۳



$$T - (f + f_D) = ma, a = 0$$

(الف)

$$T = f + f_D = 22^\circ \text{N} + 38^\circ \text{N} = 60^\circ \text{N}$$

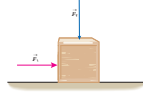
(ب)

$$T - (f + f_D) = ma \rightarrow T - 60^\circ \text{N} = (150^\circ \text{kg})(2/^\circ \text{m/s}^2)$$

$$T = 360^\circ \text{N}$$

فصل ۳

۱. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی 2°N بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم F_2 که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه
ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه
ج) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی

۲. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن 150°kg است، شتاب $2/^\circ \text{m/s}^2$ بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نمود.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک 0.2 به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.

ج) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.

د) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۳. قطعه چوبی را با سرعت افقی 1°m/s روی سطحی افقی رها می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.4 است.

الف) چوب پس از بیستون چه مسافتی می‌پیماید؟

ب) اگر از یک قطعه چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی یا اولی یکسان باشد و با همان سرعت رها شود، مسافت پیموده شده آن چند برابر می‌شود؟



مسافت توقف
مسافت ترمز
مسافت واکنش

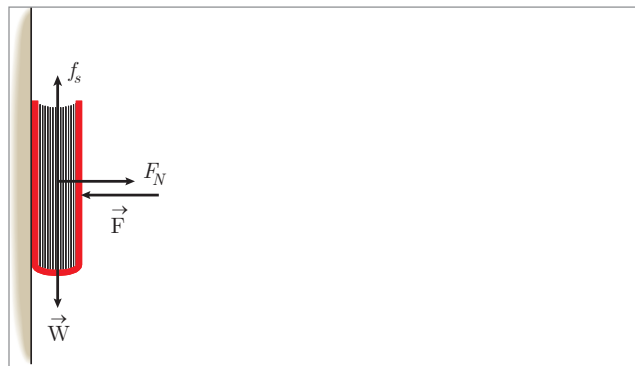
۴. دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.

۵. زمان واکنش رانندگی 0.6°s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18 m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

۶. اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 5°s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.

۷. توقف خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را 1500°kg فرض کنید.

۸. یک خودروی باری با قطب افقی محکم، یک خودروی سواری به جرم 1500°kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 22°N و



(ب)

$$f_s - W = ma, a = 0$$

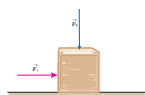
$$f_s = W = mg = (2/5 \text{ kg})(9/8 \cdot 10 \text{ m/s}^2) = 24/5 \text{ N}$$

(پ) خیر تغییر نمی کند زیرا f_s هم اندازه با وزن است. بنابراین با افزایش F فقط F_N زیاد می شود زیرا $F_N = F$ است.

فصل دوم: دینامیک و حرکت دایره ای ۱۰۹

فیروزه ۳۳

۱. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی 20 N به جبهه وارد شده است. اما جبهه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت وزنی نیروی قائم F_2 که جبهه را به زمین می فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کشتی های زیر چگونه تغییر می کنند؟



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جبهه
ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جبهه
ج) اندازه پیشینه نیروی اصطکاک ایستایی

۲. می خواهیم به جسمی که جرم آن 5 kg است، شتاب 2 m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف نظر می شود.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.

ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک 0.4 به طرف راست حرکت کند. و شتاب نیز به طرف راست باشد.

ج) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.

د) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۳. قطعه چوبی را با سرعت افقی 10 m/s روی سطحی افقی رها می کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.4 است.

الف) چوب پس از بیستون چه مسافتی می پیماید؟

ب) اگر از یک قطعه چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت رها شود، مسافت پیموده شده آن چند برابر می شود؟

۴. وزنه ای به جرم 2 kg را به انتهای تری به طول 12 cm ثابت آن 20 N/cm است می بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می کنیم. طول فنر را در حالت های زیر محاسبه کنید.

الف) آسانسور ساکن است.

ب) آسانسور با سرعت ثابت 2 m/s رو به پایین در حرکت است.

ج) آسانسور با شتاب ثابت 2 m/s^2 از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.

د) آسانسور با شتاب ثابت 2 m/s^2 از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۵. برای یک راننده داشتن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان طور که شکل نشان می دهد، کل مسافت توقف، دو قسمت دارد: مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظه دیدن مانع تا ترمز گرفتن طی می کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می کند).

۶. برای یک راننده داشتن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان طور که شکل نشان می دهد، کل مسافت توقف، دو قسمت دارد: مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظه دیدن مانع تا ترمز گرفتن طی می کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می کند).



الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.

ب) زمان واکنش راننده ای 0.4 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 10 m را طی می کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

ج) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 0.4 s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.

د) زمانی که خودرو ترمز می کند، نیروی حاصل وارد بر آن چند است؟ جرم خودرو را 1500 kg فرض کنید.

۷. یک خودروی باری با شتاب افقی محکم، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 22 N و

۱۵ الف) علت این پدیده ها، ویژگی لختی است. یعنی در حالت اول که خودرو شروع به حرکت می کند، شما تمایل دارید همچنان حالت سکون خود را حفظ کنید و به همین علت به صندلی فشرده می شوید. در حالت دوم شما تمایل دارید همچنان به حرکت خود ادامه دهید و به همین علت به جلو پرتاب می شوید.

ب) کمربند ایمنی دو نقش دارد؛ اول آنکه از پرت شدن شما (جدا شدن از صندلی) به جلو، جلوگیری می کند. دوم آنکه زمان برخورد را (حدود 10° برابر) افزایش می دهد. کیسه هوا نیز دو نقش دارد؛ اول آنکه زمان برخورد شما را افزایش می دهد (حدود 10° برابر) و دوم آنکه سطح برخورد شما را با جلوی خودرو زیاد می کند (به مساحت حدود 0.5 m^2 می رساند).

با توجه به رابطه $F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ اگر Δt افزایش پیدا کند، نیروی وارد بر سرنشین کاهش پیدا می کند. مثلاً اگر کمربند ایمنی و کیسه هوا سبب افزایش 20° برابری زمان برخورد شوند، نیروی وارد بر سرنشین، 20° برابر کاهش پیدا می کند و این سبب کاهش شدید آسیب به سرنشین می شود. (البته این افزایش زمان در کنار افزایش مساحت برخورد جراحتهای ناشی از برخورد را کاهش می دهد)

۱۶

الف

$$\Delta p = m \Delta v, v_1 = 15/10 \text{ m/s}, v_2 = -22/10 \text{ m/s}$$

$$\Delta p = (0.28 \text{ kg})(-22/10 \text{ m/s} - (+15/10 \text{ m/s})) = -10/36 \text{ kg.m/s} = -10/4 \text{ kg.m/s} \Rightarrow |\Delta p| = 10/4 \text{ kg.m/s}$$

$$F_{av} = \frac{|\Delta p|}{\Delta t} = \frac{10/36 \text{ kg.m/s}}{0.06 \text{ s}} = 172/6 \text{ N} \approx 173 \text{ N}$$

(ب)

۱۷ تغییر تکانه توپ برابر با مساحت سطح زیر نمودار $F-t$ است:

$$\Delta p = S = \frac{(2/5 \times 10^{-3} \text{ s} - 1/10 \times 10^{-3} \text{ s})(20/10 \times 10^3 \text{ N})}{2} = 15 \text{ kg.m/s}$$

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{15 \text{ kg.m/s}}{1/5 \times 10^{-3} \text{ s}} = 10/1 \times 10^4 \text{ N}$$

فصل دوم، ۳۲

۳۲. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟

ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین چقدر است؟

۳۳. الف) دو جسم در فاصله $2 \times 10^{-3} \text{ m}$ از هم، یکدیگر را با نیروی

گرانشی کوچک $1 \times 10^{-10} \text{ N}$ جذب می‌کنند. اگر جرم یکی

از اجسام $5 \times 10^{-3} \text{ kg}$ باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟

۳۴. ماهواره‌ای به جرم $5 \times 10^3 \text{ kg}$ در مداری دایره‌ای به ارتفاع

2800 km بالاتر از سطح زمین، به دور آن می‌چرخد.

الف) نیروی گرانشی وارد بر ماهواره

ب) شتاب ماهواره

ج) مدت ماهواره

د) دوره تناوب ماهواره را در این ارتفاع بدست آورید.

۳۵. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به

نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟

ب) اگر جرم ماهواره‌ای $5 \times 10^3 \text{ kg}$ باشد، وزن آن در ارتفاع

3600 km کیلومتری از سطح زمین خواهد شد؟

۶۰

(ب)

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2 / 8275 \times 10^{-3} \text{ N}}{600 \text{ kg}} = 4 / 71 \text{ m/s}^2$$

(پ)

$$F = m \frac{v^2}{r} \rightarrow G \frac{M_e m}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \rightarrow v = \sqrt{\frac{G M_e}{r}} =$$

$$\sqrt{\frac{(6 / 67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2})(5 / 98 \times 10^{24} \text{ kg})}{(9200 \times 10^3 \text{ m})}} = 6 / 58 \times 10^3 \text{ m/s}$$

(ت)

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2(3 / 14)(9200 \times 10^3 \text{ m})}{6 / 58 \times 10^3 \text{ m/s}} = 878 \text{ s} = 8 / 78 \times 10^3 \text{ s}$$

۲۲

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\frac{G M_e m}{(R_e + h)^2}}{\frac{G M_e m}{R_e^2}} = \left(\frac{R_e}{R_e + h}\right)^2 \rightarrow \frac{1}{2} = \left(\frac{R_e}{R_e + h}\right)^2 \rightarrow \sqrt{2} R_e = R_e + h \rightarrow h = (\sqrt{2} - 1) R_e \approx 2651 \text{ km}$$

(الف)

$$\frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{R_e}{R_e + h}\right)^2 \Rightarrow \frac{W_2}{(250 \text{ kg})(9 / 8 \text{ N/kg})} = \left(\frac{6400 \text{ km}}{6400 \text{ km} + 3600 \text{ km}}\right)^2 \Rightarrow W_2 = 55 / 8 \text{ N}$$

(ب)

۲۳

$$g_s = G \frac{M_s}{r^2} = (6 / 67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}) \frac{(1 / 99 \times 10^{30} \text{ kg})}{(149 / 6 \times 10^9 \text{ m})^2} = 5 / 9 \times 10^{-3} \text{ N/kg}$$

(الف)

همان گونه که ملاحظه می‌شود این مقدار در مقابل شتاب گرانش زمین در سطح آن بسیار ناچیز است.

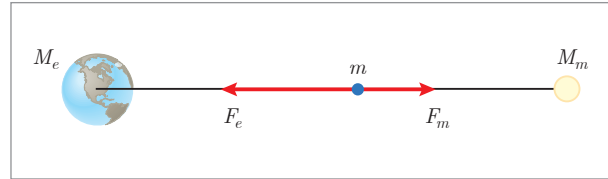
$$g_m = G \frac{M_m}{r^2} = (6 / 67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}) \frac{(7 / 36 \times 10^{22} \text{ kg})}{(3 / 84 \times 10^8 \text{ m})^2} = 3 / 33 \times 10^{-5} \text{ N/kg}$$

(ب)

همان گونه که ملاحظه می‌شود این مقدار در مقابل شتاب گرانش زمین در سطح آن بسیار ناچیز است.

۳۰-۲ نیروی گرانشی

۳۰-۱. دو جسم در فاصله $2 \times 10^{-3} \text{ m}$ از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک $1 \times 10^{-10} \text{ N}$ جذب می‌کنند. اگر جرم یکی از اجسام $5 \times 10^{-3} \text{ kg}$ باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟
 ۳۰-۲. ماهواره‌ای به جرم $5 \times 10^3 \text{ kg}$ در معاری دایره‌ای به ارتفاع 2800 کیلومتر از سطح زمین، به دور آن می‌چرخد.
 (الف) نیروی گرانشی وارده بر ماهواره
 (ب) شتاب ماهواره
 (ج) دوره تناوب ماهواره را در این ارتفاع بدست آورید.
 ۳۰-۳. (الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟
 (ب) اگر جرم ماهواره‌ای 250 kg باشد، وزن آن در ارتفاع 24000 کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟
 ۳۰-۴. (الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟
 (ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین چقدر است؟
 ۳۰-۵. (الف) سفینه‌ای به جرم $5 \times 10^4 \text{ kg}$ در وسط فاصله بین زمین و ماه قرار دارد. نیروی گرانشی خالصی را که از طرف زمین و ماه به این سفینه در این مکان وارد می‌شود بدست 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)

$$F_{net} = F_{\text{زمین}} - F_{\text{ماه}} = G \frac{M_m m}{r^2} - G \frac{M_e m}{r^2} = G \frac{m}{r^2} (M_e - M_m)$$

$$= (6/67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}) \frac{(3/0 \times 10^3 \text{ kg})}{(\frac{384}{2} \times 10^6 \text{ m})^2} (5/98 \times 10^{24} \text{ kg} -$$

$$7/36 \times 10^{22} \text{ kg}) = 3/2 \times 10^{-2} \text{ N}$$

(ب)

$$F_{\text{زمین}} = F_{\text{ماه}} \rightarrow G \frac{M_e m}{x^2} = G \frac{M_m m}{(r-x)^2} \rightarrow \frac{M_e}{x^2} = \frac{M_m}{(r-x)^2} \rightarrow \frac{x^2}{(r-x)^2} = \frac{M_e}{M_m}$$

$$\frac{x}{3/84 \times 10^5 \text{ km} - x} = \sqrt{\frac{M_e}{M_m}} = \sqrt{\frac{5/98 \times 10^{24} \text{ kg}}{7/36 \times 10^{22} \text{ kg}}} = 9/01$$

$$x = \frac{9/01 \times 3/84 \times 10^5 \text{ km}}{10} = 3/46 \times 10^5 \text{ km}$$

فصل سوم

نوسان و موج

۳-۱- نوسان دوره‌ای

۳-۲- حرکت هماهنگ ساده

۳-۳- انرژی در حرکت هماهنگ ساده

۳-۴- تشدید

۳-۵- موج و انواع آن

۳-۶- مشخصه‌های موج

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

پیامدها

دانش‌آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- حرکت هماهنگ ساده را به عنوان 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 پدیده 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 چشمه 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.
- هر جسم بسامدی طبیعی دارد که اگر با همان بسامد به نوسان واداشته شود، دامنه 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، دوره 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 به صورت انرژی جنبشی و پتانسیل، بلکه به صورت 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 گستره‌شنوایی انسان وسیع است، راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایهٔ ۱۰) استفاده کنیم.
- ارتفاع و بلندی دو ویژگی تَن 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 در نظر 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 به وجود می‌آیند؟
- یک موج را با چه مشخصه‌هایی می‌توان تمیز داد؟
- تندی انتشار موج به چه عواملی بستگی دارد؟
- امواج الکترومغناطیسی چگونه به وجود 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

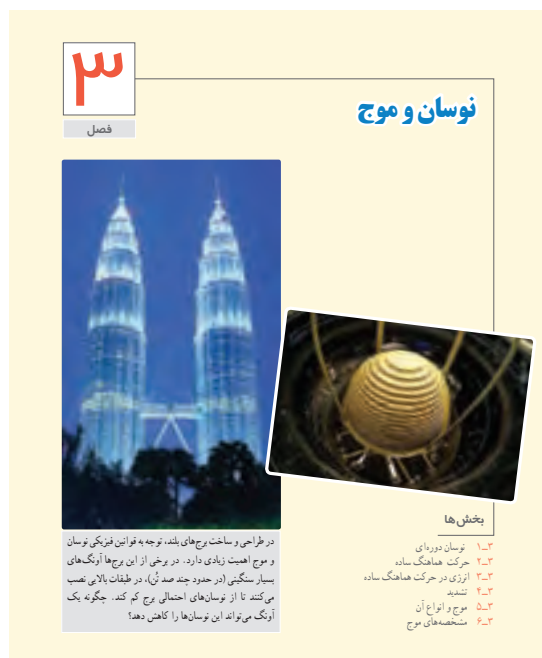
با مفاهیم نوسان دوره‌ای، حرکت هماهنگ ساده، بسامد زاویه‌ای، دورهٔ تناوب جرم – فنر و آونگ، انرژی در حرکت هماهنگ ساده، بسامد طبیعی و تشدید، موج و انواع آن، موج‌های پیش‌رونده، مشخصه‌های موج، موج‌های الکترومغناطیسی و صوتی، شدت و تراز شدت صوت، ارتفاع و بلندی صوت و اثر دوپلر آشنا می‌شوند.

ب) مهارتی

پدیده‌های نوسانی دنیای اطراف خود را براساس مفاهیم این فصل می‌تواند توجیه کند. با استفاده از معادله مکان – زمان در حرکت هماهنگ ساده می‌تواند به توصیف حرکت هماهنگ ساده بپردازد. با نوسان‌نگار آشنا می‌شود و می‌تواند از آن برای ثبت نوسان‌ها استفاده کند. با سامانه جرم – فنر و آونگ ساده آشنا می‌شود و می‌تواند دوره تناوب نوسان آنها را به دست 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، دیابازن و ... را توضیح دهد و به توجیه کار آنها بپردازد. می‌تواند تراز شدت‌های صوت صداها را اطراف خود را محاسبه کند. گستره شنوایی خود را می‌شناسد و می‌تواند تغییر بسامدی را که از صدای چشمه‌های صوتی متحرک درک می‌کند توجیه کند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

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



آونگ نقش میراگرِ نوسان را بازی می‌کند و با نوسان ناهمگام با نوسان ساختمان موجب تضعیف آن می‌شود. مثال‌هایی از این دست فراوانند. یک نمونه برج هینکاک^۱ در بوستون آمریکا به طول ۲۴۱ متر است که جرم آونگ به کار رفته در آن ۳۰۰,۰۰۰ کیلوگرم است. همچنین برجی در چین تاییه به طول ۵۰۸ متر، آونگی به جرم ۶۸۰,۰۰۰ کیلوگرم دارد. ولی میراگرها می‌توانند غیر از آونگ هم باشند. مثلاً تصویر اول فصل ۳ رشته ریاضی فیزیک مربوط به برج پتروناس^۲ در مالزی است که در آن پلی هوایی به طول ۵۸/۴m و جرم ۷۵۰ تن که به دو ساق تکیه‌گاه متصل اند نقش میراگر نوسان را بازی می‌کنند. یک نوع دیگر میراگرها یک وسیله جرم- 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 به طور 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.

در این فیلم یک نمونه آزمایشی میراگر را می‌بینید.



در این فیلم میراگرهای نسل سوم سازه‌ها را مشاهده می‌کنید.



۱- Hancock tower

۲- 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 کلیه حرکت‌های میرا، حرکت غیردوره‌ای محسوب می‌شوند، زیرا تفاوت دوره‌های متوالی محسوس است.

پاسخ پرسش ۱-۳

همان‌طور که در متن کتاب آمده، نمودار الکتروکاردیوگرام نشان داده شده در شکل ۲-۳ مربوط به ضربان قلبی با دوره تناوب $0.92s$ است. بنابراین برای بسامد داریم:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.92s} = 1.09 \text{ Hz} \approx 1.1 \text{ Hz}$$

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 ۱-۳). مطالعه و کنترل نوسان‌ها در سازه‌های مختلف دو هدف اصلی فیزیکدان‌ها و مهندسان است. در این فصل نوعی نوسان موسوم به **نوسان دوره‌ای** و نمونه‌ای مشهور از این نوع نوسان‌ها به نام **حرکت هماهنگ ساده** را بررسی می‌کنیم. در ادامه با پدیده تشدید و سیس 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.

۱-۳ نوسان دوره‌ای

نوسان‌ها می‌توانند دوره‌ای یا غیردوره‌ای باشند؛ مثلاً شکل ۲-۳ تصویری از ضربان‌ها (ریتم) قلب یک شخص را نشان می‌دهد که در هر دقیقه ۶۵ بار می‌زند. نقش‌های این تصویر به‌طور منظم تکرار می‌شوند، که به آن **جرعه** (سیگنال) نوسان گفته می‌شود. چنین نوسان‌هایی را که هر جرعه آن در دوره‌ای دیگر تکرار شود **نوسان‌های دوره‌ای** می‌نامند. مدت زمان یک جرعه، **دوره تناوب** حرکت نامیده می‌شود و آن را با T نشان می‌دهند. پناه این تعریف، دوره تناوب ضربان قلب این شخص $\frac{1}{65}$ دقیقه، یا $0.92s$ است.

شکل ۱-۳ الف) آیدان ضربان قلب انسان به تاب خوردن، بالا و پایین رفتن سرنشینان کشتی، زمین‌لرزه، نوسان‌های امواج صوتی هستند.

شکل ۲-۳ نوسان‌های انجام شده (عدد جرعه) در هر ثانیه **بسامد** (فرکانس) نامیده می‌شود و آن را با f نشان می‌دهند. بنابراین:

(۱-۳) $f = \frac{1}{T}$ (بسامد)

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

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

پرسش ۱-۳

بسامد ضربان قلب مربوط به نمودار شکل ۲-۳ چقدر است؟

۲-۳ الکتروکاردیوگرام (ECG)

۲-۳ در نمودار محور عمودی، ولتاژ و محور افقی، زمان است.

پرسشی پیشنهادی

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

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

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

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

فصل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

شکل ۲-۳: حرکت هماهنگ ساده

فصل ۳۰: نوسان و موج

دو نمونه از نوسان دورهای
 ۱۰-۱۲ نوسان مکان - زمان

۱۴-۱۵ سامانه جسم و فضا،
موری از یک حرکت هفت‌گانه ساده

۵-۴ نمودار مکان-زمان برای حرکت یک سازه

در این فیلم مقایسه حرکت آونگی و حرکت های را می بینند.



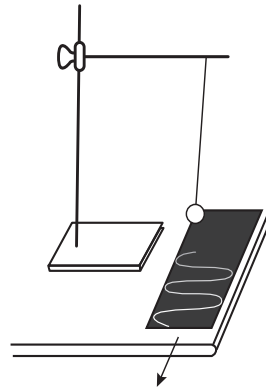
در این فیلم مقایسه حرکت جرم - فنر و



«بسامد زاویه‌ای در مورد حرکت نوسانی هماهنگ ساده به کار 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 $\omega = 2\pi f$ 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.

پاسخ فعالیت ۱-۳

روش دیگر این آزمایش که در اغلب کتاب‌های آموزشی به این صورت مطرح می‌گردد به این ترتیب است که تار مویی (یا رشته نازکی از یک سیم) را به سر وزنه آونگی می‌بندیم و در حالی که آونگ را به نوسان درمی‌آوریم، آن را روی شیشه دوداندودی قرار

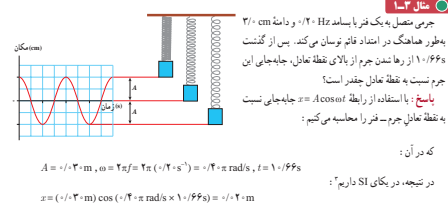


می‌دهیم که با تندی ثابت در راستای عمود بر صفحه نوسان‌های آونگ حرکت داده می‌شود. آنگاه روی صفحه دوداندود خط موج‌داری ایجاد می‌شود و بدین ترتیب نوسان‌های آونگ بر صفحه دوداندود ثبت می‌گردد. شکل بالا طرحی از این آزمایش را نشان می‌دهد. همچنین توجه کنید در تصویر فعالیت کتاب سه نوسان دیده می‌شود که بسته به تندی حرکت دیاپازون روی شیشه دوداندود حاصل شده‌اند.

فازیک ۳۲

فعالیت ۱-۳

نوسان‌نگار: نوسان‌نگار وسیله‌ای برای ثبت نوسان‌ها است. می‌خواهیم یک نوسان‌نگار ساده درست کنیم. به این منظور، یک وجه قطعه نشیمنه‌ای با طول و عرض تقریبی ۲۰ cm و ۱۰ cm را روی سطح نشیمنه‌ای نگه‌داریم تا به خوبی دوداندود شود. سپس تیغه نوک‌تیزی را به نوک یکی از شاخه‌های دیاپازون^۱ گیسامدی (در حدود ۱۰۰ Hz) محکم بچسبانیم. دیاپازون را به نوسان واداریم و آن را به سرعت روی نشیمنه دوداندود به حرکت درآوریم. طوری که آن نوک تیز تیغه روی سطح دوداندود بماند. روی نشیمنه، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن نوسان‌نگار^۲ گفته می‌شود.



تمرین ۱-۳

ذره‌ای در حال نوسان هماهنگ ساده با دوره تناوب T است. با فرض اینکه در $t = 0$ ذره در $x = +A$ باشد، تعیین کنید در هر یک از لحظات زیر، آیا ذره در $x = +A$ ، $x = -A$ ، $x = 0$ یا در $x = 0$ خواهد بود؟ (الف) $t = 2.5T$ ، (ب) $t = 3.5T$ ، (ج) $t = 5.5T$ ، (د) $t = 7.5T$

تمرین ۲-۳

در حرکت هماهنگ ساده، مکان $x(t)$ باید پس از گذشت یک دوره تناوب برای 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 $A \cos \omega(t + T) = A \cos \omega t$ و برای این $\omega T = 2\pi$ باید برقرار باشد.

^۱ Training Fork ^۲ Chalkgram

۳- اگر از ماشین حساب رای محاسبه چنین روابط استفاده می‌کنیم، وقت کنید که یک ماشین حساب روی رادان (RAD) باشد.

۶۴

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

فیلم

در اینجا خوب است توجه کنید در برخی از تمرین‌ها و مسئله‌های این مبحث، از جمله مثال ۱-۳، دانش‌آموزان ناگزیرند از ماشین حساب با قابلیت انجام محاسبه روابط مثلثاتی استفاده کنند و همان‌طور که در پانوش کتاب نیز آمده است به دانش‌آموزان گوشزد کنید در این صورت توجه کنند که در محاسباتی از قبیل آنچه در مثال ۱-۳ آمده، مُد ماشین حسابشان روی RAD باشد.

در این فیلم، نمایشی از رسم تابع سینوسی مثال ۱-۳ را می‌بینید.

فیلم

فعالیت ۱-۲

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 ۲۰ cm و ۱۰ cm را روی سطح شیبی بچسبیم تا به خوبی دودانود شود. سپس تیغه نوک‌تیزی را به نوک یکی از شاخه‌های دیپازون^۱ کم‌بسامدی (در حدود ۱۰۰ Hz) محکم چسبانیم. دیپازون را به نوسان واداریم و آن را به سرعت روی نیشته دودانود به حرکت درآوریم، طوری که اثر نوک تیز تیغه روی سطح دودانود بیفتد. روی نیشته، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن نوسان‌نگاشت^۲ گفته می‌شود.

مثال ۱-۳

جرمی متصل به یک فنر با بسامد ۲۰۰ Hz و دامنه ۲/۰ cm در حالت سکون به طور هابک در امتداد قائم نوسان می‌کند. پس از گذشت ۱/۰۶۶ s از زمان شروع جرم از بالای نقطه تعادل، جابه‌جایی این جرم نسبت به نقطه تعادل چقدر است؟

پاسخ: با استفاده از رابطه $x = A \cos \omega t$ جابه‌جایی نسبت به نقطه تعادل جرم - فنر را محاسبه می‌کنیم:

که در آن:

$$A = 2.0 \text{ cm}, \omega = 2\pi f = 2\pi(200) = 400\pi \text{ rad/s}, t = 1.066 \text{ s}$$

در نتیجه، در رنگی SI داریم^۳:

$$x = (2.0 \times 10^{-2} \text{ m}) \cos(400\pi \text{ rad/s} \times 1.066 \text{ s}) = -1.0 \times 10^{-2} \text{ m}$$

تمرین ۱-۳

ذره‌ای در حال نوسان هابک ساده با دوره تناوب T است. با فرض اینکه در $t = 0$ ذره در $x = +A$ باشد، تعیین کنید در هر یک از لحظات زیر، آیا ذره در $x = +A$ ، $x = 0$ ، یا $x = -A$ خواهد بود؟ الف) $t = 2/5 T$ ، ب) $t = 3/5 T$ ، ج) $t = 4/5 T$ ، د) $t = 5/5 T$ (ارضه‌های: برای پاسخ به این تمرین، ساده‌تر آن است که چند دوره از یک نمودار کسینوسی را رسم کنید.)

تمرین ۱-۴

در حرکت هابک ساده، مکان $x(t)$ به پس از گذشت یک دوره تناوب و با 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 $A \cos \omega(t + T) = A \cos \omega t$ برای اساس نشان دهید $\omega = 2\pi / T$.

۱- Training Fork ۲- Oscillogram ۳- اگر از ماشین حساب برای محاسبه چنین روابطی استفاده می‌کنید، وقت کنید که کم‌بسامد حساب روی رادان (RAD) باشد.

پاسخ تمرین ۱-۳

می‌توانیم زمان‌های داده شده را در معادله ۲-۳ بگذاریم و با در نظر داشتن معادله ۳-۳، 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) $t = 2/5 T$ ذره در $x = +A$ ، در ب) $t = 3/5 T$ ذره در $x = -A$ ، و در پ) $t = 5/5 T$ ذره در $x = 0$ قرار دارد.

پاسخ تمرین ۲-۳

وقتی شناسه تابع کسینوس به اندازه 2π رادیان افزایش می‌یابد، این تابع خودش را تکرار می‌کند. بنابراین اگر برای زمان دلخواه t ، نوسانگر در زمان $t + T$ برای نخستین بار به مکان خود بازگردد، به این معنی است که:

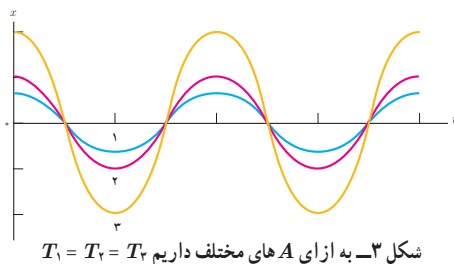
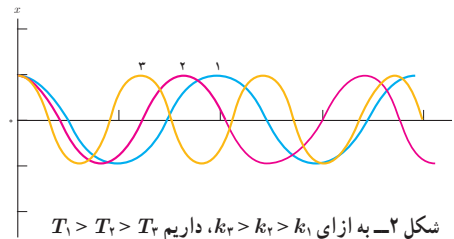
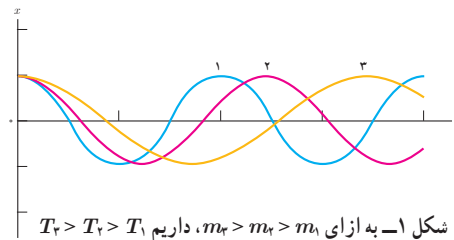
$$\omega(t + T) = \omega + 2\pi$$

و در نتیجه $\omega = 2\pi / T$ می‌شود.

در این فیلم جگونگی ساختن فنرهای عظیم را می بینید.

پاسخ فعالیت ۲-۳

در این فعالیت باید به سازوکارهای آزمایشی جهت پاسخ دهی مناسب این آزمایش ها توجه کنید. همچنین لازم است با شمردن زمان تعداد زیادی نوسان کامل، زمان یک نوسان را به دست آورید. همچنین خوب است این آزمایش ها را با دامنه های 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 دانش آموزان بخواهید با رسم نمودارهای $x-t$ ، یک بار برای سه جرم متفاوت و ثابت نگه داشتن k و A ، یک بار برای سه ثابت فنر متفاوت و ثابت نگه داشتن m و A و یک بار برای سه دامنه متفاوت و ثابت نگه داشتن m و k ، دوره های تناوب را مقایسه کنند. آنها باید به ترتیب نمودارهای نوعی شکل های ۱، ۲ و ۳ را رسم کنند.



فرانسوا هرن (۱۸۲۲-۱۸۹۰ م.) در آلمان به دنیا آمد. او در ابتدا به رشته های مهندسی و سپس فیزیک پرداخت. اما خیلی زود از آن علاقه دست کشید و به علوم پایه مل بست. او در دانشگاه رن تحصیل کرد و از شاگردان هرن می توان گفت که هرن پس از فارغ التحصیل به تحقیق در حوزه نظریه الکتریسیته و مغناطیس پرداخت. او به خاطر آزمایش های در این زمینه انجام داده دست استای فیزیک دانشگاه بریتانیا تقصیر به محسوب شد. در آنجا یک فستنه و یک گویه را راندی ساخت که مورد توجه قرار گرفته و به کمک آن خواست تندی امواج رادیو را بدست آورد. خود او، هنگامی شکای از بروز این مردمان طریقه ماکسول بود.

با انتخاب وزنه ها و فنرهای مختلف، با جرم ها و ثابت فنرهای معلوم و مناسب، در آزمایشی مطابق شکل، و با اندازه گیری زمان تعداد مشخصی نوسان کامل، و سپس محاسبه دوره تناوب T برای هر سامانه جرم- فنر، به طور تجربی نشان دهید که:

الف) دوره تناوب سامانه جرم- فنر با یک فنر معین ولی وزنه های متفاوت، با جذر جرم وزنه به طور مستقیم متناسب است ($T \propto \sqrt{m}$).
ب) دوره تناوب سامانه جرم- فنر با یک وزنه معین ولی فنرهای متفاوت، با جذر ثابت فنر به طور وارون متناسب است ($T \propto 1/\sqrt{k}$).

محاسبات و همچنین آزمایش های مشابه با آنچه در فعالیت ۲-۳ دیده نشان می دهد دوره تناوب سامانه جرم- فنر یا وزنه ای به جرم m و فنری با ثابت k برابر است با:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (۲-۳) \quad \text{(دوره تناوب سامانه جرم- فنر)}$$

بسامد زاویه ای ω را نیز می توانیم از رابطه $\omega = 2\pi/T$ به دست آوریم:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (۵-۳) \quad \text{(بسامد زاویه ای سامانه جرم- فنر)}$$

قطعه ای به جرم 680 g به فنری با ثابت فنر $k = 65 \text{ N/m}$ بسته شده است. قطعه را به اندازه مشخصی از مکان تعادل خود روی یک سطح افقی بدون اصطکاک می کشیم و از حالت سکون رها می کنیم. الف) دوره تناوب و ب) بسامد زاویه ای نوسان چقدر می شود؟

پاسخ: الف) دوره تناوب با استفاده از رابطه ۲-۳ به دست می آید:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0.68 \text{ kg}}{65 \text{ N/m}}} = 1.64 \text{ s}$$

ب) بسامد زاویه ای از رابطه ۵-۳ به دست می آید:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{65 \text{ N/m}}{0.68 \text{ kg}}} = 9.8 \text{ rad/s}$$

آزمایش‌های متعدد با جرم و فنر نشان می‌دهد که افزایش جرم m در سامانه جرم-فنر (با فنر یکسان) به گشتاد شدن نوسان‌ها، یعنی افزایش دوره تناوب T می‌انجامد. همچنین اگر این آزمایش‌ها را با وزنه‌ای به جرم ثابت ولی فنرهای با سختی متفاوت (k های متفاوت) انجام دهیم، درمی‌یابیم که با افزایش ثابت فنر k ، دوره تناوب T می‌نوسان‌ها کوتاه‌تر می‌شود.

فعالیت ۳-۳

با انتخاب وزنه‌ها و فنرهای مختلف، با جرم‌ها و ثابت فنرهای معلوم و مناسب، در آزمایشی مطابق شکل، و با اندازه‌گیری زمان تعداد مشخصی نوسان کامل، و سپس محاسبه دوره تناوب T برای هر سامانه جرم-فنر، به‌طور تجربی نشان دهید که:

الف) دوره تناوب سامانه جرم-فنر با یک فنر معین ولی وزنه‌های متفاوت، با جذر جرم وزنه به‌طور مستقیم متناسب است ($T \propto \sqrt{m}$).
 ب) دوره تناوب سامانه جرم-فنر با یک وزنه 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 ۳-۳ دیده‌تان می‌دهد دوره تناوب سامانه جرم-فنر یا وزنه‌ای به جرم m و فنری با ثابت k برای است یا:

(۳-۳) $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ (دوره تناوب سامانه جرم-فنر)
 بسماد زاویه‌ای ω را نیز می‌توانیم از رابطه $\omega = 2\pi/T$ به دست آوریم:
 (۳-۴) $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ (بسماد زاویه‌ای سامانه جرم-فنر)

مثال ۳-۳

قطعه‌ای به جرم 680 g به فنری با ثابت فنر $k = 65\text{ N/m}$ پیوسته شده است. قطعه را به اندازه مشخصی از مکان تعادل خود روی یک سطح افقی بدون اصطکاک می‌کنیم و از حالت سکون رها می‌کنیم. الف) دوره تناوب و ب) بسماد زاویه‌ای نوسان چقدر می‌شود؟

پاسخ: الف) دوره تناوب با استفاده از رابطه ۳-۳ به دست می‌آید:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0.68\text{ kg}}{65\text{ N/m}}} = 1.64\text{ s}$$

ب) بسماد زاویه‌ای از رابطه ۳-۴ به دست می‌آید:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{65\text{ N/m}}{0.68\text{ kg}}} = 9.8\text{ rad/s}$$

توجه کنید که در این کتاب صرفاً به معرفی دوره تناوب و بسماد زاویه‌ای بسنده کرده‌ایم و لذا بسماد زاویه‌ای براساس دوره 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 بسماد زاویه‌ای با محاسبه ساده‌ای از قانون دوم نیوتون به‌دست می‌آید و سپس دوره تناوب با استفاده از رابطه $T = 2\pi/\omega$ محاسبه می‌شود. در اینجا همان‌طور که اشاره شد، با توجه به اینکه دانش‌آموزان در فعالیت ۳-۲ با روش محاسبه تجربی دوره تناوب آشنا شده‌اند، دوره تناوب پیش از بسماد زاویه‌ای معرفی شده است.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ در حالت بی‌وزنی نمی‌توان جرم یک شخص را با استفاده از ترازو محاسبه کرد. یک فضاانورد 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 فضاانورد متصل است و فضاانورد با استفاده از دوره تناوب نوسان، جرم خود را تعیین می‌کند. فرض کنید ثابت فنر این فنر 606 N/m ، جرم صندلی 12 kg ، و دوره تناوب اندازه‌گیری شده $2/41\text{ s}$ باشد. جرم فضاانورد چقدر است؟

پاسخ: از رابطه ۳-۴ استفاده می‌کنیم که در اینجا جرم، مجموع جرم صندلی و فضاانورد است. در نتیجه

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

و از آنجا

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

۲ فرض کنید روی یک ترازو ایستاده‌اید و تا پیش از اینکه ترازو جرم 50 kg کیلوگرمی شما را نشان دهد، عقربه آن چندین بار با دوره تناوب 1 s حول مکان تعادل نوسان می‌کند. ثابت فنر درون این ترازو چقدر است؟

پاسخ: دوباره از رابطه ۳-۴ استفاده می‌کنیم و از آنجا ثابت فنر k را به‌دست می‌آوریم:

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

۳ $^\circ/75s$ طول می کشد تا یک دستگاه قطعه – فنر نوسانی شروع به تکرار حرکت خود کند. (الف) دوره تناوب، (ب) بسامد، و (پ) بسامد زاویه ای چقدر است؟

پاسخ :

(الف) بدیهی است که دوره تناوب برابر همان $^\circ/75s$ است.

(ب) بسامد برابر با عکس دوره تناوب است :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{^\circ/75s} = 1/3 s^{-1} = 1/3 \text{ Hz}$$

(پ) بسامد زاویه ای چنین می شود :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{^\circ/75s} = 1/4 \text{ rad/s}$$

۴ شخصی به جرم 85° kg از یک طناب کشسان با ثابت فنر 27° N/m آویزان است. شخص تا نقطه ای پایین می آید که در آن طناب 5° m بیشتر از طول کشیده نشده اش است و سپس رها می شود. اگر حرکت طناب، نوسانی ساده باشد. (الف) دامنه نوسان چقدر است؟ (ب) شخص 2° s بعد از رها شدن در کجا قرار دارد؟ (راهنمایی: $y(t) = A \cos \omega t$ است.)

پاسخ : (الف) نخست باید نقطه تعادل را به دست آوریم :

$$\Delta L = \frac{mg}{k} = \frac{(85 \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg})}{27^\circ \text{ N/m}} = 3/^\circ \text{ m}$$

چون طناب 5° m پایین کشیده شده، بنابراین دامنه نوسان $2/^\circ \text{ m} = 5/^\circ \text{ m} - 3/^\circ \text{ m} = A$ می شود. (ب) با استفاده از راهنمایی داریم :

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

که در آن

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{27^\circ \text{ N/m}}{85^\circ \text{ kg}}} = 1/8 \text{ rad/s}$$

و در نتیجه :

$$y = (2/^\circ \text{ m}) \cos((1/8 \text{ rad/s})(2/^\circ \text{ s})) = -1/8 \text{ m}$$

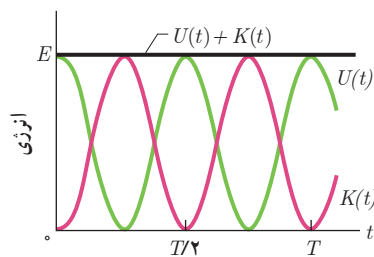
در نتیجه در $1/8 \text{ m}$ زیر نقطه تعادل است.

خوب است اشاره شود برخی کتاب‌ها به این سامانه قطعه - فنر، نوسانگر هماهنگ ساده 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.

نرم‌افزار PhET شبیه‌سازهای خوبی برای این مباحث دارد :

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/mass-spring-lab>

در اینجا حتماً اشاره شود که انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی نوسانگر به زمان وابسته است (شکل زیر) ولی انرژی مکانیکی سامانه جرم - فنر ثابت و مستقل از زمان است.



۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

شکل ۳-۳ سامانه جرم-فنری را هنگام نوسان روی سطح افقی بدون اصطکاک نشان می‌دهد. این سامانه مثال بارز حرکت هماهنگ ساده است. در کتاب فیزیک ۱ دیدیم وقتی فنری فشرده یا کشیده می‌شود در سامانه جرم-فنر انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره می‌شود، به‌طوری‌که با افزایش جابه‌جایی از نقطه تعادل اجایی که فنر فشرده و نه کشیده شده است (مثلاً این انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد). بنابراین انرژی پتانسیل سامانه جرم-فنر در نقاط بازگشتی $x = \pm A$ بیشینه و در نقطه تعادل $x = 0$ صفر می‌شود. برای صفر شدن انرژی پتانسیل در نقطه تعادل $x = 0$ باید که انرژی جنبشی در آن نقطه بیشینه می‌شود.

انرژی جنبشی این سامانه نیز به جرم قطعه متصل به فنر و تندی آن بستگی دارد و برابر با $K = \frac{1}{2}mv^2$ است. با افزایش جابه‌جایی از نقطه 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. بیشینه تندی در نقطه 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 پایسته می‌ماند و بنابراین مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل در نقاط بازگشتی، نقطه تعادل، و هر نقطه دلخواه دیگری از مسیر با هم برابر است. به همان اندازه که با افزایش جابه‌جایی از نقطه تعادل، انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد، انرژی جنبشی کاهش می‌یابد و بالعکس. شکل ۳-۳ تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر و پایستگی انرژی مکانیکی در حرکت هماهنگ ساده سامانه جرم - فنر را نشان می‌دهد.



نشان داده می‌شود انرژی مکانیکی سامانه جرم - فنر در حرکت هماهنگ ساده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 \quad (3-6) \quad \text{(انرژی مکانیکی سامانه جرم - فنر)}$$

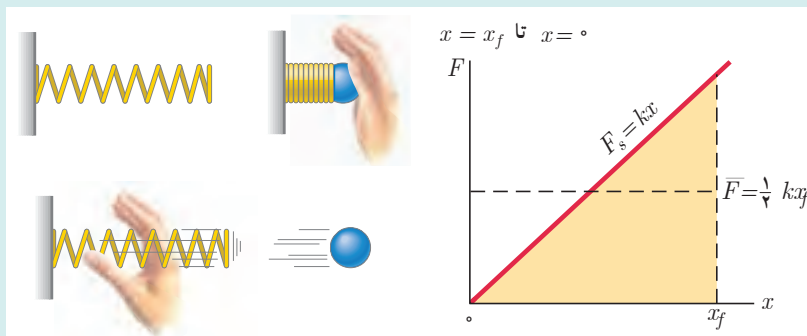
که در آن A ثابت فنر و k دامنه نوسان است. با استفاده از رابطه‌های ۳-۳ و ۳-۴ به رابطه معبد دیگری می‌رسیم که برای هر نوسانگر هماهنگ ساده دیگری از جمله آونگ ساده نیز

انرژی پتانسیل کشسانی سامانه جرم-فنر در نقطه از مسیر نوسان از رابطه $U = \frac{1}{2}kx^2$ بدست می‌آید که آونگی و ارتعاشی آن خارج از محدوده این کتاب است. در نقاط بازگشتی $x = \pm A$ است، آن انرژی صفری $K = 0$ و برای انرژی مکانیکی سامانه است.

دانشتنی 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 واهلیده فنر، $x_i = 0$) تا F افزایش می‌یابد (شکل ۱).



شکل ۱-۱ کشیده (یا فشرده) شدن فنر، بزرگی F 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 به صورت $\bar{F} = \frac{F + 0}{2} = \frac{F}{2}$ در نظر گرفت. آنگاه طبق تعریف کار، برای کار نیروی فنر داریم:

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

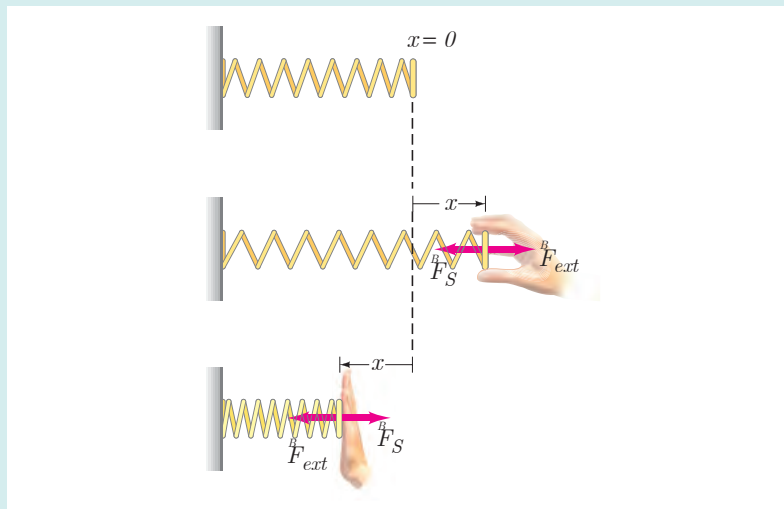
با توجه به اینکه تغییر انرژی پتانسیل فنر با منفی کار نیروی کشسانی فنر برابر است، داریم

$$\Delta U = -W$$

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

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

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

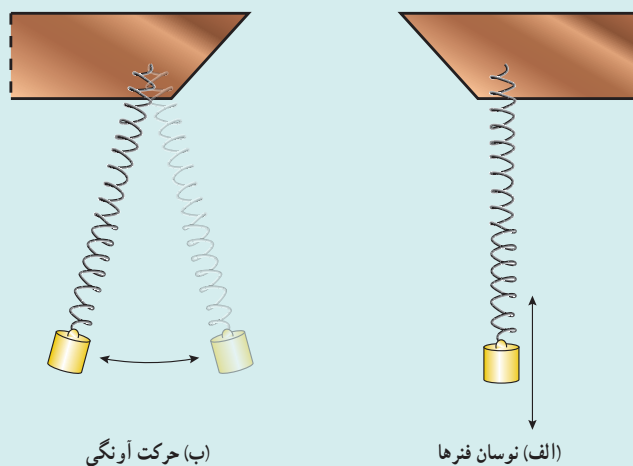


شکل ۲- (الف) فنر ابتدا در طول واهلیده خود است و سپس با اعمال نیروی خارجی F_{ext} ، کشیده و (ب) فشرده شده است.

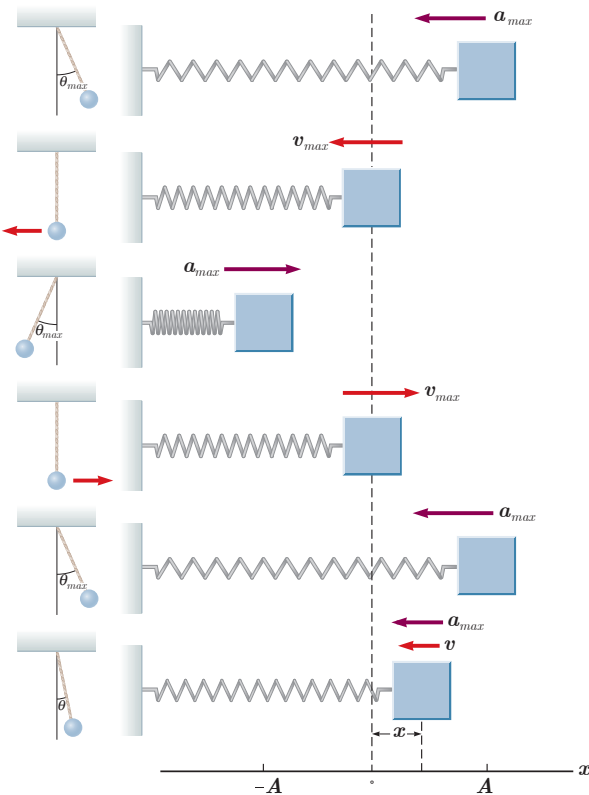
آونگ فنری و آونگ های جفت شده

آونگ فنری و آونگ های جفت شده مثال هایی مشهور از تبدیل انرژی در حرکت های نوسانی هستند. برای ساختن یک آونگ فنری، فنر نسبتاً سختی را از یک انتها آویزان کنید و سپس وزنه ای را به انتهای پایینی آن متصل کنید که بتواند فنر را به حدود $\frac{4}{3}$ طول اولیه اش برساند. جسم را پایین بکشید و سپس رها کنید. جسم در ابتدا در امتداد قائم نوسان می کند. اما به زودی این حرکت قائم با یک حرکت آونگی جایگزین می شود. با میراشدن این حرکت آونگی دوباره حرکت قائم ظاهر می شود. این دو نوع حرکت به طور متناوب جایگزین هم می شوند. اگر به جای حرکت قائم با حرکت آونگی نیز آغاز می کردید می توانستید به همین رفتار دو حالت برسید. در واقع در آونگ فنری انرژی به طور متناوب بین حرکت آونگی و نوسان های جرم – فنر مبادله می شود. شکل الف طرحی از یک آونگ فنری را نشان می دهد.

برای ساختن نوعی از آونگ های جفت شده دو نخ هم طول را به یک تخته آویز وصل کنید و سپس با پیچیدن هر نخ دور یک میله افقی یا عبور دادن آن از این میله مانند شکل ب، انتهای دیگر هر نخ را بر وزنه های مشابهی وصل کنید به طوری که فاصله وزنه ها از میله حدوداً $\frac{2}{3}$ 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 در خواهید یافت حرکت آونگ جابه جا شده به تدریج به آونگ دوم منتقل می شود. به محض این که این انتقال کامل شود آونگ اول ساکن شده و انتقال معکوس می گردد. این انتقال حرکت به طور متناوب بین دو آونگ ادامه خواهد یافت. در واقع در این جا نیز انرژی به طور متناوب بین این دو حرکت نوسانی مبادله می شود.



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 – 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:

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

یا:

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

(۷-۳)

(انرژی مکانیکی نوسانگر هماهنگ ساده)

اگرچه وابستگی انرژی مکانیکی و تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر را فقط برای نوسانگر جرم – فنر بررسی کردیم، ولی می‌توان نشان داد در حالت کلی، برای هرگونه نوسانگر هماهنگ ساده دیگری (از جمله آونگ ساده) نیز برقرار است. همچنین بنا به رابطه ۷-۳ انرژی مکانیکی هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای متناسب با مربع دامنه (A^2) و مربع بسامد (f^2) است.

مثال ۳-۳

الف) نشان دهید تندی بیشینه در حرکت هماهنگ ساده برابر است با $A\omega$.
 ب) تندی نوسانگر هماهنگ ساده‌ای که با دامنه 1.0 cm و دوره 0.5 s نوسان می‌کند هنگام عبور از نقطه تعادل چقدر است؟
 پاسخ: الف) بیشینه تندی در حرکت هماهنگ ساده هنگام عبور نوسانگر از نقطه تعادل رخ می‌دهد، جایی که انرژی پتانسیل صفر است. با استفاده از تعریف انرژی مکانیکی ($E = K + U$) و همچنین رابطه‌های ۷-۳ و ۷-۴ خواهیم داشت:

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

ب)

$$v_{\max} = A\omega = A\left(\frac{2\pi}{T}\right) = (1.0 \text{ cm})\left(\frac{2\pi}{0.5 \text{ s}}\right) = 1.26 \text{ m/s}$$

آونگ ساده: آونگ ساده شامل وزنه کوچکی به جرم m (موسوم به وزنه آونگ) است که از نخ بدون جرم و کش‌ناپذیری به طول L که سر دیگر آن ثابت شده، آویزان است (شکل ۸-۳). اگر زاویه انحراف آونگ از وضع تعادل کوچک باشد، آونگ حرکت هماهنگ ساده خواهد داشت و همان تبدیل‌های انرژی نوسانگر هماهنگ ساده در اینجا نیز رخ می‌دهد.

آزمایش‌های متعدد و محاسبه، نشان می‌دهد دوره تناوب آونگ ساده فقط به تناسب گرانشی (g) و طول آونگ (L) بستگی دارد، و از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

(۸-۳)

(دوره تناوب آونگ ساده)

این رابطه نشان می‌دهد که دوره تناوب آونگ ساده به جرم و دامنه آن بستگی ندارد.

مثال ۳-۴

بستگی دوره تناوب آونگ به تناسب گرانشی، روشی دقیق را برای تعیین g به دست می‌دهد. در این روش با اندازه‌گیری طول L و دوره تناوب T می‌توان g را به دست آورد. ژئوفیزیکدانان با استفاده از یک آونگ ساده به طول 1.71 m که 72.70 نوسان کامل را در 60.0 s انجام می‌دهد، تناسب g زمین را در مکانی خاص تعیین می‌کند. وی مقدار g را در این مکان چقدر به دست می‌آورد؟

۶۷

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

فیلم

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

فیلم

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

فیلم

در مورد زاویه 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 دوره تناوب آونگ ساده از رابطه زیر به دست می‌آید:

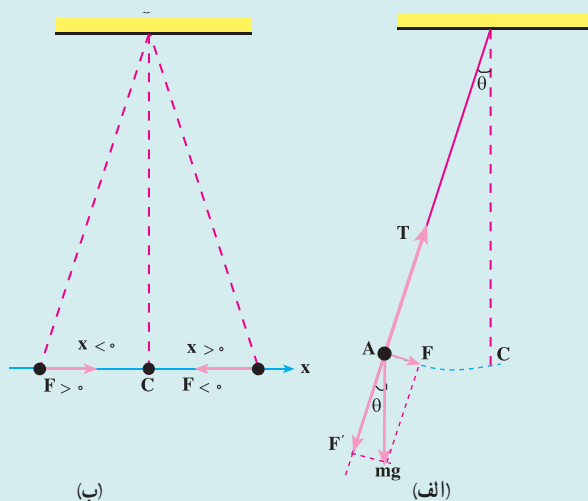
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \left[1 + \frac{1}{16}\theta^2 + \frac{11}{3072}\theta^4 + \dots \right]$$

که θ زاویه انحراف آونگ است.

دوره تناوب آونگ ساده

در آونگ ساده اگر اصطکاک قابل چشم‌پوشی و جرم نخ ناچیز باشد، بر وزنه آونگ نیروی وزن (\vec{mg}) و نیروی کشش نخ (\vec{T}) وارد می‌شود. 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. مؤلفه نیروی وزن در امتداد مماس بر مسیر $F = mg \sin \theta$ و در امتداد عمود بر مسیر $F' = mg \cos \theta$ است. مؤلفه مماس بر مسیر که نیروی بازگرداننده است می‌خواهد آونگ را به وضع تعادل برگرداند. اگر زاویه انحراف آونگ از وضع تعادل (θ) کوچک باشد، مسیر حرکت وزنه تقریباً یک خط راست افقی است؛ در این صورت، اگر طول آونگ را با L نمایش دهیم، $\sin \theta \approx \theta = \frac{x}{L}$ است و می‌توان نوشت:

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



همان‌گونه که در شکل ب دیده می‌شود مؤلفه 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 ساده کم دامنه یک حرکت هماهنگ ساده است.

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

اکنون با توجه به قانون دوم نیوتون داریم:

$$a = -\frac{g}{L} x \quad (۱)$$

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

$$a = \frac{F}{m} = \frac{-kx}{m} = -\frac{k}{m} x = -\omega^2 x \quad (۲)$$

پس

و در نتیجه

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

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

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 نقطه مسیر به حالت چنبره 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 3.8° شتاب سقوط آزاد در زمین است. دوره تناوب آونگی ساده در سطح مریخ $1/5$ اندازه‌گیری شده است. اگر شخصی این آونگ را به سطح سیاره دیگری ببرد، دوره تناوب $9/2$ s را برای آن به دست می‌آورد. این، کدام سیاره است؟

پاسخ: از رابطه $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ به طول $L = 21$ m به دست می‌آید و از آنجا

$$g_{\text{مجهول}} = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = 4\pi^2 \frac{21 \text{ m}}{(1/5 \text{ s})^2} = 9/8 \text{ m/s}^2$$

بنابراین، سیاره همان زمین است.

۲ دوره نوسان دستگاه جرم – فنری که دامنه نوسان آن $12/25$ cm است و تندی بیشینه $5/13$ m/s را دارد چقدر است؟ ثابت فنر $5/3$ N/m است.

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

$$\frac{1}{2}mv_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2}kA^2$$

از اینجا m به دست می‌آید:

$$m = \frac{kA^2}{v_{\text{max}}^2} = \frac{(5/3 \text{ N/m})(0/1225 \text{ m})^2}{(5/13 \text{ m/s})^2} = 2/868 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

و اکنون T به دست می‌آید:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{2/868 \times 10^{-3} \text{ kg}}{5/3 \text{ N/m}}} = 0/150 \text{ s}$$

9A

پاسخ: رابطه دوره تناوب آونگ ساده را برای θ حل می کنیم:

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

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{g/L}} = \frac{2\pi}{\sqrt{9.8/1.35}} = 2.33 \text{ s}$$

که در آن T دوره تناوب این آونگ است:

در نتیجه θ چنین بدست می آید:

$$g = \frac{\pi^2 L}{T^2} = \frac{\pi^2 (1.35 \text{ m})}{(2.33 \text{ s})^2} = 9.8 \text{ m/s}^2$$

۴-۳ تشدید

در تمام مثال‌هایی که تا اینجا بررسی کردیم، نوسانگر (مثلاً جرم - فنر یا آونگ ساده) با انحراف از وضع تعادل یا بسامدی معین شروع به نوسان می کرد. به بسامد این نوسان‌ها **بسامد طبیعی** گفته می‌شود. مطابق این تعریف، بسامد طبیعی سامانه جرم - فنر $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g/L}$ است. اما این نوسانگرها می‌توانند با اغصال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، **نوسان واداشته** گفته می‌شود و بسامد این نوسان را با f نمایش می‌دهند. مثالی از یک نوسان واداشته، تاب خوردن کودکانی است که به‌طور دورهای هل داده می‌شود (شکل ۴-۳). نوسان تاب می‌آنگه در ادامه حرکت هل داده شود مثالی از یک نوسان آزاد است. به طوری که نوسان‌های تاب، میرا و سرانجام متوقف می‌شود. ولی وقتی شخصی تاب را هل می‌دهد، او انرژی تلف شده بر اثر اصطکاک و مقاومت هوا را جبران می‌کند و معال از میراندن نوسان تاب می‌شود. اگر دامنه نوسان‌های تاب بزرگ‌تر و بزرگ‌تر شود حاکی از آن است که بسامد نوسان‌های واداشته با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی ($f = f_0$) اصطلاحاً گفته می‌شود که برای نوسانگر **تشدید (رزونانس)** رخ داده است. اگر تاب را با بسامدهای بیشتر یا کمتر از بسامد طبیعی آن هل دهیم، دامنه نوسان کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که آن را با بسامد طبیعی‌اش هل می‌دهیم. بدیند تشدید را می‌توان با فعالیت ساده زیر بررسی کرد.



شکل ۴-۳: هل دادن تاب، گرچه به نوسان واداشته می‌شود.

۴-۴ فعالیت

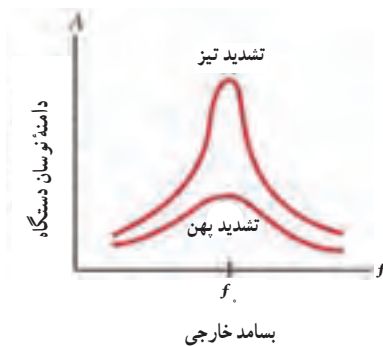
آونگ‌های پاروتون: یک آونگ با زونه سنگین و تعدادی آونگ سبک با طول‌های متفاوت را مطابق شکل سوار کنید. آونگ‌ها روی نخ‌های سوار شده‌اند که هر دو انتهای آن توسط گره‌هایی به نخه آویز متصل شده است. به آونگ سنگین اصطلاحاً **آونگ راننده** گفته می‌شود. زونا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحه عمود بر صفحه شکل، موجب تاب خوردن نخ آویز و در نتیجه به نوسان واداشتن سایر آونگ‌ها می‌شود. آونگ واداشته را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می‌کنید توضیح دهید.

۱- مشاهده این آونگ‌ها در [YouTube](#) می‌تواند آسان باشد.

۲- Driver Pendulum

۳۸

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



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

در اینجا ممکن است دانش آموزان به نوسان‌های دیگری هم اشاره کنند که بدون ضربه‌ای وادارنده رخ می‌دهند و مثلاً در یک تاب دونفره با نشستن و برخاستن 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.

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

فیلم

در این فیلم تشدید در یک آونگ را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم تشدید در دو دستگاه جرم – فنر را می بینید.

فیلم

در این فیلم دیپازون های رُخ به رُخی را می بینید که دومی با بسامد اول به تشدید درمی آید.

فیلم

در این فیلم دیپازون های موازی ای را می بینید که بسامد ارتعاش آنها کم و مثلاً یکی ۲۵۶Hz و دیگری ۲۵۷Hz است. در این صورت شما صدایی موسوم به *زئزش* را با بسامدی برابر اختلاف این دو بسامد (یعنی ۱Hz) را می شنوید.

فیلم

پاسخ فعالیت ۳-۳

با به نوسان درآوردن آونگ وادارنده، می توان دید برخی از آونگ ها با دامنه بزرگی به نوسان درمی آیند، در حالی که برخی ساکن مانده و یا با دامنه های بسیار کوچکی به نوسان درمی آیند. در واقع آنچه رخ می دهد براساس پدیده تشدید توضیح داده می شود و آن آونگ هایی که با دامنه بزرگ به نوسان درمی آیند در واقع بسامد طبیعی ای دارند که برابر یا در حول و حوش بسامد آونگ وادارنده است و اگر تکانی ناچیز در برخی دیگر از آونگ ها مشاهده می شود صرفاً براساس انتقال انرژی ناچیزی است که برای این آونگ ها رخ می دهد. در مورد آونگی که با بیشترین دامنه به نوسان در می آید، اصطلاحاً گفته می شود که این آونگ برای تشدید کوک (tune) شده است. در تمرین ۳-۳ به طور عددی، پدیده مشابهی را بررسی می کنیم. در مورد آونگ های بارتون، بدیهی است آونگی با بیشترین دامنه به نوسان درمی آید که هم طول آونگ وادارنده باشد.

فیلم

پاسخ: رابطه دوتای تاراب ساده را برای حل می کنیم:

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

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{g/L}} = 2\pi \sqrt{L/g}$$

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{4\pi^2 (-1.71m)}{(2\pi / 1.33s)^2} = 9.73 m/s^2$$

که در آن T دوره تناوب این آونگ است:

در نتیجه و چنین بدست می آید:

۳-۳ تشدید

در تمام مثال های که تا اینجا بررسی کردیم، نوسانگر (مثلاً جرم – فنر یا آونگ ساده) با انحراف از وضع تعادل با بسامدی معین شروع به نوسان می کرد. به بسامد این نوسان ها *بسامد طبیعی* گفته می شود. مطابق این تعریف، بسامد طبیعی سامانه جرم – فنر $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g/L}$ است. اما این نوسانگرها می توانند با اعمال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، *نوسان وادارنده* گفته می شود و بسامد این نوسان را با f_d نمایش می دهیم. مثالی از یک نوسان وادارنده، تاب خوردن کودکی است که به طور دوره ای هل داده می شود (شکل ۳-۳). نوسان تاب می آید که در ادامه حرکت هل داده شود مثالی از یک نوسان آزاد است، به طوری که نوسان های تاب، میرا و سرانجام متوقف می شود. ولی وقتی شخصی تاب را هل می دهد، او انرژی تلف شده بر اثر اصطکاک و مقاومت هوا را جبران می کند و مایع از میراندن نوسان تاب می شود. اگر دامنه نوسان های تاب بزرگ تر و بزرگ تر شود حاکی از آن است که بسامد نوسان های وادارنده با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی $(f_d = f)$ اصطلاحاً گفته می شود که برای نوسانگر *تشدید (رزونانس)* رخ داده است. اگر تاب را با بسامدهای بیشتری یا کمتر از بسامد طبیعی آن هل دهیم، دامنه نوسان کوچک تر از حالتی خواهد شد که آن را با بسامد طبیعی ای هل می دهیم. پدیده تشدید را می توان با فعالیت ساده زیر بررسی کرد.



شکل ۳-۳: هل دادن تاب کودک به نوسان وادارنده می شود.

۳-۳ فعالیت

آونگ های بارتون؟ یک آونگ با وزنه سنگین و تعدادی آونگ سبک با طول های متفاوت را مطابق شکل سوار کنید. آونگ ها روی نخ سوار شده اند که هر دو انتهای آن توسط گره های به نخه آویز متصل شده است. به آونگ سنگین اصطلاحاً *آونگ وادارنده* گفته می شود. وزنه به نوسان درآوردن این آونگ در صفحه نمودار بر صفحه شکل، موجب تاب خوردن نخ آویز و در نتیجه به نوسان وادارنده سایر آونگ ها می شود. آونگ وادارنده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می کنید توضیح دهید.

۱. نامش این آونگ را در جدول بنویسید و سعی وادارنده است.

۲. Driver Pendulum

۳. Barton's Pendulum

۶۸

از لحاظ تاریخی خوب است بدانید آونگ های بارتون منتسب به/دوین هنری بارتون (۱۹۲۵-۱۸۵۸ م.) استاد فیزیک دانشگاه ناتینگهام بوده که برای نخستین بار برای نشان دادن پدیده تشدید این آزمایش را تدارک دید.

در این فیلم تشدید آونگ های هم طول را می بینید.

فیلم

در این فیلم فروپاشی پل تاکوما (Tacoma) را می بینید.



در این فیلم چگونگی فروپاشی یک ساختمان واقع بر زمینی نرم در حین یک زمین لرزه را می بینید.



در فیلم تشدید در یک لیوان و در نهایت شکستن آن را می بینید.



دانشتنی برای معلم

تشدیدهایی بدون ضربه و آدارنده

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 ۱- زیاد شدن نوسان‌های تاب

شکل ۲- 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 طبیعی اش تکان می‌خورد که کمیت تعیین‌کننده دوره دستگاه (در حالت موردنظر ما، این کمیت فاصله بین نقطه آویز و مرکز جرم است) با بسامد دوبرابر تغییر می‌کند. نوسان‌ها با صرف کاری که جهت تغییر دوره دستگاه انجام می‌گیرد برانگیخته و ثابت نگه‌داشته می‌شوند.

این روش برانگیزش نوسان‌ها را می‌توان با آونگ ساده، مثلاً گلوله آویزان از نخ، به آسانی به وجود آورد. نخ باید از داخل یک حلقه سیمی ثابت بگذرد. انتهای آزاد نخ را باید با دست به طور دوره‌ای کشید و وزنه را بالا و پایین برد، یعنی طول آونگ را به طور 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، دامنه نوسان‌ها افزایش می‌یابد. این امر به این معناست که انرژی آونگ در حال نوسان افزایش یافته است. این انرژی را از کجا به دست 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 اندازه L کوتاه‌تر کنیم، وزنه به جرم m را به اندازه ارتفاع L بالا برده‌ایم و به آونگ مقدار mgL انرژی داده‌ایم. افزایش طول آونگ هنگامی صورت می‌گیرد که به اندازه زاویه بیشینه منحرف شده باشد. در این حالت، وزنه به اندازه طول $L \cos \alpha$ پایین‌تر می‌آید، و در نتیجه آونگ مقدار $mgL \cos \alpha$ انرژی از دست می‌دهد. اختلاف بین انرژی‌های گرفته و پس داده شده برابر است با $mgL(1 - \cos \alpha)$. این درست انرژی‌ای است که در هر نیم‌دوره به آونگ داده می‌شود و باعث می‌شود دامنه افزایش یابد. باید به خاطر داشت که هر چه زاویه بیشینه بزرگ‌تر (به $\frac{\pi}{4}$ نزدیک‌تر) باشد، مقدار انرژی‌ای که آونگ در نیم‌دوره دریافت می‌کند زیاده‌تر است، یعنی دامنه به میزان بیشتری بزرگ‌تر می‌شود. چ

بیشتر شدن دامنه 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 بیشینه تاب انجام می‌گیرد انرژی تاب افزایش می‌یابد. چون این اثر به تغییر طول آونگ، یعنی پارامتر تعیین‌کننده دوره دستگاه، متکی است، چنین تأثیری به تأثیر پارامتری معروف است. پیداست که وقتی اثر پارامتری موجب افزایش دامنه نوسان‌ها می‌شود که بسامد این اثر دو برابر بسامد طبیعی دستگاه باشد.

پاسخ تمرین ۳-۳

لازم به توضیح است که در کتاب‌ها شرط تشدید عموماً به صورت
برابری بسامدهای زاویه‌ای بیان می‌شود و اگر بسامد زاویه‌ای طبیعی
 ω ی دستگاه با بسامد زاویه‌ای وادارنده 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.

$T = 2\pi\sqrt{L/g}$ در آن $\omega = 2\pi/T$ بسامد زاویه‌ای است که در آن 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 ω مناسب برای تشدید هستند. آونگ با طول $\lambda = 0.8\text{ m}$ که برای آن ω چنین می‌شود:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{9.8 \text{ m/s}^2}{0.1 \text{ m}}} = 9.9 \text{ rad/s}$$

آونگ با طول $1/2m$ که برای آن \textcircled{a} چنین می شود :

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{9.8 \text{ m/s}^2}{1.5 \text{ m}}} = 2.55 \text{ rad/s} \approx 2.6 \text{ rad/s}$$

اگر بسامد زاویه‌ای را برای سه آونگ دیگر بررسی کنیم، به ترتیب برای آونگ‌های به طول 4 m ، 8 m و 5 m به مقادیر $4/9\text{ rad/s}$ ، $1/9\text{ rad/s}$ و $1/7\text{ rad/s}$ 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 8 m نیز با دامنهٔ نسبتاً بزرگی به نوسان درمی‌آید، گرچه بنا به تعریف، برای آن تشدید رخ نداده است.

پاسخ پرسش ۲-۳

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 فاصله 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 دریاچه قدیمی بنا شده است که خاک آن بر اثر اختلاط با آب، نرم است. گرچه دامنه امواج لرزه‌ای در زمین سخت‌تر مسیر تا مکزیکوسیتی کوچک بود، ولی دامنه شتاب این امواج به بزرگی $0.2g$ (۲۰٪ شتاب گرانی)، و بسامد زاویه‌ای آنها در حول و حوش 3 rad/s بود که این تقریباً برابر با بسامد زاویه‌ای طبیعی ساختمان‌های نیمه‌بلند شهر بود.

● تمرین ۳-۳

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان اند، عبارتند از، $\frac{1}{4}\text{m}$ ، $\frac{1}{8}\text{m}$ ، $\frac{1}{16}\text{m}$ ، $\frac{1}{32}\text{m}$ ، $\frac{1}{64}\text{m}$ ، $\frac{1}{128}\text{m}$ ، $\frac{1}{256}\text{m}$ ، $\frac{1}{512}\text{m}$. فرض کنید دسته دستخوش نوسان‌های افقی با بسامد زاویه‌ای در گستره $\frac{\pi}{4} \text{ rad/s}$ تا $\frac{\pi}{2} \text{ rad/s}$ باشد. کدام آونگ‌ها با دامنه بزرگ‌تری به نوسان درمی‌آیند؟ (توجه کنید گرچه تشدید در بسامد مشخص رخ می‌دهد، اما دامنه نوسان در تذبذب این بسامد همچنان بزرگ است).

● پرسش ۲-۳

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



الف) ساختمان های کم تاه و ب) ساختمان های بلند، در زمینه لرزه مکزیکو سیستم، بر جای مانده اند.

۳-۵ موج و انواع آن

هر گاه در ناحیه‌ای از محیط گئوسان، ازغنائی موجود آید، موجب پدید آمدن ازغنائی‌های دیگری می‌شوند که در نواحی سرع ازغنائی دور و دورتر، و به این ترتیب آنچه که ما **سویج** می‌نامیم وجود می‌آید. موهای را عموماً به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: **سویج‌های ماکرو** و **سویج‌های میکرو** (۱) **سویج‌های میکرو** همانند موهای ریزی سطح آب (شکل ۱) و **سویج‌های صوفی** - برای انشاختار خود به محیط مادی می‌چسبند و به این ترتیب در موهای **کروکوتانوس** همانند **سورتمی**، موهای رازیوی و لژیوی، کرم‌ها و موش‌ها و غیره - وجود دارند. انشاختار خود به محیط مادی نیاز ندارند.



شکل ۱۳-۱ تعابیر ایجاد موج در یک فتر بسته کننده

$$c, \ell \in (\text{Slinky}), \quad \zeta_1, \dots, \zeta_k, \zeta_{k+1}, \dots, \zeta_n$$

پرش پیشنهادی

۱ چرا یک شیرجه رو، پیش از آنکه از تخته پرش شیرجه بزند، چندبار روی تخته پرش جست و خیز می کند؟
پاسخ: می دانیم تخته پرش بسامدی طبیعی دارد که اگر خم شود و رها گردد با آن بسامد به نوسان درمی آید. اکنون اگر شناگری بر روی تخته قرار گیرد و شروع به جستن کند، تخته پرش ناچار است همراه با این جستن ها نوسان کند. در آغاز که دامنه نوسان های تخته کوچک است اصطلاحاً می گویند تخته تحت ارتعاشات زویری به نوسان واداشته شده است. وقتی شناگر می کوشد تا برای شیرجه رفتن به ارتفاع بالاتری برسد باید بسامد نیروی وارد شده به گونه ای باشد که برابر بسامد طبیعی تخته گردد. در این حالت است که دامنه نوسان های تخته پرش بسیار بزرگ می شود و به عبارتی تخته به تشدید درمی آید.

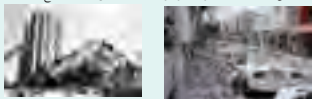
فعالیت های پیشنهادی

- ۱ آونگ های بارتونی متشکل از شش آونگ با بسامدهای طبیعی $1/5\text{Hz}$ ، $1/2\text{Hz}$ ، $1/1\text{Hz}$ ، $1/5\text{Hz}$ ، $1/5\text{Hz}$ و $2/1\text{Hz}$ بسازید و فعالیت ۳-۳ را با آن بیازمایید.
- ۲ ساعت های کوارتز نیز بر مبنای پدیده تشدید کار می کنند. کوارتز این ویژگی را دارد که با اعمال ولتاژ خم می شود. حال اگر تپ های ولتاژ طوری تنظیم شوند که با بسامد طبیعی کوارتز همنا گردند، بلور کوارتز را به نوسان وامی دارند. درباره این ساعت ها تحقیق کنید.



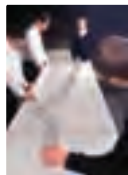
طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان اند، عبارت‌اند از: $\frac{\pi}{4}\text{m}$, $\frac{\pi}{8}\text{m}$, $\frac{\pi}{6}\text{m}$, $\frac{\pi}{4}\text{m}$, $\frac{\pi}{2}\text{m}$. فرض کنید دسته خوش نوسان‌هایی افقی با بسامد زاویه‌ای در گستره $\frac{\pi}{4}\text{rad/s}$ تا $\frac{\pi}{2}\text{rad/s}$ باشد. کدام آونگ‌ها با دامنه بزرگ‌تری به نوسان می‌آیند؟ (توجه کنید هرچه تشدید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنه نوسان در نزدیک این بسامد همچنان بزرگ است).

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



(الف) ساختمان های کم تا و (ب) ساختمان های بلند، در زمینه لرزه ای یک سیستم بر جای ماندند.

شکل ۱۰-۳۱ با برتاب سنگ در آب، فرورفتگی
برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب بخش
می‌شوند.



شماره ۱۱-۱۳: نماد: ایجاد هر چه در یک فن باشد

لاہور، قائد اعظم ایسٹریٹ (Slipky) مارگ پر۔

حتماً توجه داده شود که وجود محیط کُشسان 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 نقطه دیگری در محیط است. در مورد موج‌های مکانیکی باید محیطی کُشسان داشته باشیم و موج‌های الکترومغناطیسی برای انتشار خود اصلاً به محیط مادی نیاز ندارند که بخواهد کُشسان یا غیرکُشسان 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 کُشسان هوای جو است. امواج لرزه‌ای نیز که در زمین لرزه‌ها انتشار می‌یابند، در واقع انتشار ارتعاش پوخته زمین از مرکز ناحیه 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.

فصل ۳۳: نوسان و موج

تمرین ۳-۲

طول تعدادی آرگانه ساده که از میله‌ای افقی آویزان اند، عبارت‌اند از: 0.40m , 0.70m , 1.00m , 1.30m , 1.60m . فرض کنید میله دستخوش نوسان‌های افقی با بسامد زاویه‌ای در گستره $0 \leq \omega \leq 4\pi \text{ rad/s}$ شود. کدام آرگانه‌ها با دامنه بزرگ‌تری به نوسان درمی‌آیند؟ (وجه کنید که چه تشدید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنه نوسان در نزدیک این بسامد همچنان بزرگ است).

پرسش ۳-۳

در می‌زمین‌لرزه‌های غلیظی (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 بارها ماند. علت این پدیده را توضیح دهید.

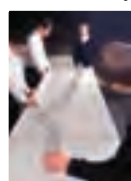


(الف) ساختمان‌های کوتاه و (ب) ساختمان‌های بلند، در زمین‌لرزه مکزیکوسیتی به جای ماندند.

۵-۳ موج و انواع آن



شکل ۵-۳-۱: پدیده‌های طبیعی که به موج‌ها می‌گویند. (الف) موج‌های سطح آب، (ب) موج‌های صوتی، (ج) موج‌های سismic.



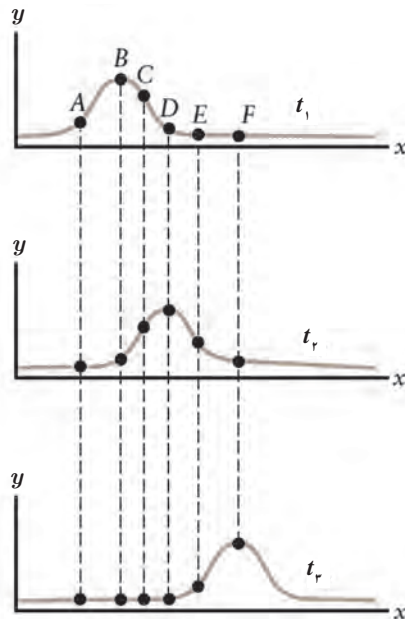
شکل ۵-۳-۲: امواج سطح آب در یک فرایند تشدید.

هر گاه در ناحیه‌ای از یک محیط گسختن، ارتعاشی به وجود آید، موجب پدید آمدن ارتعاش‌های پیرامینی دیگری می‌شود که از محل شروع ارتعاش دور و دورترند، و به این ترتیب آنچه را که موج می‌نامند به وجود می‌آید. موج‌ها را عموماً به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: **موج‌های مکانیکی** و **موج‌های الکترومغناطیسی**. موج‌های مکانیکی، مانند موج‌های روی سطح آب (شکل ۵-۳-۱) و موج‌های صوتی، برای انتشار خود به یک محیط مادی نیاز دارند. و موج‌های الکترومغناطیسی، مانند نور مرئی، موج‌های رادیویی و تلویزیونی، میکروموج و پرتوهای X، برای انتشار خود به محیط مادی نیاز ندارند.

به رغم متفاوت بودن منشأ امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی، همگی آنها مشخصه‌های یکسانی دارند و رفتار آنها از قاعده‌های کلی پیروی می‌کند که در هر پدیده موجی و رفتار است.

اگر مانند شکل ۵-۳-۱ یک سر قدر بلند «کنشده» شده‌ای را به سرعت به چپ و راست تکان دهید، موجی به شکل یک **تپ** در طول قتر منتشر می‌شود. وقتی سر آزاد قتر را مانند شکل ۵-۳-۲ 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 توبه خود شروع به بالا کشیدن بخش بعدی می‌کند و این روند ادامه می‌یابد. به همین ترتیب، پایین کشیدن سر آزاد

خوب است به تمایز بین تپ و موج اشاره شود. هر دوی اینها به آشفستگی در محیط اشاره دارند. اما موج آشفستگی‌ای پیوسته است، در حالی که تپ یک آشفستگی تنها است. خوب است به عنوان 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 ذره 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.



۱- به این فرایند، امواج (Waves) می‌گویند.

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

فیلم

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

فیلم

در این فیلم نمایشی از انتشار موج های طولی و عرضی را می بینید.

فیلم

خوب است در مورد چگونگی انتقال انرژی موج مکانیکی پیش رونده اشاره شود که برای تولید موج مکانیکی، باید نیرویی بر بخشی از محیط کشسان وارد شود. نقطه ای که به آن نیرو وارد می شود حرکت می کند و در نتیجه روی محیط کار انجام می شود. با انتشار موج، هر بخش از محیط نیرویی وارد می کند و بدین ترتیب بر بخش مجاور خود کار انجام می دهد. به این روش که موج می تواند انرژی را از یک ناحیه محیط کشسان به ناحیه دیگر آن محیط انتقال دهد.

هرچند به کرات در متن درس اشاره شده است، با این حال خوب است همچنان در کلاس به این خطای رایج که برخی دانش آموزان می اندیشند با انتشار موج، ذره های محیط نیز از جایی به جای دیگر منتقل می شوند، اشاره کنید. به عبارت دیگر، دانش آموزان اغلب حرکت نوسانی ذره های محیط کشسان حول نقطه تعادل را با حرکت موج اشتباه می گیرند. ارجاع به شکل ۱۹-۳ کتاب و یا شکل روبه رو - با توجه دادن دانش آموزان به نقطه b محیط - می تواند راهگشا باشد.

فرم موجی پهن ترین بخش شدن بخش های هدی می شود، و بدین ترتیب آنفنگی ای در شکل فر ایجاد می شود که با تندی ۱ در طول فر حرکت می کند. اگر دست خود را بپایی به بالا و پایین حرکت دهید یک موج پیوسته با تندی ۱ در طول فر به حرکت درمی آید. اگر به حرکت جزئی از فر که در هنگام عبور موج به بالا و پایین نوسان می کند دقت کنید درمی یابید جابه جایی هر جزء نوسان کننده ای از فر، عبور بر جهت حرکت موج است، که به آن «موج عرضی» گفته می شود.

از این فر بلند می توان برای ایجاد نوع دیگری از موج موسوم به «موج طولی» نیز استفاده کرد. اگر این بار، سر آزاد فر را به جای اینکه به بالا و پایین با به چپ و راست حرکت دهد، به سرعت به جلو و عقب بریزد، یک تب در طول فر به راه می افتد (شکل ۱۴-۳). و اگر دست خود را بپایی به جلو و عقب حرکت دهید یک موج طولی پیوسته با تندی ۱ در طول فر به حرکت درمی آید. اگر به حرکت جزئی از فر که در هنگام عبور این موج به چپ و راست نوسان می کند دقت کنید، درمی یابید جابه جایی هر جزء نوسان کننده ای از فر در راستای حرکت موج است (شکل ۱۴-۳). به همین دلیل است که به چنین موجی، «موج طولی» می گویند.

به موج های عرضی و طولی که تا اینجا بررسی شد، «موج های پیرونده» گفته می شود. زیرا، هر دو این موج ها از نقطه ای به نقطه دیگر حرکت کرده و انرژی را با خود منتقل می کنند. توجه کنید این موج است که از یک سر به سر دیگر حرکت می کند نه دامادی آذر مثل فرای لا (فر) که موج در آن حرکت می کند. همچنین دریافتید که برای ایجاد چنین امواجی به یک جسم (جسمه) نوسانی نیاز دارید و موج از این جسمه دور می شود، و اگر جسمه به طور هادنگ ساده نوسان کند، اجزای محیط حول نقطه تعادل خود با همان بسامد جسمه نوسان می کنند.

پرسش ۲-۳

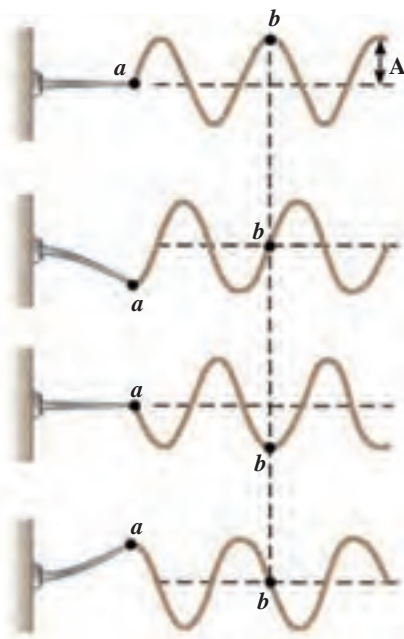
همان طور که گفتیم یکی از ویژگی های موج پیرونده انتقال انرژی از یک نقطه به نقطه دیگر، در جهت انتشار موج است. با در نظر گرفتن یک تب طولی در یک فر بلند کشیده شده، این ویژگی را توضیح دهید.

۹-۳ مشخصه های موج

برای مطالعه برخی از مشخصه های موج از وسیله ای موسوم به «تنت موج» استفاده می شود. طرح ساده ای از این وسیله در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده است. این وسیله شامل یک تنت نشینده ای که عمیق و یک نوسان ساز است، یک راه مشاهده و فرار موج، استفاده از سله ای است که توسط لایب از سطح آب داخل تنت و ورقه کاغذی زیر تنت تشکیل می شود. رانندگی ها و فرورفتگی های موج

Ripple Tank

۷۰



فتر در وضعیت تعادل

موج طولی در فتر

موج v

بیچه‌ها ν

انقباض

تراکم

طول موج λ

راستی نوسان هر جزء،
راستی انتشار موج

شکل ۱۹-۳۳ در حالی که موج به سمت راست منتشر می‌شود هر جزء،
فرد عمود بر راستای انتشار موج، به بالا و پایین نوسان می‌کند.



شکل ۳۳-۱ نمایش ایجاد یک تب طولی در یک اثر پلئو کشیده شده

راستی نوسان هر جزء قدر

راستی انتشار موج

مثال ۱۳-۴ در حالی که موج به سمت راست حرکت می‌کند، هر حلقه فتر هیراستا با حرکت موج به چپ و راست نوسان می‌کند. به‌خوری که ناحیه‌ای جمع‌ندگی و باز‌ندگی به‌طور متناوب در طول فتر ظاهر می‌شود.

● پرسش ۳-۳

در این فیلم یک ماشین سازنده موج را می بینید.

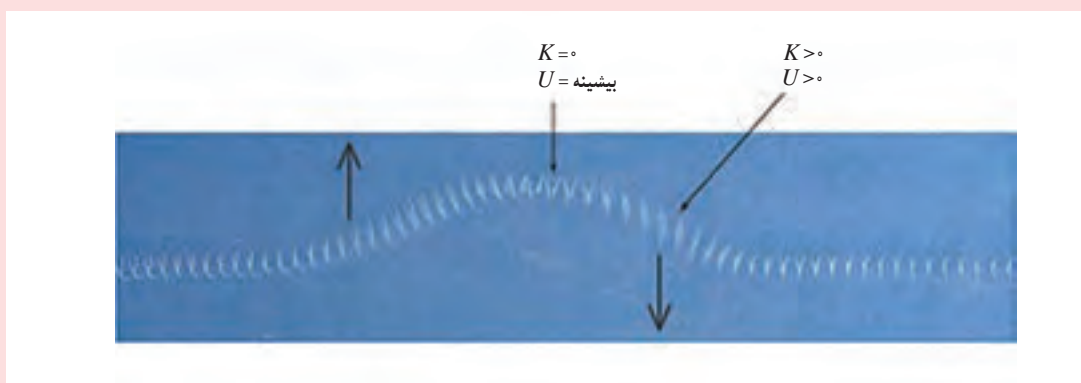
در این فیلم حرکت یک تی طولی در فضا را می بینید.

پاسخ پرسش ۳-۳

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

پرسش پیشنهادی

پرسش ۳-۳ 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 به طور لحظه‌ای ساکن‌اند و فنر تنها انرژی پتانسیل کشسانی دارد و بدین ترتیب دوباره به وضعیت تعادل بازمی‌گردد 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.

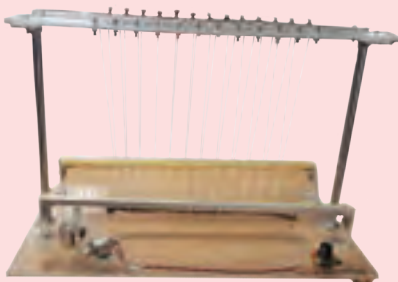


تمرین پیشنهادی

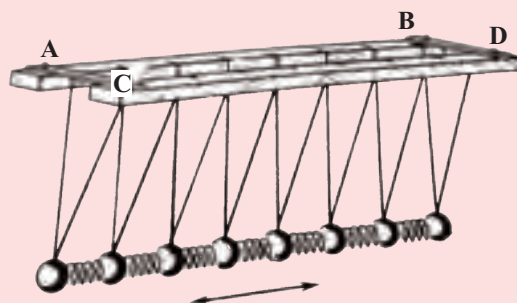
۱ فرض کنید یک تپ عرضی با دامنه 45 cm ایجاد می‌کنید. 8°s طول می‌کشد تا این تپ دوباره به وضعیت تعادل فنر بازگردد. اگر تپ با تندی $2/5\text{ m/s}$ حرکت کند، طول تپ چقدر است؟ پاسخ: طول تپ از رابطه $l = v\Delta t$ به دست می‌آید:

$$l = v\Delta t = (2/5\text{ m/s})(8^\circ\text{s}) = 2^\circ\text{m}$$

۱ اسبابی مطابق شکل الف را در نظر بگیرید که طرح آن در شکل ب رسم شده است. این اسباب از دو قطعه AB و CD تشکیل شده است که به دو میله عرضی AC و BD لولا شده‌اند. گوی‌ها که توسط فنرهایی به هم متصل شده‌اند به طوری از قطعه‌ها آویزان شده‌اند که هرگویی 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 سازنده موج (Wave making machine) ماشین‌های سازنده 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](http://PracticalPhysics.org/Building-wave-machine.html) دانش‌آموزان را ترغیب کنید ماشین مشابه‌ای بسازند. فیلمی از این ماشین سازنده موج در وب‌گاه گروه فیزیک گذاشته شده است.

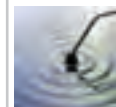
خوب است در کنار شکل ۳-۱۶، بلافاصله شکل‌هایی مانند شکلی که در مثال ۳-۵ آورده شده است را نیز به دانش‌آموزان نشان دهید تا با قله‌ها، دره‌ها و طول موج برای امواج دایره‌ای آشنا شوند.



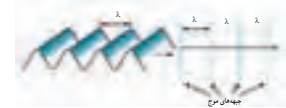
وب‌گاه www.falsald.com/ripple شبیه‌سازی‌هایی دربارهٔ کلیهٔ آزمایش‌های ممکن با تشبیه موج دارد.



شکل ۳-۱۷: نوسان و موج



روی سطح آب، به‌وضوح در سائۀ تشکیل شده بر ورقۀ کافۀ دیده می‌شود. اگر مانند شکل ۳-۱۵، تپه‌ای را بر سطح آب به نوسان درآوریم، موجی تخت و سطح آب تشکیل می‌شود و اگر به جای تپه از یک گوی کوچک استفاده کنیم به یک موج دایره‌ای می‌رسیم که از نقطهٔ تماس با سطح آب در تمام جهات حرکت می‌کند (شکل ۳-۱۶). در هر دو حالت، به هر یک از برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های ایجادشده روی سطح آب، یک **جبههٔ موج** می‌گویند. به برآمدگی‌ها، **قله** (تپه) و به فرورفتگی‌ها **دره** (پشته) گفته می‌شود. فاصلهٔ بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، **طول موج** نامیده می‌شود و آن را با λ نشان می‌دهند (شکل ۳-۱۷). طول موج با برآورد مسافتی است که موج در مدت دورۀ تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.



شکل ۳-۱۸: طریقی از تشکیل جبهه‌های موج تخت بر سطح آب یک تشبیه موج جبهه‌ای موج. روسی مناسب برای نمایش یک موج پیوسته در هند.

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

دانه (A): جبههٔ فاصلهٔ یک ذره از مکان تعادل، دانهٔ موج نامیده می‌شود که همان فاصلهٔ قله یا دره نسبت به سطح آرام با ساقی است.

دورۀ تناوب (T): مدت زمانی که هر ذره محیط یک نوسان کامل انجام می‌دهد دورۀ 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 ذره محیط در یک ثانیه بسامد موج نامیده می‌شود که برابر با بسامد چشمهٔ موج نیز هست. بنابراین $f = \frac{1}{T}$.

تندی انتشار موج (v): اگر جبههٔ موج در مدت Δt مسافت Δx را طی کند، تندی انتشار موج از رابطهٔ $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ بدست می‌آید. از آنجا که طول موج λ در دورۀ T طی می‌شود، داریم:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (۳-۹)$$

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

۷۱

در این فیلم تشکیل موج پیش‌رونده با آب را می‌بینید.



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 می‌شود، 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 (۱۸۴۹-۱۹۳۴ م.) 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

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

فیلم ۳-۱۹

۳-۱۹: امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تحت موج شکل ۳-۱۶ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دورۀ تناوب $1/10$ s در تشبیه به عمق $1/5$ cm نوسان کند، فاصلهٔ بین دو برآمدگی مجاور $5/10$ cm و اگر در تشبیه به عمق $3/10$ cm نوسان کند، این فاصله $6/10$ cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تشبیه در حالت جفتی است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ: فاصلهٔ دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دورۀ تناوب موج را با دورۀ تناوب نوسان‌های چشمهٔ موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطهٔ $v = \lambda f$ بدست می‌آوریم.

با قرار دادن $\lambda = 5/10$ m و $f = 10$ s⁻¹ در رابطهٔ $v = \lambda f$ خواهیم داشت:

$v_1 = \frac{\lambda_1}{T_1} = \frac{5/10}{1/10} = 5/10$ m/s و با قرار دادن $\lambda = 6/10$ m و $f = 10$ s⁻¹ در رابطهٔ $v = \lambda f$ خواهیم داشت:

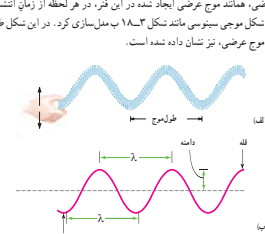
$v_2 = \frac{\lambda_2}{T_2} = \frac{6/10}{1/10} = 6/10$ m/s

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، نوعی از تقریبی از موج عرضی است. اگر یک سر قهر بلند کشیده‌شده‌ای را با حرکت هله‌هنگ‌ساده، پایی به بالا و پایین حرکت دهید موج عرضی پیوسته‌ای در طول قهر منتشر می‌شود (شکل ۳-۱۸). (الف).

امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این قهر، در هر لحظه از زمان انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۳-۱۸ ب میل‌سازی کرد. در این شکل طول موج و دامنهٔ این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.

شکل ۳-۱۸: یک موج عرضی در قهر کشیده شده و با میل‌سازی برای این موج



۷۲

۱- Sir Horace Lamb

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

و برای عمق‌های کم (کوچک‌تر از 0.5° طول موج) به صورت زیر می‌شود

$$v \approx \sqrt{gd} \quad , \quad d < \lambda/20$$

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

$$v \approx \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}$$

در این مبحث خواندن مقاله زیر نیز خالی از لطف نیست

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

فیزیک ۳۳

مثال ۵-۳

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تخت موج شکل $1.6-3$ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دوره تناوب $1/10$ s در تندی به عمق 2.5 cm نوسان کند، فاصله بین دو برآمدگی مجاور 5.0 cm و اگر در تندی به عمق 3.5 cm نوسان کند، این فاصله 6 cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تندی در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ : فاصله دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دوره تناوب موج برابر با دوره تناوب نوسان‌های جسمه موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطه $9.3-3$ به دست می‌آوریم.

با قرار دادن $\lambda = 5.0$ m و $T = 1/10$ s و $\lambda = 6$ m و $T = 1/10$ s در رابطه $9.3-3$ خواهیم داشت :

$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{5.0 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 50 \text{ m/s}$$

و با قرار دادن $\lambda = 6$ m و $T = 1/10$ s در رابطه $9.3-3$ خواهیم داشت :

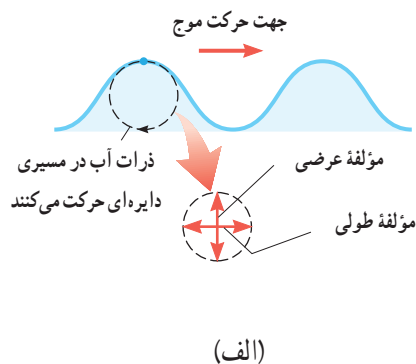
$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{6 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 60 \text{ m/s}$$

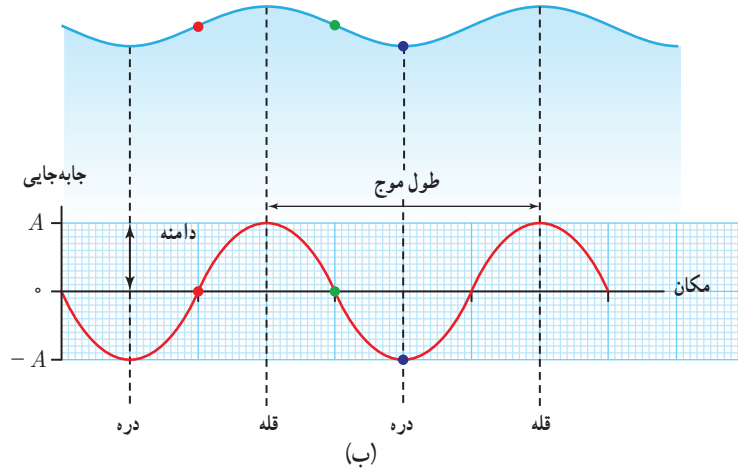
از اینجا درمی‌یابیم که تندی انتشار موج سطحی روی آب‌های کم عمق، به عمق آب که یکی از ویژگی‌های محیط انتشار موج است بستگی دارد.

موج عرضی و منتهضه‌های آن : موج روی سطح آب، که در بالا بررسی کردیم، نمونه‌ای تقریبی از موج عرضی است. اگر یک سِرِ فزاینده کشیده‌شده‌ای را با حرکت هاب‌هاگ، ساده، یایی به بالا و پایین حرکت دهید موج عرضی پیوسته‌ای در طول فتر منتشر می‌شود (شکل ۱۸-۳ الف). امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فتر، در هر لحظه از زمان انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۱۸-۳ ب مدل‌سازی کرد. در این شکل طول موج و دامنه این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.

شکل ۱۸-۳ الف) یک موج عرضی در فتر کشیده شده و به مدل سینوسی برای این موج

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 مؤلفه 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.



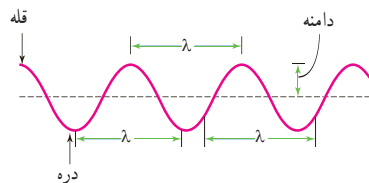


در این فیلم حرکت دایره‌ای ذرات آب روی سطح آن را می‌بینید.



فیلم

خوب است به دانش‌آموزان گوشزد کنید که طول موج صرفاً فاصله دو قله (ستیغ) یا دو دره (پاستیغ) متوالی نیست و فاصله هر دو نقطه «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 فاصله بین دو نقطه هم‌شکل متوالی نشان دهید.



فیزيك ۳۳

مثال ۳-۳

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب نسبت به شکل ۱۶-۳ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دوره تناوب $1/10$ s در نشی به عمق $2/5$ cm توسان کند، فاصله بین دو برآمدگی مجاور 5 cm و اگر در نشی به عمق $3/5$ cm توسان کند، این فاصله 6 cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این نسبت در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ: فاصله دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دوره تناوب موج برابر با دوره تناوب توسان‌های چشمه موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطه $v = \lambda / T$ به دست می‌آوریم.

با قرار دادن $\lambda = 5$ cm و $T = 1/10$ s در رابطه $v = \lambda / T$ خواهیم داشت:

$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{5 \times 10^{-2} \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 0.5 \text{ m/s}$$

و با قرار دادن $\lambda = 6$ cm و $T = 1/10$ s در رابطه $v = \lambda / T$ خواهیم داشت:

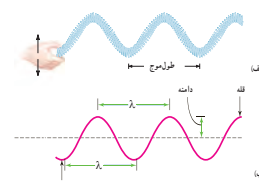
$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{6 \times 10^{-2} \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 0.6 \text{ m/s}$$

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، نوعی از موج عرضی است.

تقریبی از موج عرضی است. اگر یک سر فتر بلند کشیده‌شده‌ای را با حرکت هاهنگ ساده، یایی به بالا و پایین حرکت دهید موج عرضی پیوسته‌ای در طول فتر منتشر می‌شود (شکل ۱۸-۳ الف).

امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فتر، در هر لحظه از زمان انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۱۸-۳ ب مثل‌سازی کرد. در این شکل طول موج و دامنه این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۳ الف) یک موج عرضی در فتر کشیده شده و ب) مدل سینوسی برای این موج

پرسش ۳-۴

شکل رویه‌رو موجی عرضی را نشان می‌دهد. دامنه و طول موج هر کدام از شکل موج‌های الف، ب و ج را با دامنه و طول موج این شکل مقایسه کنید.

شکل ۱۹-۳: نقش یک موج عرضی را در چند لحظه متفاوت در مدت یک دوره تناوب (T) نشان می‌دهد. در این مدت، هر ذره از محیط یک نوسان کامل انجام داده است و موج به اندازه یک طول موج (λ) پیشروی کرده است. بنابراین تندی انتشار موج عرضی نیز از همان رابطه ۳-۴ بدست 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 رابطه زیر بدست می‌آید:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (۱۰-۳)$$

(تندی انتشار موج عرضی در تار یا فنر)

مثال ۳-۴

فنری به جرم 0.60 kg و طول 2.0 m را با نیروی $1/2 \text{ N}$ 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 $1/10 \text{ m}$ شود؟

پاسخ: (الف) با استفاده از رابطه ۳-۴ تندی انتشار موج را بدست می‌آوریم. در اینجا $F = 1/2 \text{ N}$ است و چگالی خطی جرم برابر است با:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0.60 \text{ kg}}{2.0 \text{ m}} = 0.30 \text{ kg/m}$$

بنابراین تندی انتشار v چنین می‌شود:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{1/2 \text{ N}}{0.30 \text{ kg/m}}} = 1.8 \text{ m/s}$$

(ب) با استفاده از رابطه ۳-۴ بسامد f را بدست می‌آوریم:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{1.8 \text{ m/s}}{1/10 \text{ m}} = 18 \text{ Hz}$$

پاسخ پرسش ۳-۴

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

اثبات رابطه ۳-۱۰ به‌سادگی با روش تحلیل ابعادی صورت می‌گیرد. همچنین در بسیاری از کتاب‌ها اشاره کرده‌اند که این رابطه برای دامنه‌های کم برقرار است.

در شکل ۱۹-۳ توجه داده شود که ناحیه سایه‌دار آبی، حرکت یک طول موج از موج را نشان می‌دهد. به عبارتی، هر سه نقطه نشان داده شده در شکل با پیشروی موج به اندازه یک طول موج، یک نوسان کامل را انجام داده‌اند که زمان این نوسان کامل دوره تناوب T است.

برای اینکه دانش‌آموزان به درکی از تندی انتشار امواج عرضی برسند می‌توانید با تهیه اسباب‌فعالیتی که در فعالیت پیشنهادی بخش ۳-۵ 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.

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



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



پاسخ تمرین ۳-۴

از رابطه $v = \lambda f$ استفاده می‌کنیم که در آن $v = m/L$ است. بنابراین به ترتیب برای بالاترین و پایین‌ترین بسامد داریم:

$$v_H = \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{226\text{ N}}{(0.0208 \times 10^{-3} \text{ kg}) / (0.628 \text{ m})}} =$$

$$= 826.0 \text{ m/s} \approx 826 \text{ m/s}$$

$$v_L = \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{226\text{ N}}{(3/32 \times 10^{-3} \text{ kg}) / (0.628 \text{ m})}} =$$

$$= 206.8 \text{ m/s} \approx 207 \text{ m/s}$$

تمرین ۳-۴

در سازه‌های زهی همانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شل کردن تار، تبدی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت ۶۲۸ cm است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار ۰.۰۲۰۸ kg و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار ۰.۰۰۳۲۳۵ kg است. تارها تحت کشش و نیروی ۲۲۶ N قرار دارند. تبدی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر است؟

انتقال انرژی در موج عرضی: هر موجی حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان با فتر کشنده 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 فتر را شخصی تأمین می‌کند که سر ریسمان با فتر را دائماً به نوسان درمی‌آورد. ثابت می‌شود مقدار متوسط آهنگ انتقال انرژی (انرژی متوسط) در یک موج سینوسی برای همه انواع امواج مکانیکی با مربع دامنه (A) و نیز مربع بسامد (f) 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 رابطه 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 رابطه متقابل میدان‌ها سبب انتقال نوسان‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از یک نقطه فضا به نقاط دیگر و با همان انتشار موج الکترومغناطیسی می‌شود. ایجاد میدان الکتریکی به علت تغییر میدان مغناطیسی همان افق‌ای الکترومغناطیسی است که در سال ۱۸۶۱ میلادی توسط مایکل فاراد به‌طور تجربی کشف شد و در کتاب فیزیک ۲ با آن آشنا شدید. پیدا کردن امواج الکترومغناطیسی به جالب رسیده و انتشار این تاب‌های الکترومغناطیسی به‌طور وسیع و فزاینده در زندگی ما و به‌ویژه در ارتباطات و مخابرات و پزشکی و در زمینه‌های دیگر، خیره‌کننده و شگفت‌انگیز شده است. در سال ۱۸۶۵ میلادی پیش‌بینی شد. ماکسول از این دو پدیده نتیجه گرفت که امواج الکترومغناطیسی باید از تغییرات همزمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشند. شکل ۳-۴. یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمه تولید موج نشان می‌دهد.

شکل ۳-۴ یک تصویر لحظه‌ای از موجی الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد قائم (y) و میدان مغناطیسی در امتداد افقی (x) و انتشار موج در جهت z است.

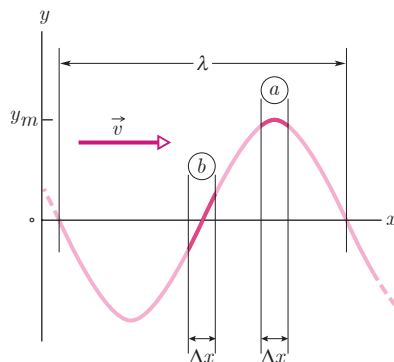
خوب است در انتهای تمرین ۳-۴ اشاره شود که انتشار موج‌های عرضی در طول یک تار کشیده در چگونگی کار سازه‌های موسیقایی زهی نظیر تار، گیتار، کمانچه، ویولن، پیانو، سنتور و... اهمیت دارد. در این سازه‌ها، تار توسط زخمه، آرشه، ضربه، چوب کمانه و... نواخته می‌شود. با سفت یا شل کردن تار، تبدی انتشار موج عرضی در تار 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.

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، در حالی که وقتی این جزء از مکان‌های بیشینه 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 بیشینه 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 پیشینه 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 پیشینه جابه‌جایی، جزء a طول عادی خود را دارد، در حالی که در مکان تعادل، جزء b بیشترین کشیدگی را داراست.

خوب است بدانید رابطه دقیق متوسط انتقال انرژی در ریسمان به صورت $\bar{P} = 2\pi\mu v f^2 A$ است، که در آن μ جرم واحد طول ریسمان، v تندی انتشار موج عرضی، f بسامد موج، و A دامنه موج است.

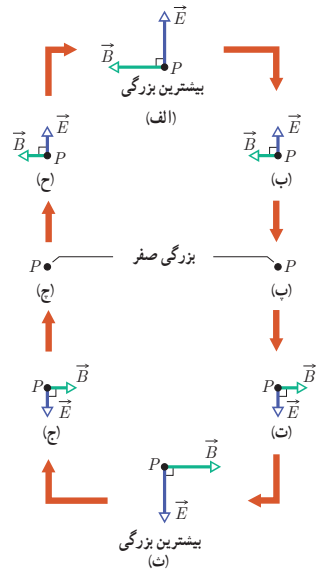
تندی انتقال انرژی در موج عرضی: هر موج حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان با فرکانس f و دامنه A موجی عرضی را ایجاد می‌کنیم، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده‌ایم. با انتشار موج، این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می‌یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت و کشیدگی هر جزء ریسمان با فاصله از منبع انتقال می‌کند که سر ریسمان یا فاصله را دائماً به نوسان درمی‌آورد. ثابت می‌شود مقدار متوسط آنگاه انتقال انرژی توان متوسط در یک موج سینوسی برای همه 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 باشند، میدان مغناطیسی حاصل از آن ثابت و بدون تغییر می‌شود. امواج الکترومغناطیسی از رابطه متقابل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌وجود می‌آیند. چنانچه تغییر 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 رابطه متقابل میان‌ها سبب انتقال نوسان‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از یک نقطه 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 فاراد به‌طور تجربی کشف شد و در کتاب فیزیک ۲ با آن آشنا شدید. پدیده 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 هرزمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشند. شکل ۳-۲، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمه تولید موج نشان می‌دهد.

تندی انتقال انرژی در موج عرضی: هر موج حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان با فرکانس f و دامنه A 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 فاصله از منبع انتقال می‌کند که سر ریسمان یا فاصله را دائماً به نوسان درمی‌آورد. ثابت می‌شود مقدار متوسط آنگاه انتقال انرژی توان متوسط در یک موج سینوسی برای همه 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 باشند، میدان مغناطیسی حاصل از آن ثابت و بدون تغییر می‌شود. امواج الکترومغناطیسی از رابطه متقابل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌وجود می‌آیند. چنانچه تغییر 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 رابطه متقابل میان‌ها سبب انتقال نوسان‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از یک نقطه 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 فاراد به‌طور تجربی کشف شد و در کتاب فیزیک ۲ با آن آشنا شدید. پدیده 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 هرزمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشند. شکل ۳-۲، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمه تولید موج نشان می‌دهد.

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



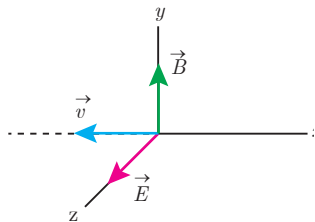
تغییرات میدان الکتریکی \vec{E} و میدان مغناطیسی \vec{B} در نقطه‌ای دور از یک چشمه موج الکترومغناطیسی، در یک دوره تناوب، توجه کنید که موج رو به خارج، عمود بر صفحه شکل در حرکت است.

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

فیلم

پاسخ پرسش ۳-۵

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



تجربیه ۳-۲



در سازه‌های رهی، مانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک کمانچه طول تار بین دو انتهای ثابت ۶۸cm است. برای واکنش بالاترین بسامد، جرم تار ۰.۰۰۸g و برای واکنش پایین‌ترین بسامد، جرم تار ۰.۰۰۸g است. تارها تحت کششی برابر ۲۲۸N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر 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 رابطه متقابل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بوجود 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 بوجود می‌آورد. این رابطه متقابل میدان‌ها سبب انتقال توان‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از یک نقطه 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 فارادای به‌طور تجربی کشف شد و در کتاب فیزیک ۲ با آن آشنا شدید. پدیده 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 هورمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشند. شکل ۳-۲، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمه تولید موج نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲: یک تصویر لحظه‌ای از موج الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد قائم (y) و میدان مغناطیسی در امتداد افقی (x) و انتشار موج در جهت +x است.

شکل ۳-۲: نوسان و موج



شکل ۳-۲: نوسان و موج

چند مشخصه بارز چنین موجی به قرار زیر است:
۱- میدان الکتریکی \vec{E} همواره عمود بر میدان مغناطیسی \vec{B} است.
۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی \vec{E} و \vec{B} همواره بر جهت حرکت موج عمودند و در نتیجه موج الکترومغناطیسی، یک موج عرضی است.
۳- میدان‌ها با بسامد یکسان و همگام با یکدیگر تغییر می‌کنند.
جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان مطابق شکل ۳-۲ از قاعده دست راست تعیین کرد.

پرسش ۳-۵

در یک لحظه خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت +y و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت +x است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های +y، +x و +z را مانند شکل ۳-۲ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ به‌دست می‌آید، که در آن ϵ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برای $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ مقدار $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ به‌دست می‌آید. با استفاده از این رابطه گرادیان الکتریکی خلأ و برای $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ مقدار $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ به‌دست می‌آید. این نتیجه‌ای فراتر از آزمون لویی فیز (۱۸۹۶-۱۸۹۷ م.) به روش تجربی به‌دست آمده بود. این نتیجه‌ای بسیار مهم بود، زیرا نشان می‌داد نور، یک موج الکترومغناطیسی است. نظریه ماکسول نیاز به تأیید تجربی داشت. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با ایجاد نوسان‌های الکتریکی و سیماسی، آزمایش‌های مشهوری در تأیید نظریه ماکسول انجام داد. هرز نشان داد که امواج رادیویی نیز با همان تندی نور می‌در آزمایشگاه حرکت می‌کنند و این حاکی از سرشت یکسان امواج رادیویی و نور می‌بود.

مثال ۳-۲

گستره بسامد نور مرئی از $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ تا $7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (نور قرمز) تا $7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (نور بنفش) است. گستره طول‌موج‌های مربوط به نور مرئی در خلأ را بر حسب نانومتر تعیین کنید.

پاسخ:

نور یک نوع موج است و برای آن می‌توان از رابطه $c = \lambda f$ استفاده کرد.

اما برای امواج نور مرئی (نور مرئی) $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ است. بنابراین برای هر دو حد پایین و بالای طول‌موج طیف نور مرئی به‌ترتیب داریم:

$$\lambda_{\text{پایین}} = \frac{c}{f_{\text{پایین}}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{4 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 7.5 \times 10^{-7} \text{ m} = 750 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{بالا}} = \frac{c}{f_{\text{بالا}}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{7 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4.3 \times 10^{-7} \text{ m} = 430 \text{ nm}$$

فصل ۳۳ نوسان و موج

چند مشخصه بارز چنین موجی به قرار زیر است:

- ۱- میدان الکتریکی \vec{E} هواره عمود بر میدان مغناطیسی \vec{B} است.
- ۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی \vec{E} و \vec{B} هواره بر جهت حرکت موج عمودند و در نتیجه موج الکترومغناطیسی، یک موج عرضی است.
- ۳- میدان‌ها با بسامد یکسان و همگام با یکدیگر تغییر می‌کنند.

جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان مطابق شکل ۳-۲۱ از قاعده دست راست تعیین کرد.

توضیح ۳-۳۱

در یک لحظه خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت $\pm z$ و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت $\pm y$ است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های $\pm x$ و $\pm y$ و $\pm z$ را مانند شکل ۳-۲۰ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ به دست می‌آید، که در آن ϵ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برای $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ و $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m}/\text{A}$ مقدار c با استفاده از این رابطه $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ می‌شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش‌تر توسط فیزیکدان فرانسوی آرمند لوئیس فیزو (۱۸۴۹-۱۸۹۶ م.) به روش تجربی به دست آمده بود. این نتیجه‌ای بسیار مهم بود، زیرا نشان می‌داد نور، یک موج الکترومغناطیسی است.

نظریه ماکسول نیاز به تأیید تجربی داشت. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با ایجاد نوسان‌های الکتریکی ژر بسامدی، آزمایش‌های مشهوری در تأیید نظریه ماکسول انجام داد. هرتز نشان داد که امواج رادیویی نیز با همان تندی نور در خلأ منتشر می‌کنند و این جالبی از سرست یکسان امواج رادیویی و نور مرئی بود.

مثال ۳-۷

گستره بسامد نور مرئی از $4.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ تا $7.9 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (نور قرمز) تا $7.9 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (نور بنفش) است. گستره 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 رابطه $c = \lambda f$ استفاده کرد. اما برای این موج «برای λ تندی نور ($c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$) است. بنابراین برای دو حد پایین و بالای طول موج طیف نور مرئی به ترتیب داریم:

$$\lambda_{\text{بنفش}} = \frac{c}{f_{\text{بنفش}}} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{7.9 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 3.8 \times 10^{-7} \text{ m} = 380 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{قرمز}} = \frac{c}{f_{\text{قرمز}}} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{4.0 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 7.5 \times 10^{-7} \text{ m} = 750 \text{ nm}$$

طیف نور مرئی

۷۵۰

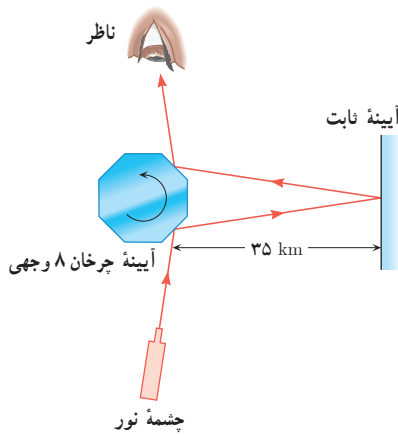
در اینجا خوب است دانستی مربوط به اندازه‌گیری تندی نور توسط فیزو و سپس مایکلسون را مطرح کنید.

خوب است اشاره کنید تأیید تجربی نظریه ماکسول به میدان‌های با شدت کافی بزرگ نیاز دارد و لازمه بزرگی این میدان‌ها آن است که نوسان‌های الکتریکی و مغناطیسی با بسامد بسیار زیادی تولید شود. مثلاً بسامد برق شهر (50 Hz) برای چنین آزمایش‌هایی مناسب نیست و به بسامدهای بسیار بالاتری نیاز است.

دانستی

اندازه‌گیری تندی نور

یک روش قدیمی برای اندازه‌گیری تندی نور، استفاده از چرخ دندانه‌دار چرخانی است. آرمند لوئیس فیزو (۱۸۹۶-۱۸۱۹ م.) 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 فاصله دور گسیل کرد. او تندی زاویه‌ای چرخ (زاویه‌ای که چرخ در یک ثانیه می‌چرخد) را به گونه‌ای تنظیم کرد که با باریکه نور درست در زمانی به چرخ بازگردد که با نخستین شکاف بعدی مواجه شود و بدین ترتیب ناظر برای نخستین بار باریکه بازتابیده نور را ببیند. با توجه به معلوم بودن تعداد دندانه‌های چرخ، فاصله چرخ از آینه و نیز تندی زاویه‌ای چرخ در این حالت، او توانست با یک محاسبه ساده تندی نور را 313000 km/h به دست آورد. بعداً ژان فوکو (۱۸۶۸-۱۸۱۹ م.) با انجام تغییراتی در این آزمایش، مقدار دقیق‌تری برای تندی نور به دست آورد. اما مقدار دقیق‌تر تندی نور توسط فیزیکدان آمریکایی آلبرت مایکلسون (۱۹۳۱-۱۸۵۲ م.) به دست آمد. او توسط چینش آزمایشگاهی‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده است، باریکه نور لیزری را به سمت آینه ۸ وجهی چرخانی گسیل کرد که این نور پس از بازتاب از آینه‌ای ثابت، واقع در کوه سن آنتونیو که در فاصله 35 km از آینه چرخان قرار داشت به وجه دیگری از آینه چرخان برخورد کرد. او به ازای کمترین تندی زاویه‌ای چرخش آینه که ناظر می‌توانست باریکه بازتابیده از آینه چرخان را ببیند، تندی نور را در سال ۱۹۲۶، برابر با $c = (299792458 \pm 0.00004) \times 10^8 \text{ m/s}$ به دست آورد.



شکل ۲- طرحی از چشش آزمایش مایکلسون



شکل ۱- طرحی از چشش آزمایش فیزو

پاسخ تمرین ۳-۵

رابطه‌ای که باید استفاده کنیم رابطه ۳-۹ ($v = \lambda f$) است که برای امواج الکترومغناطیسی باید به جای v از تندی نور ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) استفاده کنیم. از آنجا برای بسامد f خواهیم داشت:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{4 \times 10^{-2} \text{ m}} = 7.5 \times 10^9 \text{ Hz} \approx 7.5 \text{ GHz}$$

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

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



فیوزیوتک ۳۳

نمود ۳-۵

طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{1}{4}$ طول موج درافتی است. اگر طول چشش آنتنی تقریباً برابر ۸۵cm باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می‌کند تعیین کنید.

نمایش ۲-۳

مطابق شکل روی‌هم‌رو یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظه تخلیه هوای شیشه‌ای آویزان کنید. با برقراری تماس با گوشی، صدای آن را خواهید شنید. ولی با به کار افتادن پمپ تخلیه هوا، صدا به تدریج 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 که به‌صورت انرژی جنبشی و انرژی تابشی در آن محیط، بلکه به‌صورت انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مستقل می‌کنند. مثلاً کل انرژی درافتی از خورشید که باعث بقای زندگی روی کره زمین می‌شود، از نوع امواج الکترومغناطیسی است. با اینکه خورشید در فاصله ۱۵۰ میلیون کیلومتری از زمین قرار دارد، توان امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از خورشید که به سطح زمین می‌رسد، تقریباً ۱۰۰۰ میلیون گیگاوات است. جالب است که بدانید مرتبه 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، فرورسوخ، طیف نور مرئی، فرابنفش، پرتوهای X و پرتوهای گاما است، که از کمترین بسامد تا بیشترین بسامد گسترده شده‌اند (شکل ۳-۲۴). تمام این امواج به‌رغم تفاوت فرکانس در روش‌های تولید و کاربردهای آنها، امواجی الکترومغناطیسی هستند و هنگامی با تندی نور در خلأ حرکت می‌کنند و هیچ گسستگی‌ای در این طیف وجود ندارد.

شکل ۳-۲۴ طیف امواج الکترومغناطیسی

۷۶

پاسخ فعالیت ۳-۴

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 تخلیه 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.

فصل ۳۳

نمایش ۳-۴

طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{1}{4}$ طول موج دربرافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر ADecm باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می‌کند تعیین کنید.

فعالیت ۳-۴

مطابق شکل روبرو یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظه تخلیه هوای تیننده‌ای آویزان کنید. با برقراری تماس با گوشی، صدای آن را خواهید شنید. ولی با به کار افتادن پمپ تخلیه هوا، صدا به تدریج 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 به صورت انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ذرات محیط، بلکه به صورت انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می‌کنند. مثلاً کل انرژی دربرافتی از خورشید که باعث بقای زندگی روی کره زمین می‌شود از نوع امواج الکترومغناطیسی است. با اینکه خورشید در فاصله 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 به ایند مرتبه 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 ۳-۴). 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 ۳-۴ طیف امواج الکترومغناطیسی

۷۶

در این فیلم، نمایشی از آزمایش فعالیت ۳-۴ را می‌بینید.



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

در این فیلم‌ها کاربردهایی از امواج الکترومغناطیسی را می‌بینید.

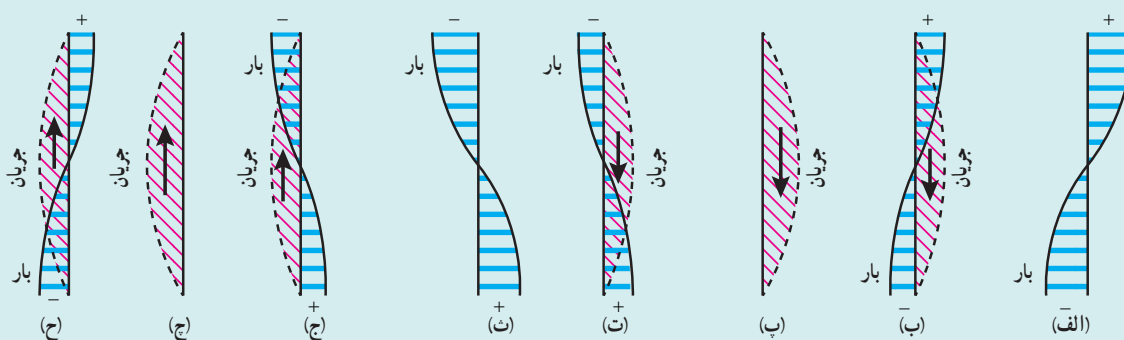


در این فیلم طرحی از انتشار موج الکترومغناطیسی را می‌بینید.



آنتن‌ها

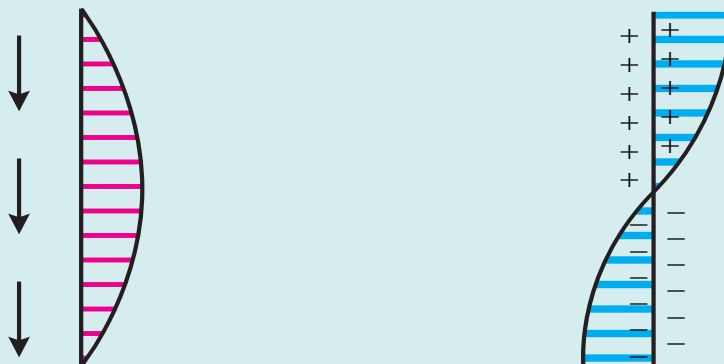
عامل اصل ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتابدارند. در آنتن از یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بار الکتریکی استفاده می‌شود. از آنتن‌ها به‌عنوان چشمه موج‌های الکترومغناطیسی در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۱ چگونگی تولید یک موج الکترومغناطیسی را در یک آنتن نشان می‌دهد، دو میله فلزی به یک مولد 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 نیمه 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، بیشینه مقدار خود را به دست 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 به تدریج 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 به دست می‌آورند. این به آن معناست که آنتن دوباره باردار شده است (شکل ۱ ث). در مدت نیم‌دوره بعدی، فرایندی که در بالا شرح داده شد در جهت خلاف جریان تکرار می‌شود (شکل ۱ ج-ث). در نتیجه، در آخر دوره دوباره حالت اولیه برقرار می‌شود (مقایسه کنید با شکل ۱ الف).



شکل ۱- 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 پیچ 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 تار در حال ارتعاش متمرکز دارد. از طرف دیگر، هر دو نوع انرژی در تمام تار توزیع شده‌اند.

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



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

شکل ۳- جریان داخل آنتن در وسط مقدار بیشینه خود را به دست می‌آورد و در دو انتها از بین می‌رود.

جریان در قسمت‌های مختلف آنتن نیز متفاوت است. وقتی بارها از یک نیم آنتن به نیم دیگر آن جریان می‌یابد، به طور طبیعی در دو انتهای آنتن جمع می‌شوند به طوری که جریان در این دو انتها همیشه مساوی صفر است. در ناحیه وسط آنتن، جریان بیشینه است (شکل ۳).

از دیدگاه نظریه 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 مد نوسان‌ها در هر دو یکی است. از این نظر، 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. به سهولت دیده می‌شود که توزیع جریان در آنتن (شکل ۳) دقیقاً همان توزیع دامنه در تار است که در دو انتها ثابت شده باشد (شکل ۴-۳۷ فصل چهارم). توزیع بار در نوسانگر (شکل ۲) مشابه توزیع دامنه ارتعاش ستون هوا در لوله‌ای است که در دو انتها باز باشد (شکل ۴-۳۸ فصل چهارم). از این رو 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 حالی که 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 ساده‌تر زیر را برای بسامد طبیعی نوسانگر به دست می‌آوریم:

$$f = c/2l$$

این بسامد طبیعی اصلی (بایین‌ترین) 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.

پاسخ فعالیت ۳-۵

نواحی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، به ترتیب از امواج کم بسامد 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 گستره‌ای 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. چشمه اصلی این امواج یک لامپ خلأ موسوم به مگنترون است.

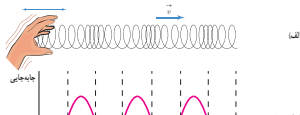
فصل ۱۴: نوسان و موج

فعالیت ۳-۵

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

موج طولی و مشخصه‌های آن: در انتشار موج طولی در یک فتر بلند کشیده شده داریم که با انتشار موج ناحیه‌های جمع‌شدگی و پرازشدگی به‌طور متناوب در طول فتر ظاهر می‌شوند. برای اینکه این موج را مدل‌سازی کنیم لازم است ناحیه‌های جمع‌شدگی و پرازشدگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان‌هایی که بیشترین جمع‌شدگی یا بیشترین پرازشدگی حلقه‌ها رخ می‌دهد، جابه‌جایی هر جزء فتر از وضعیت تعادل برابر صفر است. در وسط فاصله بین یک جمع‌شدگی بیشینه و یک پرازشدگی بیشینه مجاور هم، اندازه جابه‌جایی هر جزء فتر از وضعیت تعادل، بیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای فتر شکل ۲۳-۳ الف، نمودار جابه‌جایی - مکان شکل ۲۳-۳ ب را رسم کرد. با استفاده از چنین نموداری، برای یک موج طولی نیز می‌توانیم همان مشخصه‌های موج عرضی را تعریف کنیم؛ مثلاً در حالی که طول موج برای امواج عرضی برابر با فاصله دو قله یا دو دره متوالی است، در مورد امواج طولی، طول موج برابر با فاصله بین دو تراکم (رای فتر، جمع‌شدگی) یا دو انبساط (رای فتر، پرازشدگی) متوالی است. همچنین دامنه موج طولی برابر با بیشینه جابه‌جایی از مکان تعادل است.

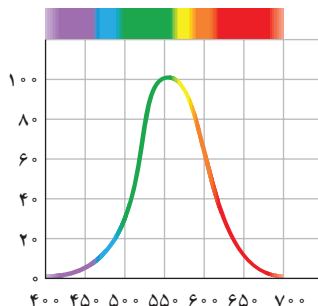
در اینجا نیز همانند موج عرضی، هر جزء فتر در مدت یک دوره (T) یک نوسان کامل انجام می‌دهد و در این مدت موج به اندازه یک طول موج (λ) پیشروی می‌کند. بنابراین تندی انتشار موج طولی نیز با همان رابطه موج عرضی به طول موج و دوره تناوب بستگی دارد ($v = \lambda/T$). البته این به این معنا نیست که در یک جسم تندی انتشار 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 ۲۳-۳ الف: تصویری لحظه‌ای از ایجاد توجای جمع‌شدگی و پرازشدگی در طول یک فتر بلند کشیده شده. ب: نمودار موج طولی سینوسی بر فتر دریا نمودار جابه‌جایی - مکان برای موج پرازشدگی در فتر

۷۷

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 50°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 همه امواج فروسرخ 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.

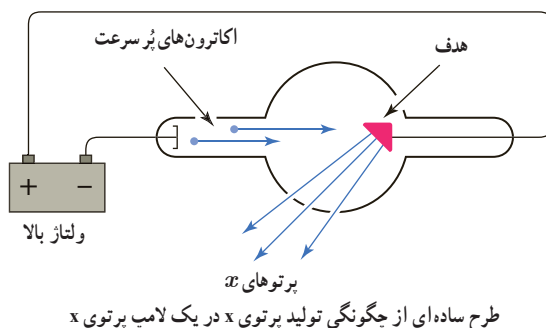


حساسیت یک جسم سالم به طول موج‌های مختلف طیف نور مرئی

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 - سبز تعلق دارد و حساسیت چشم به سرعت در دو سوی این طول موج کاهش می‌یابد.

امواج فرابنفش : به این امواج به این دلیل فرابنفش می‌گویند که بسامد آنها بیشتر از بسامد نور مرئی 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 پوش سپهر (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، اوزن (O_2) است که از برهم‌کنش اکسیژن (O_2) با تابش فرابنفش حاصل می‌شود. این اوزن حاصل، مانع از رسیدن تابش فرابنفش مرگبار به سطح زمین می‌گردد. برخی مواد تحت تابش فرابنفش، نور مرئی گسیل می‌کنند که به این، **خاصیت فلئورسانسی** می‌گویند و از این ویژگی در برخی مصارف از جمله لامپ‌های مهتابی و تلویزیون‌های پلاسما استفاده می‌شود. تابش فرابنفش کاربردهای فراوانی دارد که از آن جمله استرلیزه کردن محیط ابزارآلات پزشکی و آزمایشگاه‌های زیست‌شناسی است.

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



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 به سادگی 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: پرنرژی‌ترین 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 تکنیتیوم 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.



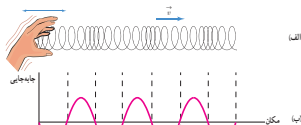
تصویری از دستگاه جراحی مغز با پرتوی گاما

فعالیت ۵-۲

در مورد توافقی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، جگرگی تولید و کاربردهای آنها تحقیق کنید.

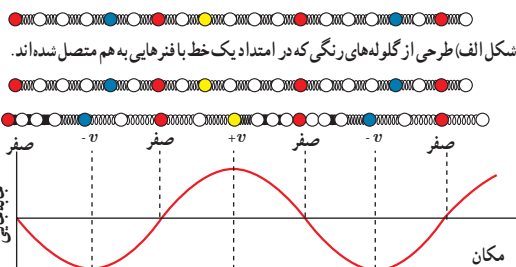
موج طولی و مشخصه‌های آن : در انتشار موج طولی در یک فرستنده کننده شده دیدیم که با انتشار موج، تابه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فر ظاهر می‌شوند. برای اینکه این موج را مدل‌سازی کنیم لازم است تابه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان‌هایی که بیشترین جمع‌شدگی یا بیشترین بازشدگی حلقه‌ها رخ می‌دهد، جابه‌جایی هر جزء، قدر از وضعیت تعادل برابر صفر است. در وسط فاصله بین یک جمع‌شدگی بیشینه و یک بازشدگی بیشینه مجاور هم، اندازه جابه‌جایی هر جزء قدر از وضعیت تعادل، بیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای فر شکل ۲۳-۳ الف، نمودار جابه‌جایی - مکان شکل ۲۳-۳ ب را رسم کرد. با استفاده از چنین نموداری برای یک موج طولی نیز می‌توانیم همان مشخصه‌های موج عرضی را تعریف کنیم؛ مثلاً در حالی که طول موج برای امواج عرضی برابر با فاصله دو قله یا دو دره متوالی است، در مورد امواج طولی، طول موج برابر با فاصله بین دو تراکم (وای فر، جمع‌شدگی) یا دو انبساط (وای فر، بازشدگی) متوالی است. همچنین دامنه موج طولی برابر با بیشینه جابه‌جایی از مکان تعادل است.

در اینجا نیز هشتاد موج عرضی، هر جزء قدر در مدت یک دوره (T) یک نوسان کامل انجام می‌دهد و در این مدت موج به اندازه یک طول موج (λ) پیشروی می‌کند. بنابراین تندی انتشار موج طولی نیز با همان رابطه موج عرضی به طول موج و دوره تناوب بستگی دارد (vλ = 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.



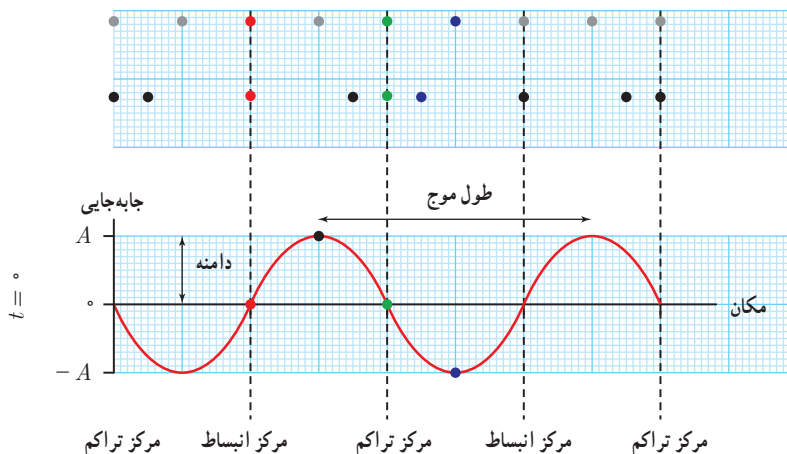
شکل ۲۳-۳ الف: تصویری لحظه‌ای از ایجاد توافقی جمع‌شدگی و بازشدگی در طول یک فر بسته کشیده، هنگام انتشار موج طولی سینوسی در فر. ب: نمودار جابه‌جایی - مکان برای موج ایجاد شده در فر

خوب است در اینجا دوباره با اسباب فعالیت پیشنهادی بخش ۵-۳ به تفهیم این مطالب بپردازیم. طرحی از گلوله و فنر این اسباب در شکل الف با رنگ آمیزی چند گوی نشان داده شده است، به طوری که در حالت تعادل (وقتی هنوز دستگاه به نوسان واداشته نشده است) فاصله گوی‌های قرمز متوالی برابر $\frac{\lambda}{4}$ است. وقتی گوی قرمز سمت چپ به‌طور هماهنگ ساده به نوسان درمی‌آید، موجی طولی در راستای فنرها ایجاد می‌شود، به طوری که در لحظه نشان داده شده در شکل ب گوی‌های آبی رنگ به سمت چپ و گوی زرد رنگ به سمت راست حرکت می‌کند، در حالی 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 اولیه خود را برحسب این مکان رسم کنیم به نمودار سینوسی پایین شکل ب می‌رسیم که به آن اصطلاحاً نمودار جابه‌جایی - مکان برای موج طولی می‌گویند. شکل پ نیز ترسیم مشابهی را برای هر موجی طولی نشان می‌دهد.



شکل ۲۳-۴ ب: عکس لحظه‌ای از شکل الف، وقتی موجی طولی در راستای فنرها ایجاد شود.

پایین: منحنی جابه‌جایی - مکان برای همه نقاط موج



شکل ۲۳-۵: منحنی جابه‌جایی - مکان برای همه نقاط

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

توجه کنید برای هر دو موج طولی و عرضی رابطه $v = \lambda / f$ برقرار است و بنابراین طول موج طولی از طول موج موج عرضی در یک محیط بیشتر است. همان طور که در متن درس اشاره شده است منظور از یک محیط، محیط جامد است، زیرا موج عرضی صرفاً در جامدات می تواند منتشر شود و بنابراین این مقایسه فقط در جامدها می تواند صورت گیرد. ولی چرا چنین است؟ در مورد موج عرضی، امواج اصطلاحاً برشی (shear) هستند و در محیط انتشار، لایه های عمود بر راستای انتشار در هنگام ارتعاش به موازات یکدیگر فقط جابه جا می شوند، بی آنکه به یکدیگر نزدیک یا دور شوند. در حالی که در مایعات و گازها، لایه های مجاور، بی آنکه نیروهای کشسان مخالف ظاهر شوند، روی یکدیگر به راحتی می لغزند و چون نیروهای کشسان وجود ندارند، پس امواج کشسان نیز نمی توانند تشکیل شوند. اما در مورد موج طولی که اصطلاحاً به آنها امواج تراکمی نیز می گویند، در نواحی مختلف محیط، تراکم ها و انبساط هایی ظاهر می شود و در این تغییر شکل لایه ها نیروهای کشسانی ظاهر می شوند و به همین علت امواج طولی در هر سه حالت دیده می شوند.

در این فیلم طرحی از انتشار موج طولی را می بینید.

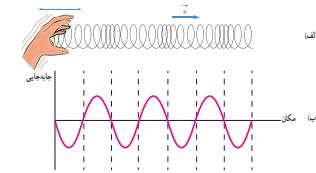


فصلیت ۳-۲

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

موج طولی و مشخصه های آن : در انتشار موج طولی در یک فتر بلند کشیده شده دیم که با انتشار موج، ناحیه های جمع بندی و بازندگی به طور متناوب در طول فتر ظاهر می شوند. برای اینکه این موج را مدل سازی کنیم لازم است ناحیه های جمع بندی و بازندگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان های که بیشترین جمع بندی یا بیشترین بازندگی حلقه ها رخ می دهد، جابه جایی هر جزء فتر از وضعیت تعادل برابر صفر است. در وسط فاصله بین یک جمع بندی و یک بازندگی بیشینه مجاور هم، اندازه جابه جایی هر جزء فتر از وضعیت تعادل، بیشینه است. به این ترتیب می توان برای فتر شکل ۲۳-۳ الف، نمودار جابه جایی - مکان شکل ۲۳-۳ ب را رسم کرد. با استفاده از چنین نموداری، برای یک موج طولی نیز می توانیم همان مشخصه های موج عرضی را تعریف کنیم؛ مثلاً در حالی که طول موج برای امواج عرضی برابر با فاصله دو قله یا دو دره متوالی است، در مورد امواج طولی، طول موج برابر با فاصله بین دو تراکم (برای فتر جمع بندی) یا دو انبساط (برای فتر، بازندگی) متوالی است. همچنین دامنه موج طولی برابر با بیشینه جابه جایی از مکان تعادل است.

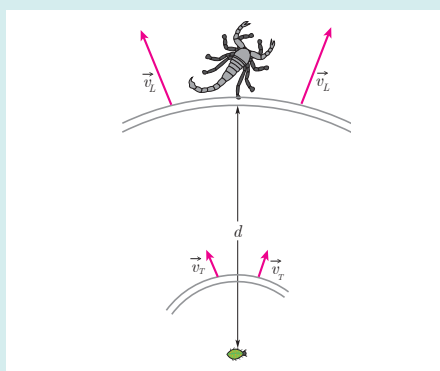
در اینجا نیز همانند موج عرضی، هر جزء فتر در مدت یک دوره (T) یک نوسان کامل انجام می دهد و در این مدت موج به اندازه یک طول موج (λ) پیشروی می کند. بنابراین تندی انتشار موج طولی نیز با همان رابطه موج عرضی به طول موج و دوره تناوب بستگی دارد ($v = \lambda / T$). البته این به این معنا نیست که در یک جسم تندی 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 ۲۳-۳ الف: تصویری لحظه ای از ایجاد نواحی جمع بندی و بازندگی در طول یک فتر بلند کشیده. هنگام انتشار موج طولی سینوسی بر فتر، نمودار جابه جایی - مکان برای موج ایجاد شده در فتر



(الف) عقرب ماسه‌ای



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

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 فاصله طعمه را
با استفاده از امواجی تعیین می‌کند که با حرکت طعمه در سطح ماسه گسیل
می‌شوند. 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 خود روی دایره‌ای به قطر حدود ۵cm قرار
دارد امواج طولی سریع‌تر را دریافت می‌کند و جهت سوسک را تشخیص
می‌دهد. سوسک در جهت آن پای عقرب است که زودتر از بقیه توسط موج
تحریک می‌شود. آنگاه عقرب بازه زمانی بین نخستین دریافت و دریافت موج
عرضی آرام‌تر را حس می‌کند و از آن برای تعیین فاصله خود تا سوسک
استفاده می‌کند. مثلاً یک بازه زمانی ۰/۰۴ ثانیه‌ای بین رسیدن دو موج به
معنی آن است که موج در فاصله ۳۰ سانتی‌متری عقرب تولید شده است. به این
ترتیب عقرب بی‌درنگ جهت و فاصله خود تا طعمه را تعیین می‌کند.

مثال ۳-۳

امواج لرزه‌ای موج‌های مکانیکی‌ای هستند که از لایه‌های زمین عبور می‌کنند. یکی از مشتقات مهم امواج لرزه‌ای، زمین‌لرزه هستند. دو نوع از امواج لرزه‌ای، امواج اولیه P و امواج ثانویه S هستند. امواج طولی و امواج عرضی هستند. معمولاً سرعتی موج‌های P در حدود 8 km/s و سرعتی موج‌های S در حدود 4.5 km/s است. یک دستگاه لرزه‌نگار موج‌های P و S حاصل از یک زمین‌لرزه را ثبت می‌کند. فرض کنید نخستین امواج P ، 3.0 دقیقه پیش از نخستین امواج S دریافت شوند. اگر این موج‌ها روی خط راستی حرکت کنند، زمین‌لرزه در چه فاصله‌ای از محل لرزه‌نگار رخ داده است؟

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

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v_s} - \frac{\Delta x}{v_p} = \frac{\Delta x}{v_p} \left(\frac{v_p}{v_s} - 1 \right)$$

و از آنجا Δt را به دست می‌آوریم

$$\Delta x = \frac{v_p v_s}{v_p - v_s} \Delta t = \frac{(4.5\text{ km/s})(8\text{ km/s})}{(8\text{ km/s}) - (3\text{ km/s})} (3.0 \times 60\text{ s}) = 1.9 \times 10^3\text{ km}$$

موج صوتی: صوت یک موج طولی است که توسط جسمی مرتعش از قیل سیم گیتار، تارهای صوتی حشره انسان، دیافراگم و یا پوسته‌های مرتعش مانند صفحه مرتعش (دیافراگم) یک بلندگو، تولید 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 بازتاب‌دهی‌ها 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 ناحیه جمع‌شدگی در یک فنر کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۲۲-۳ الف). پس از تولید یک ناحیه متراکم، دیافراگم حرکتش

شکل ۲۲-۳ 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 نوبه به جمع‌شدگی و بازشدگی در یک فنر بلند است.

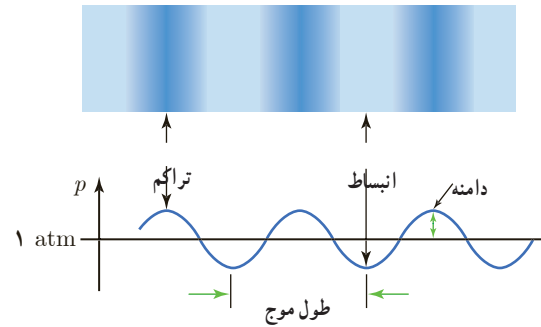
۱. Secondary Waves
۲. Primary Waves
۳. Seismograph

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.

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



در اینجا خوب است نمودار فشار هوا بر حسب فاصله از بلندگو را نیز رسم کنید و به تفاوت آن با منحنی جابه‌جایی - مکان پردازید.



فشار هوا در یک موج صوتی بر حسب فاصله از چشمه صوت به‌طور سینوسی تغییر کرده است.



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

شکل ۳۳-۱: نمودار موج



شکل ۳۳-۲: در حالی که موج از بلندگو به سمت تونل حرکت می‌کند، میکروفن‌های در جای خود تونل می‌کنند

جدول ۳۳-۱: تندی صوت در محیط‌های مختلف

محیط	تندی (m/s)
گازها	
هوا (۰°C)	۳۳۱
هوا (۲۰°C)	۳۴۳
هلیوم (۰°C)	۹۶۵
هیدروژن (۰°C)	۱۲۸۲
مایع‌ها	
متیل الکل (۲۵°C)	۱۱۲۳
آب (۰°C)	۱۴۰۲
آب (۲۰°C)	۱۴۸۲
آب دریا (۲۰°C)	۱۵۲۲
نوری (۳۰°C)	
خامنه	
فولاد	۵۱۲۱
گرافیت	۶۰۰۰
آلومینیم	۶۲۲۰

* فشار هوا ۱ atm است.

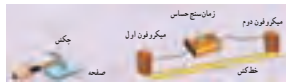
را برعکس می‌کند و به سمت داخل می‌رود. حرکت رو به داخل دیافراگم، هوای جلوی آن را منبسط می‌کند. این انبساط که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود، مشابه ناحیه پازندگی در یک فنر کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳۳-۲). توجه کنید، در حالی که موج از بلندگو به شنونده می‌رسد، هر مولکول هوا، با موج حرکت نمی‌کند، بلکه در مکان ثابتی به جلو و عقب نوسان می‌کند (شکل ۳۳-۳).

پرسش ۳۳-۶ (الف) چگونگی ایجاد صوت توسط دیافراژن را توضیح دهید. (ب) به نظر شما چه ساز و کاری موجب صدای وژوز حشرات هنگام پرواز می‌شود؟

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

آغازگیری‌ها نشان داده است که عموماً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، گرچه استثنائاتی نیز وجود دارد. جدول ۳۳-۱ 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.

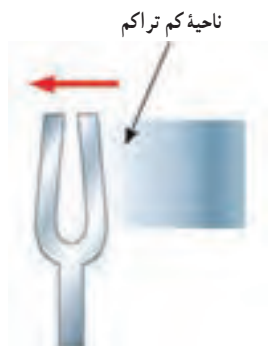
فصلت ۳۳-۴ آغازگیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفن را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری کند. وقتی چکش را به صفحه قفزی بکوبیم، امواج صوتی که به سمت دو میکروفن روانه می‌شوند، نخست میکروفن نزدیک‌تر و سپس میکروفن دورتر را متأثر می‌سازند. اختلاف فاصله میکروفن‌ها از محل برخورد چکش با صفحه قفزی را اندازه می‌گیریم. با استفاده از زمان‌سنج می‌توانیم تأخیر زمانی بین دریافت صوت توسط دو میکروفن را ثبت کنیم. اکنون با استفاده از رابطه $v = \lambda f$ می‌توانیم تندی صوت را در هوا بیابیم. در صورتی که این اسباب را در مدرسه دارید با استفاده از آن، تندی صوت را در هوا اندازه بگیرید.



۱- Fast timer

پاسخ پرسش ۳۳-۶

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



(ب) وقتی شاخه‌های دیابازون به هم نزدیک می‌شوند، لایه‌ی هوای مجاور شاخه منبسط می‌شود.



(الف) وقتی شاخه‌های دیابازون از هم دور می‌شوند، لایه‌ی هوای مجاور شاخه متراکم می‌شود.

(ب) حشرات هنگام پرواز بال‌هایشان را در هر ثانیه صدها بار تکان می‌دهند. بال حشرات مانند صفحه‌ی 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 دیابازون 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.



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



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



شکل ۳۸: نوسان و موج



ارغاسیک
میکروفون

شکل ۳۹: در حالی که موج از بلندگو به سمت بلندگو حرکت می‌کند، میکروفون هوا را در جای خود نوسان می‌کند.

پیش‌زمینه

الف) چگونگی ایجاد صوت توسط دیافراگم را توضیح دهید.

ب) به نظر شما چه سازوکاری موجب صدای و زوژ حشرات هنگام پرواز می‌شود؟

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

اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که عموداً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، هرچه استثنائاتی وجود دارد. جدول ۳-۱ 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.

نمایش ۳-۲

آغازگیری 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 صفحه فیزی بکوبیم، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست میکروفون نزدیک‌تر و سپس میکروفون دورتر را متاثر می‌سازند. اختلاف فاصله میکروفون‌ها از محل برخورد چکش با صفحه فیزی را اندازه می‌گیریم. با استفاده از زمان‌سنج می‌توانیم تأخیر زمانی بین دریافت صوت توسط دو میکروفون را ثبت کنیم. اکنون با استفاده از رابطه $v = \lambda f$ می‌توانیم تندی صوت را در هوا بیابیم. در صورتی که این اسباب را در مدرسه دارید با استفاده از آن، تندی صوت را در هوا اندازه بگیرید.



۱. Fast timer

۷۹

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 رابطه تندی صوت با دما نیز اشاره شود که در آن T دمای محیط برحسب کلوین است:

$$v = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}}$$

پاسخ فعالیت ۳-۶

برای اینکه صحت زمان‌سنج خود را دریابید خوب است بدانید برای یک فاصله ۱ متری بین میکروفون‌ها، در صورتی که محل برخورد چکش در امتداد خط واصل میکروفون‌ها باشد، زمان‌سنج باید تأخیر زمانی حدود 3 ms را نشان دهد. در این صورت تندی صوت حدوداً می‌شود:

$$v = \frac{l}{t} = \frac{1 \text{ m}}{3 \times 10^{-3} \text{ s}} = 333 \text{ m/s}$$

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 مولد سیگنال را به یک بلندگو وصل کنید، به طوری که بسامد آن بین 500 Hz تا 2000 Hz باشد. یکی از میکروفون‌ها باید نزدیک بلندگو باشد و میکروفون دیگر باید به فاصله ۱ متر یا بیشتر از آن قرار گیرد. روی اسیلوسکوپ دو رد موج را مقایسه کنید.

شکل ۳۸: نوسان و موج



ارغاسیک
میکروفون

شکل ۳۹: در حالی که موج از بلندگو به سمت بلندگو حرکت می‌کند، میکروفون هوا را در جای خود نوسان می‌کند.

پیش‌زمینه

الف) چگونگی ایجاد صوت توسط دیافراگم را توضیح دهید.

ب) به نظر شما چه سازوکاری موجب صدای و زوژ حشرات هنگام پرواز می‌شود؟

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

اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که عموداً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، هرچه استثنائاتی وجود دارد. جدول ۳-۱ 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.

نمایش ۳-۲

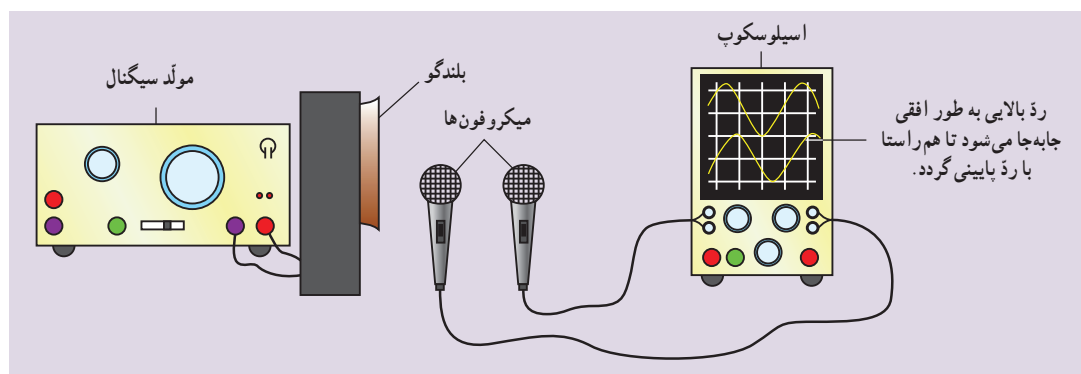
آغازگیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس^۱ متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری کند. وقتی چکش را به صفحه فیزی بکوبیم، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست میکروفون نزدیک‌تر و سپس میکروفون دورتر را متاثر می‌سازند. اختلاف فاصله میکروفون‌ها از محل برخورد چکش با صفحه فیزی را اندازه می‌گیریم. با استفاده از زمان‌سنج می‌توانیم تأخیر زمانی بین دریافت صوت توسط دو میکروفون را ثبت کنیم. اکنون با استفاده از رابطه $v = \lambda f$ می‌توانیم تندی صوت را در هوا بیابیم. در صورتی که این اسباب را در مدرسه دارید با استفاده از آن، تندی صوت را در هوا اندازه بگیرید.



۱. 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 فاصله بین میکروفون‌ها در این دو حالت را با یک خط‌کش اندازه بگیرید. اختلاف فاصله 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/دوروز 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^۱ در دریای بارتنز 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 دامنه بزرگ‌تر ثبت شدند. تحلیل گران بعداً دریافتند که نخستین امواج لرزه‌ای احتمالاً ناشی از اژدری بود که نتوانسته بود هنگام شلیک از زیردریایی خارج شود و در نتیجه بدنه 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 ۱/۱۵^۰ به طور متوالی، به ایستگاه لرزه‌نگاری می‌رسیدند. تحلیل گران با استفاده از این بازه 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



این تپ‌های زمینی را که یکی پس از دیگری می‌رسیدند، ثبت می‌کردند. بنابراین زمان $11s$ 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 $1500 m/s$ است، تحلیل گران عمق زیردریایی را حدود $80m$ تخمین زدند که بعداً کشف شد که این عمق حدود $115m$ بوده است که بسیار به این عمق محاسبه شده نزدیک بود.

پاسخ تمرین ۳-۶

با استفاده از رابطه $\Delta x = v \Delta t$ ، 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

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

$$= \frac{15 (340 m/s)}{14} (0.12 s) = 43.71 m \approx 44 m$$

فیزیک ۳

تمرین ۳-۶

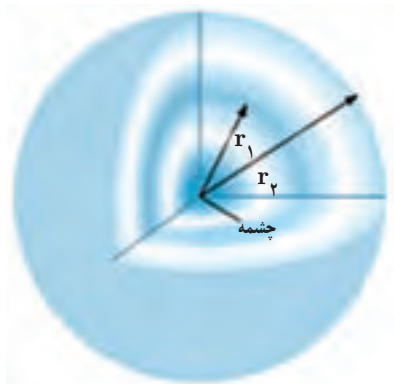
تخمینی با چکش به انتهای میله باریک باندی ضربه‌ای می‌زند. تندی صوت در این میله 15 برابر تندی صوت در هوا است. تشخیص دیگری که گوش خود را نزدیک به انتهای دیگر میله گذاشته است، دو صدا را که یکی از میله می‌آید و دیگری از هوای اطراف میله، با اختلاف زمانی $0.12s$ می‌شنود. اگر تندی صوت در هوا $340 m/s$ باشد، طول میله چقدر است؟

شدت و تراز شدت صوت: انتشار صوت از هر جبهه صوتی همراه با انتقال بی‌دری از وی از ناحیه‌ای از محیط به ناحیه‌ای دیگر از آن است. در واقع جبهه صوت، این انرژی را با به حرکت درآوردن لایه‌ای از محیط که در تماس مستقیم با جبهه است به محیط می‌دهد. انرژی از این لایه به لایه بعدی و از آنجا به لایه‌های بعدی منتقل و در تمام جهات منتشر می‌شود. شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی است که توسط موج به واحد سطح، عمود بر راستای انتشار صوت می‌رسد یا از آن عبور می‌کند (شکل ۳-۴۶).

جدول ۳-۳۰ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت	
صوت	تراز شدت صوت (dB)
فیس کشیدن در فاصله $2m$	10^{-11}
چرخ در فاصله $1m$	10^{-10}
کتابخانه	10^{-9}
خیابان بی‌سروصدا	10^{-8}
رستوران ساکت	10^{-7}
صدا در محلی در فاصله $10m$	10^{-6}
خیابان بی‌سروصدا در نزدیکی	10^{-5}
طایر و قوی	10^{-4}
قطار در عبور از یک قطار	10^{-3}
کارگاه ماشین آلات بی‌سروصدا	10^{-2}
دستگاه پخش صوت در بیشتر صدای خود	10^{-1}
تندیس‌نگار	10^0
موتور جت در فاصله $30m$	10^1

A ۰

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 چشمه صوتی خیلی کوچک است و انرژی را در تمام راستاها به‌طور یکنواخت گسیل می‌کند. به این چشمه‌ها، **چشمه 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 هر قدر شعاع کره بزرگ‌تر باشد انرژی رسیده به واحد سطح کره کوچک‌تر می‌شود. اگر انرژی مکانیکی موج صوتی پایسته بماند (محیط بدون اتلاف باشد) همه انرژی گسیل‌شده 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 چشمه صوت (با توان P_s) باشد و بنابراین شدت I در فاصله r از این چشمه برابر با $P_s/4\pi r^2$ می‌شود.



تئوری ۳-۲

تخمینی با چگشتن به انتهای میله پارک بلندی ضربه‌ای می‌زنند. تندی صوت در این میله ۱۵ متر تندی صوت در هوا است. شخصی دیگری که گوش خود را نزدیک به انتهای میله گذاشته است، دو صدا را که یکی از میله می‌آید و دیگری از هوای اطراف میله، با اختلاف زمانی ۰/۱۲۸ می‌شنود. اگر تندی صوت در هوا ۳۴۰ m/s باشد، طول میله چقدر است؟

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

جدول ۳-۱ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	شدت صوت (W/m ²)	تراز شدت صوت (dB)
فشار کشنده در فاصله ۳m	10^{-1}	۱۰
چرخ در فاصله ۱m	10^{-2}	۲۰
کتابخانه	10^{-3}	۳۰
خیابان پرتردد	10^{-2}	۴۰
رستوران ساکت	10^{-3}	۵۰
صحنه موسیقی در فاصله ۱m	10^{-2}	۶۰
خیابان پرتردد	10^{-2}	۷۰
در ترابری جاده‌ای	10^{-2}	۸۰
کارگاه ماشین‌آلات	10^{-1}	۹۰
پرواز هواپیما	10^{-1}	۱۰۰
دستگاه بخار	10^{-1}	۱۱۰
صوت در بیشترین حد تحمل	10^{-1}	۱۲۰
صوت در بیشترین حد تحمل	10^{-1}	۱۳۰

که در آن β آهنگ متوسط انتقال انرژی و A مساحت سطحی است که صوت با آن برخورد می‌کند. بنابراین بکای شدت صوت، وات بر مترمربع (W/m²) است.

تراز شدت صوت را می‌توان با یک آنالیزاساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری شدت صوت‌های مختلف در می‌بایم نسبت شدت‌های صوت در گستره‌ای از انسان می‌تواند در حدود 10^{-12} باشد (جدول ۳-۲). برای بررسی چنین گستره وسیعی از شدت‌ها راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایه ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به جای شدت I یک موج صوتی، سادتر این است که از **تراز شدت صوت (تراز صوتی)** که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم:

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

که در آن dB مخفف دسی‌بل، بکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۸۲۷-۱۹۱۲ م) انتخاب شده است. همچنین I_0 شدت مرجع (10^{-12} W/m^2) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گستره شنیداری انسان است. یک موج صوتی با شدت $I = I_0$ تراز شدت صوتی برابر ۰ dB دارد. جدول ۳-۲، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

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



این فیلم، یک دسی‌بل سنج را نشان می‌دهد.



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

در اینجا خوب است به مسئله ۲۸ نیز اشاره شود و توجه داده شود که در مورد آسیب شنوایی و تغییر آستانه 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، آستانه شنوایی برای همیشه به ۲۸dB افزایش می‌یابد، در حالی که اگر ۱۰ دقیقه در معرض صدای بلندتری با تراز شدت ۱۲۰dB قرار گیرید، آستانه شنوایی فقط به‌طور موقت به ۲۸dB افزایش می‌یابد.

شکل ۳-۳۰ انتشار صوت از چند منبع

شخصی با چنگ به انتهای میله باریک بلندی ضربه‌ای می‌زند. شدت صوت در این میله ۱۵ برابر شدت صوت در هوا است. شخصی 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 ۰/۸۲s می‌شنود. اگر شدت صوت در هوا ۳۴۰ m/s باشد، طول میله چقدر است؟

شدت و تراز شدت صوت: انتشار صوت از هر چشمه صوتی همراه با انتقال می‌باشد انرژی از ناحیه‌ای از محیط به ناحیه‌ای دیگر از آن است. در واقع چشمه 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 لایه بعدی و از آنجا به لایه‌های بعدی منتقل و در تمام جهات منتشر می‌شود. شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی است که توسط موج به واحد سطح، عبود بر راستای انتشار صوت می‌رسد یا از آن عبور می‌کند (شکل ۳-۳۱).

جدول ۳-۳۱ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	شدت صوت (W/m^2)	تراز شدت (dB)
فصل کشیدن در قلم ۳m	10^{-12}	۰
چرخ در فاصله ۱m	10^{-11}	۲۰
کتابخانه	10^{-10}	۳۰
خیابان پرتردد	10^{-9}	۴۰
رستوران شلوغ	10^{-8}	۵۰
صحنه موسیقی در فاصله ۱m	10^{-7}	۶۰
خیابان پرتردد	10^{-6}	۷۰
در ترابری	10^{-5}	۸۰
ظفر در عود از یک قلم	10^{-4}	۹۰
کارگاه ماشین آلات پرتردد	10^{-3}	۱۰۰
دستگاه جوش صوت در بیشترین صدای خود	10^{-2}	۱۱۰
مکس گشتگی موتور جت در فاصله ۳۰m	10^{-1}	۱۲۰
	10^0	۱۳۰

که در آن \bar{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 آنتاکار ساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری شدت صوت‌های مختلف در می‌پاییم نسبت شدت‌های صوت در گستره شنوایی انسان می‌تواند در حدود 10^{12} باشد (جدول ۳-۳۱). برای بررسی چنین گستره وسیعی از شدت‌ها راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایه ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به جای شدت I یک موج صوتی، سادتر این است که از **تراز شدت صوت (تراز صوتی)** که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم:

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

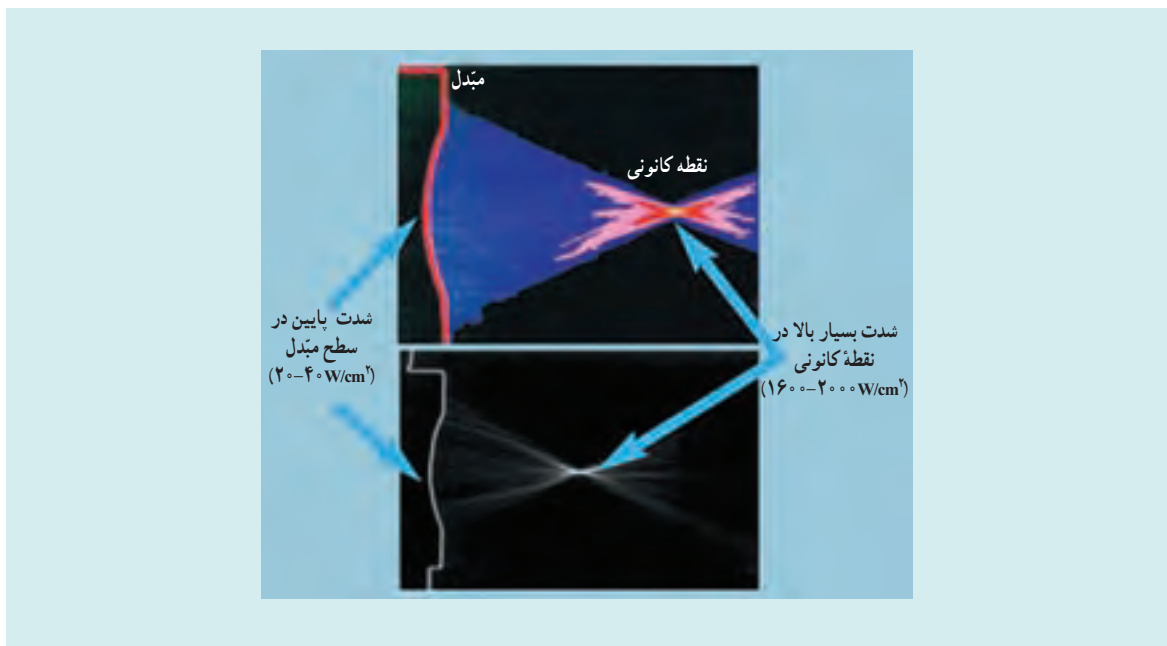
که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل ($1837-1912$) انتخاب شده است. همچنین I_0 شدت مرجع ($10^{-12} W/m^2$) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گستره شنوایی انسان است. یک موج صوتی با شدت $I = I_0$ تراز شدت صوتی برابر ۰dB دارد. جدول ۳-۳۱، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

دانشی

هایفو^۱

این فناوری از امواج فراصوتی همگرا با شدت زیاد برای تولید گرما استفاده می‌کند. این امواج توسط مبدل‌های صوتی پر قدرت 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، به گونه‌ای 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 خوش خیم و بدخیم استفاده کرد. با بافت‌مردگی 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.





پاسخ تمرین ۳-۷

تفاوت ترازهای شدت صوت را محاسبه می کنیم :

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

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

نسبت I_2/I_1 برابر 10^2 داده شده است. بنابراین داریم :

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

$$= 20 \text{ dB}$$

مثال ۳-۲

تراز شدت صوت یک مخلوط کن ۸۰ dB است. شدت این صدا چقدر است؟
پاسخ : با استفاده از رابطه ۳-۲ داریم :

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

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

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

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

تمرین ۳-۷

با یاد کردن صدای تلویزونی، شدت صوتی که به گوش ما می رسد ۱۰۰ برابر می شود. تراز شدت صوتی که می شنویم چند نسبی افزایش یافته است؟

اثر آواک شنوایی : وقتی دیافراگم را با ضربه ای به ارتعاش وامی داریم، دیافراگم نوسان هایی انجام می دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین جنبه هایی که موسیقی یا به اختصار "گفته می شود. با شنیدن هرگز، دو ویژگی را می توان از هم متمایز ساخت : ارتفاع و بلندی آن. ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک شنوایی ما مربوط می شوند. ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می کند؛ مثلاً اگر چند دیافراگم با بسامدهای مختلف به طور یکسان تاخته شوند بسامد آنها را می توان از کمترین تا بیشترین مقدار تشخیص داد. اما بلندی، شدتی است که گوش انسان از صوت درک می کند. اگر یک دیافراگم با بسامد مشخص را با ضربه های متفاوت به ارتعاش وامی داریم، با آنکه بسامد صدایی که می شنویم تغییر نمی کند، اما صداهایی با بلندی متفاوت را حس می کنیم که این به شدت ضربه ها بستگی دارد. بلندی متفاوت با شدت است. شدت را می توان با یک آشکارساز اندازه گرفت، در حالی که بلندی چیزی است که شما حس می کنید. دستگاه شنوایی انسان به بسامدهای متفاوت حساسیت های متفاوتی نشان می دهد، به طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهای در گستره ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن نغمه های صدای ۲۰ Hz تا ۲۰۰۰۰ Hz است.

اثر دوپلر : فرض کنید یک ماشین آتش نشانی در حالی که از زیر آن روشن است در کنار خودروی شما متوقف باشد. شما همان بسامدی را از آژیر می شنوید که راننده ماشین آتش نشانی می شنود. ولی اگر خودروی شما به ماشین آتش نشانی نزدیک و یا از آن دور شود، بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. همچنین اگر خودروی شما ساکن باشد و ماشین آتش نشانی به شما نزدیک و سپس از شما دور شود باز هم بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. اینها مثال هایی از اثر دوپلر است که به اختصار گفتف

β - Loudness β - Pitch β - Time

فصل ۱۸، نویسان و موج

مثال ۳-۲

تراز شدت صوت یک مخلوط کن ۸۰ dB است. شدت این صدا چقدر است؟
پاسخ: با استفاده از رابطه ۱۲-۳ داریم:

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

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

$$\log(I/I_0) = 8/10$$

$$(I/I_0) = 10^{0.8} \Rightarrow I = 10^{0.8} (10^{-12} \text{ W/m}^2) = 10^{-11.2} \text{ W/m}^2$$

تمرین ۳-۲

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 دیافراگم را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی‌داریم، دیافراگم نوسان‌هایی انجام می‌دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین جنبه‌هایی، موسیقی یا به اختصار «ژن» گفته می‌شود. با شنیدن هر ژن، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت: «ارتفاع» و «بلندی». آن ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک شنوایی ما مربوط می‌شوند. ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می‌کند؛ مثلاً اگر چند دیافراگم با بسامدهای مختلف به‌طور یکسان تاخته 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 دیافراگم با بسامد مشخص را با ضربه‌هایی متفاوت به ارتعاش وامی‌داریم، یا 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 آنتن‌راسر از 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 گستره ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz است. در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن ژن‌های صدایی ۲۰ Hz تا ۲۰۰۰۰ Hz است.

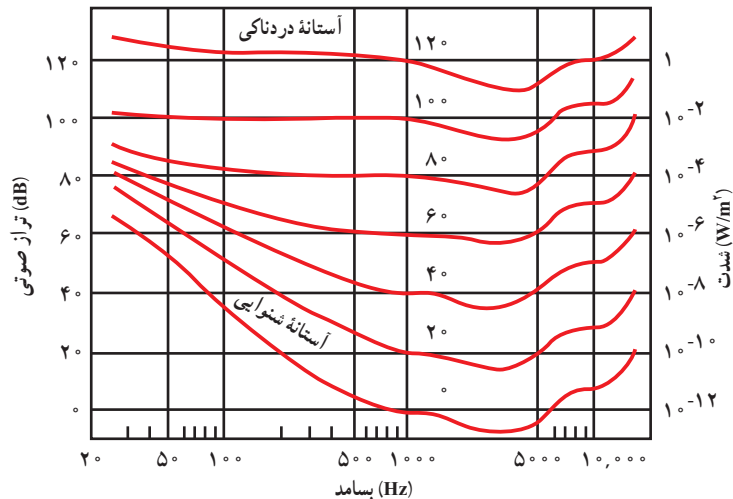
اثر دوپلر: فرض کنید یک ماشین آتش‌نشانی در حالی که آژیر آن روشن است در کنار خودروی شما متوقف باشد. شما همان بسامدی را از آژیر می‌شنوید که راننده ماشین آتش‌نشانی می‌شنود. ولی اگر خودروی شما به ماشین آتش‌نشانی نزدیک و یا از آن دور شود، بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. همچنین اگر خودروی شما ساکن باشد و ماشین آتش‌نشانی به شما نزدیک و سپس از شما دور شود باز هم بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. اینها مثال‌هایی از اثر دوپلر است که به اختصار کانونف

۱. Tone ۲. Pitch ۳. Loudness

A۱

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 گستره 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 1000 Hz مشخص می‌کنند و آن را با فون (Phone) نمایش می‌دهند. مثلاً منحنی 60 Phone به معنی صداهای هم‌بلندی‌ای با صدای 1000 Hz با تراز صوتی 60 dB است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که صداهایی با شدت یکسان را می‌توان در بسامدهای متفاوت با بلندی مختلف شنید. منحنی 0 Phone مربوط به آستانه شنوایی است، یعنی پایین‌ترین تراز 0 Phone صدایی شنیده نمی‌شود. همچنین منحنی 120 Phone مربوط به آستانه دردناکی است، یعنی صداهای بالاتر از 120 Phone موجب به درد آمدن گوش می‌شود. همچنین به رفتار این منحنی‌ها با بسامد توجه کنید. به جز منحنی آستانه دردناکی، بقیه منحنی‌ها، وابستگی زیادی به بسامد دارند. به‌خصوص به منحنی آستانه شنوایی توجه کنید که چه وابستگی زیادی به بسامد دارد.



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

خوب است از جنبه اطلاعات عمومی بدانید که شیمی دان هلندی بویز بالوت (۱۸۹۰-۱۸۱۷م.) نخستین کسی بود که اثر دوپلر را در سال ۱۸۴۵، با استفاده از یک که ماشینی روباز حامل چند ترومپ نواز را می کشید، به طور تجربی آزمود.

در این فیلم توضیحی تحلیلی از اثر دوپلر را مشاهده می کنید.



فیلم

در این فیلم اثر دوپلر را با استفاده از یک دیپازون درمی یابید.



فیلم

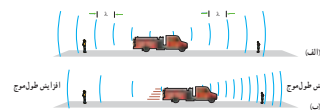
در این فیلم اثر دوپلر را با یک میله سوت زنه چرخان می بینید.



فیلم

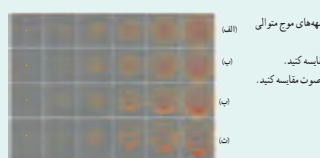
آن برهان کریستین دوپلر (۱۸۰۳-۱۸۵۳ م.) فیزیک دان اتریشی، نام گذاری شده است. اثر دوپلر نه تنها برای امواج صوتی بلکه برای امواج الکترومغناطیسی، مانند میکروموج ها، موج های رادیویی و نور مرئی نیز برقرار است. ما در اینجا نخست امواج صوتی را در نظر می گیریم و به عنوان دو حالت خاص، وضعیت های را بررسی می کنیم که در آنها چشمه صوتی به شنونده ساکن نزدیک و یا از او دور شود، و یا شنونده به چشمه صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود.

الف) چشمه متحرک و ناظر (شنونده) ساکن : شکل ۳-۲۷ الف، جبهه های موج حاصل از صدای آژیر یک ماشین آتش نشانی ساکن را نشان می دهد. همان طور که دیده می شود فاصله این جبهه ها از هم، در جلو و عقب ماشین یکسان است، ولی اگر ماشین آتش نشانی مثلاً به جلو حرکت کند، فاصله جبهه های موج در جلوی ماشین کمتر از پشت آن خواهد بود (شکل ۳-۲۷ ب). بنابراین اگر ناظر ساکنی را روی روی ماشین در نظر بگیریم، این ناظر طول موج کوتاه تری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می گیرد، که این به معنی افزایش بسامد برای این ناظر است. در حالی که ناظر ساکن عقب ماشین طول موج بلندتری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می گیرد، که این به معنی کاهش بسامد برای این ناظر است.



شکل ۳-۲۷ الف) تغییراتی که در طول موج حاصل می شود در صورتی که منبع جبهه های موج در طول حرکت به سمت ناظر یا از او دور شود. ب) تغییراتی که در طول موج حاصل می شود در صورتی که ناظر به سمت منبع یا از او دور شود.

بررسی ۳-۲۷



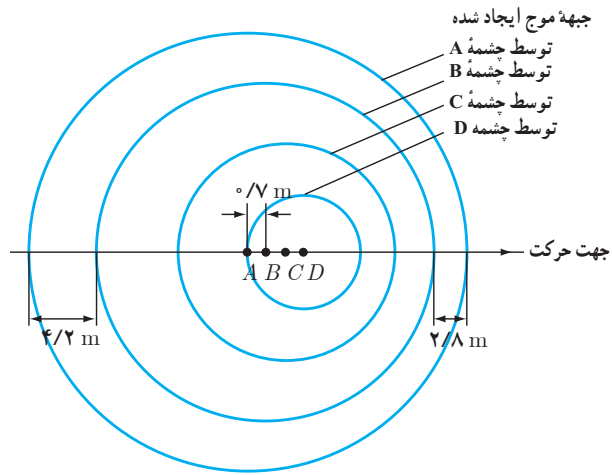
الف) در هر ردیف شکل رویه رو، جبهه های موج متوالی حاصل از یک چشمه را می بینید. ب) تغییراتی که در طول موج حاصل می شود در صورتی که ناظر به سمت منبع یا از او دور شود. ج) تغییراتی که در طول موج حاصل می شود در صورتی که منبع به سمت ناظر یا از او دور شود.

در رابط و محاسبات مربوط به اثر دوپلر خارج از برنامه درسی است و نباید در ارزشیابی لحاظ شود.

۸۲

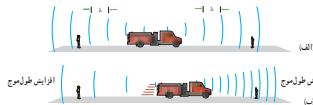
توجه کنید که اثر دوپلر یک تک بسامد را برای بسامدی که ناظر (آشکارساز) اندازه می گیرد به دست می دهد ولی با این حال شما در کمال تعجب درمی یابید که در واقع چنین نیست. مثلاً اگر در کنار خط آهنی ایستاده باشید و قطاری سوت زنان از کنارتان بگذرد متوجه تغییر بسامد آن می شوید. وقتی قطار به طرف شما حرکت می کند افزایش مداومی را در بسامد حس می کنید (یعنی صدا را مدام زیر و زیر تر می شنوید) و وقتی قطار از شما دور می شود کاهش مداومی را در بسامد حس می کنید (یعنی صدا را مدام بم و بم تر می شنوید). به این پدیده توهم/اثر دوپلر می گویند. همان طور که پیش تر گفته بودیم آنچه گوش ما از بسامد حس می کند، ارتفاع صوت است. ارتفاعی که حس می شود علاوه بر بسامد به شدت صوت نیز بستگی دارد. با نزدیک شدن قطار، شدت صدای سوت آن مدام زیاد می شود و شما به غلط فکر می کنید که بسامد زیاد می شود و چون با دور شدن قطار شدت صدای سوت آن مدام کمتر می شود، به غلط فکر می کنید که بسامد آن دائماً کاهش می یابد.

در تفهیم شکل ۲۷-۳ (ب) نمایش نمودارهای واقعی تر مانند شکل زیر که مبتنی بر روابط دقیق ریاضی است، سودمند است. این تصویر به چشمه صوتی با بسامد 10^3 Hz مربوط است که با تندی 70 m/s به سمت شما (ناظر) می آید. همان طور که دیده می شود وقتی چشمه به سمت ناظر می رود، طول موج ها در جهت حرکت کاهش می یابد.



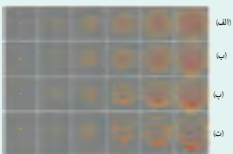
آن یوهان کریستین دوپلر (۱۸۰۲-۱۸۵۳ م.) فیزیکدان اتریشی، ناظرگاری شده است. اثر دوپلر تنها برای امواج صوتی بلکه برای امواج الکترومغناطیسی، مانند میکروموج ها، موج های رادیویی و نور مرئی نیز برقرار است. ما در اینجا نخست امواج صوتی را در نظر می گیریم و به عنوان دو حالت خاص، وضعیت هایی را بررسی می کنیم که در آنها چشمه صوتی به نشونده ساکن نزدیک و یا از او دور شود، و یا نشونده به چشمه صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود.

(الف) چشمه متحرک و ناظر (نشونده) ساکن: شکل ۲۷-۳ (الف)، چشمه های موج حاصل از صدای آژیر یک ماشین آتش نشانی ساکن را نشان می دهد. همان طور که دیده می شود فاصله این چشمه ها از هم، در جلو و عقب ماشین یکسان است، ولی اگر ماشین آتش نشانی مثلاً به جلو حرکت کند، فاصله چشمه های موج در جلوی ماشین کمتر از پشت آن خواهد بود (شکل ۲۷-۳ (ب)). بنابراین اگر ناظر ساکن را روی روی ماشین در نظر بگیریم، این ناظر طول موج کوتاهی را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می گیرد، که این به معنی افزایش بسامد برای این ناظر است. در حالی که ناظر ساکن عقب ماشین طول موج بیشتری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می گیرد، که این به معنی کاهش بسامد برای این ناظر است.



شکل ۲۷-۳ (ب) (الف) وضع ماشین ساکن است منبع چشمه های موج در جلو و عقب ماشین یکسان است. بیا با حرکت رو به جلوی ماشین، منبع چشمه های موج در جلوی ماشین پیشتر و در عقب آن کمتر می رود.

پرسش ۷-۳



حاصل از یک چشمه را می بیند. (الف) تندی چشمه ها را با هم مقایسه کنید. (ب) تندی هر چشمه را با تندی صوت مقایسه کنید.

۱- روابط و محاسبات مربوط به اثر دوپلر خارج از برنامه درسی است و باید در ارزشیابی لحاظ نمود.

۸۲

پاسخ پرسش ۷-۳

در شکل (الف)، یک چشمه صوت ساکن امواج کروی گسیل می کند. توجه کنید که فاصله شعاعی بین جبهه های موج یکسان است. در شکل های (ب) و (پ) چشمه صوت به سمت راست حرکت کرده است. تنها تفاوت شکل های (ب) و (پ) در این است که تندی چشمه صوت در (پ) بیشتر از این تندی در (ب) است و بدین ترتیب ازدحام جبهه های موج در جلوی چشمه گسیلنده شکل (پ) بیشتر از شکل (ب) است. ناظری که در سمت راست چشمه ها قرار گرفته است در واحد زمان جبهه های موج بیشتری را از (پ) نسبت به (ب) دریافت می کند و بنابراین بسامدی که می شنود نیز بالاتر است. با این حال در هر دوی این شکل ها تندی چشمه صوت کمتر از تندی صوت است. اما در شکل (ت) چشمه صوت با تندی ای بزرگ تر از تندی صوت به سمت راست حرکت می کند، زیرا سریع تر از جبهه های موج در حرکت است. در این شکل ها به رنگ های به کار گرفته شده زرد و قرمز توجه کنید. در شکل (ت) که چشمه صوت با تندی بزرگ تر از جبهه های موج ایجاد شده حرکت می کند، منحنی های قرمز از زرد بیرون زده اند و مخروطی ایجاد شده است که به آن مخروط مانع می گویند. در چنین وضعیت هایی دیگر معادله هایی که برای اثر دوپلر ارائه می شوند به کار نمی آیند. در هر حال، پاسخ پرسش ۷-۳ به این ترتیب می شود که تندی چشمه ها به ترتیب از شکل (الف) تا شکل (ت) افزایش می یابند و همچنین در شکل های (الف) تا (پ) تندی چشمه ها کوچک تر از تندی صوت است، ولی در شکل (ت) این تندی بیشتر از تندی صوت می شود.

آن پوهان کریستین دویل (۱۸۰۳-۱۸۵۳ م.) فیزیک‌دان اتریشی، نام‌گذاری شده است. اثر دویل نه تنها برای امواج صوتی بلکه برای امواج الکترومغناطیسی، مانند میکروموج‌ها، موج‌های رادیویی و تور مری 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 چشمه صوتی به نوسان ساده ساکن نزدیک و یا از او دور شود، و با نوسان ساده به چشمه صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود.

الف) چشمه متحرک و ناظر (نوسان ساده) ساکن: شکل ۲۷-۳ الف، جبهه‌های موج حاصل از صدای آریزیک 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، فاصله جبهه‌های موج در جلوی ماشین کمتر از پشت آن خواهد بود (شکل ۲۷-۳ ب). بنابراین اگر ناظر ساکنی را روی‌روی ماشین در نظر بگیریم، این ناظر طول موج 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 طول موج بیشتری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می‌گیرد، که این به معنی کاهش بسامد برای این ناظر است.

شکل ۲۷-۳ الف) و ب) وقتی ماشین ساکن است جمع جبهه‌های موج در جلو و عقب ماشین یکسان است. ب) با حرکت رو به جلوی ماشین، جمع جبهه‌های موج در جلوی ماشین بیشتر و در عقب آن کمتر می‌شود.

پرسش ۲۷-۳

در هر ردیف شکل زیر، 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.

۱- روابط و محاسبات مربوط به اثر دوپلر خارج از برنامه درسی است و باید در آزمایشگاه انجام شود.

خوب است در پایان پرسش ۲۷-۳ دانش‌آموزان علاقه‌مند را به مطالعه دانستنی مربوط به تندی‌های آبرصوتی و موج‌های شوکی ارجاع دهید.

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



شکل ۲۸-۳ الف) و ب) مدت زمان یکسان خودری که به چشمه ساکن صوت نزدیک می‌شود یا جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که خودری که از این چشمه دور می‌شود یا جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

اثر دویل برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای موج‌های الکترومغناطیسی همانند تور با امواج رادیویی نیز اثر دویل برقرار است، ولی بررسی آن با اثر دویل در صوت متفاوت است. هر گاه چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آنتارسان) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابه‌جایی دوپلر) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصدی‌های نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری سمایی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلر نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها بدست آورد. این جابه‌جایی دوپلر صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سمایی نسبت به ناظر (آنتارسان) است. وقتی چشمه نور از ناظر (آنتارسان) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً انتقال به سرخ^۱ می‌گویند و وقتی چشمه نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً انتقال به آبی^۲ می‌گویند (شکل ۲۸-۳).

شکل ۲۸-۳ الف) و ب) اگر کهکشان به ما نزدیک یا از ما دور شود، بسامد و طول موج دریافتی از آن تغییر می‌کند.

دور شدن کهکشان
نزدیک شدن کهکشان

طول موج نور کاهش می‌یابد (انتقال به آبی)
طول موج نور افزایش می‌یابد (انتقال به سرخ)

۱- Red Shift
۲- Blue Shift

خوب است به دانش‌آموزان پیشنهاد شود که با خواندن اثبات ریاضی این مباحث و با مشاهده 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.

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



فرمول بندی اثر دوپلر

الف) چشمه متحرک و ناظر (آشکار ساز) ساکن: دیدیم که در وضعیتی که چشمه به طرف ناظر حرکت کند، ناظر بسامد بیشتری را ادراک می کند. اکنون می خواهیم رابطه ای برای این افزایش بسامد به دست آوریم. توجه کنید اگر ماشین ساکن می بود در آن صورت مسافتی که موج در یک دوره تناوب T طی می کرد برابر vT می شد که در آن v تندی صوت است. ولی در این جا ماشین حرکتی به سمت جلو داشته است و بنابراین در همان بازه زمانی T ، ماشین به اندازه $v_s T$ به جلو حرکت کرده است که در آن v_s تندی چشمه (ماشین) است. بنابراین طول موج در جلوی چشمه تفاضل این دو مسافت می شود:

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

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 می شود.

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

که در آن T دوره تناوب صوت حاصل از چشمه است که طبق رابطه $f_s = \frac{1}{T}$ به بسامد f_s چشمه مربوط می شود. بنابراین

$$f_D = f_s \frac{v}{v - v_s}$$

بدیهی است که برای ناظر ساکنی که چشمه از آن دور می شود به رابطه زیر می رسیم

$$f_D = f_s \frac{v}{v + v_s}$$

این دو رابطه را می توان 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 نزدیک شدن چشمه به ناظر ساکن است.

ب) چشمه ساکن و ناظر (آشکار ساز) 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 حالی که تجمع جبهه های موج در دو سوی چشمه یکسان است. با این حال بسامدی که ناظر اندازه می گیرد نسبت به وضعیتی که هر دو ساکن بودند متفاوت خواهد بود. زیرا اگر ناظر به طرف چشمه حرکت کند با جبهه های موج بیشتری مواجه می شود که این به معنی افزایش بسامد است. تندی صوت نسبت به ناظری که با تندی v_D به چشمه ساکن نزدیک می شود برابر با $v + v_D$ است که v تندی صوت در هوا است. بنابراین، این ناظر صوت را با بسامد ظاهری f_D اندازه می گیرد که از تقسیم تندی صوت نسبت به این ناظر به طول موج صوت به دست می آید

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

که در آن λ طول موج صوت برای چشمه 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 می شود به رابطه زیر می رسیم

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

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 چشمه ساکن و علامت - مربوط به دور شدن ناظر از چشمه ساکن است. معادله کلی اثر دوپلر. 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 رابطه 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 چشمه صوت به سمت ناظر (آشکارساز) است. در استفاده از رابطه بالا باید از قواعد زیر برای علامت‌های پشت v_S و v_D بهر بگیریم:

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

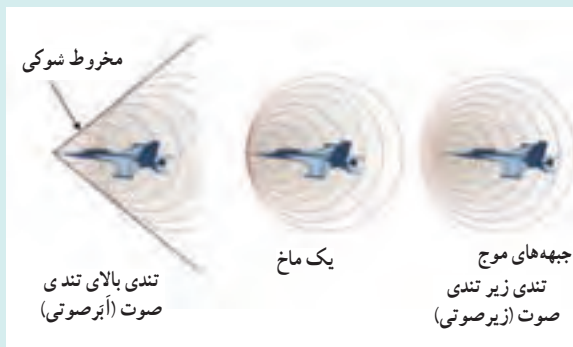
تندی‌های آبرصوتی، موج‌های شوکی

اگر چشمه‌ای با تندی v_S برابر با تندی صوت v به یک آشکارساز ساکن نزدیک شود، معادله‌های اثر دوپلر پیش‌بینی می‌کنند که بسامد آشکار شده 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 آبرصوتی^۱، دیگر معادله‌های اثر دوپلر به کار نمی‌آیند. شکل ۱ ب جبهه‌های موج کروی را نشان می‌دهد که از مکان‌های مختلفی از چشمه نشأت گرفته‌اند. شعاع هر جبهه موج در این شکل vt است، که در آن t زمانی است که از گسیل آن جبهه موج توسط چشمه گذشته است.

توجه کنید که تمام جبهه‌های موج در یک پوش V -شکل در این شکل دوبعدی 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 زاویه θ ی مخروط، موسوم به زاویه مخروط ماخ چنین داده می‌شود

$$\sin \theta = \frac{vt}{v_S t} = \frac{v}{v_S} \text{ (زاوية مخروط مآخ)}$$

نسبت v_s/v را عدد **ماخ** می‌نامند. وقتی گفته می‌شود یک هواپیما با $2/3$ ماخ پرواز می‌کند، به این معناست که تندی آن $2/3$ برابر تندی صوت در هوایی است که هواپیما در آن پرواز می‌کند. موج‌های شوکی‌ای که توسط هواپیماهای اُپرسوتی (شکل‌های ۲ الف و ب) یا موشک‌ها ایجاد می‌شوند، انفجاری از صدا موسوم به غُرَش 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، غُرَش صوتی است که توسط گلوله ایجاد شده است.



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

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.

همچنین وقتی شلاق چرمی بلندی را به سرعت تکان می‌دهید، نوک آن سریع‌تر از صوت حرکت می‌کند و موجب یک غرش صوتی^۱ کوچک می‌شود که همان صدای شکستن شلاق است.

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

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

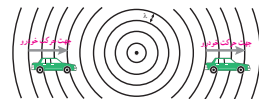
(که در آن $\beta = v/c$ و c تندی نور است) و اگر v در جهت نزدیک شدن باشد علامت‌های پشت β عوض می‌شوند. به همین ترتیب برای طول موج λ داریم:

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

که برای وضعیت نزدیک شدن، علامت‌های β عوض می‌شود.

شکل ۳۱. نوسان و موج

ب) چشمه ساکن و ناظر (متوقف) 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 ۲۸-۳۰).



شکل ۲۸-۳۰. در مدت زمان یکسان دوری که به چشمه ساکن صوت نزدیک می‌شود با جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که دوری 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 چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابجایی 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 جابجایی دوپلری نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها به دست آورد. این جابجایی دوپلری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سماوی نسبت به ناظر (آشکارساز) است. وقتی چشمه نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً انتقال به سرخ^۱ می‌گویند و وقتی چشمه نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً انتقال به آبی^۲ می‌گویند (شکل ۲۹-۳۱).



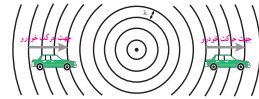
در مورد واژه‌های انتقال به سرخ و انتقال به آبی توجه کنید که منظور از واژه‌های سرخ و آبی این نیست که نور آشکار شده سرخ یا آبی است، بلکه این واژه‌ها صرفاً تمهیدی برای به خاطر سپردن این است که طول موج دریافتی به سمت طول موج‌های بلند یا کوتاه انتقال یافته است.

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



شکل ۳۸. لولمان و هم

بیا چشمه ساکن و ناظر (منشود) 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 ۳۸-۳).



شکل ۳۸-۳. در مدت زمان یکسان خودرویی که به چشمه 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.

اگر دوبار برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای امواج‌های الکترومغناطیسی همانند نور یا امواج رادیویی نیز اثر دوبلر رخداد است، ولی بررسی آن با اثر دوبلر در صوت متفاوت است. هر گاه چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابجایی دوبلری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصدهای نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری بسامدی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابجایی دوبلری نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها به دست آورد. این جابجایی دوبلری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام بسامدی نسبت به ناظر (آشکارساز) است. وقتی چشمه نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً انتقال به سرخ^۱ می‌گویند و وقتی چشمه نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً انتقال به آبی^۲ می‌گویند (شکل ۳۹-۳).



۸۳

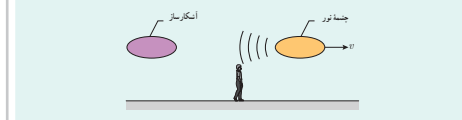
پاسخ پرسش ۳-۸

همان‌طور که در شکل ۲۹-۳ کتاب نشان داده شده است در مورد امواج الکترومغناطیسی با دور شدن چشمه نور، طول موج دریافتی افزایش می‌یابد و اصطلاحاً انتقال به سرخ داریم. بنابراین با افزایش طول موج، بسامد کمتر می‌شود و در نتیجه آشکارساز نوری با بسامد کمتر را دریافت می‌کند و $f < f_0$ می‌شود.

شکل ۳۹

پرسش ۸-۳

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



همچنین همان‌طور که در فصل بعد خواهید دید، می‌توان با ارسال یک موج رادیویی به سوی خودرویی در حال حرکت و دریافت بازتاب این موج و در نظر گرفتن اثر دوبلر، تندی خودرو را به دست آورد؛ روشی که پلیس در کنترل تندی خودروها در جاده‌ها به کار می‌برد (شکل ۳۹-۳).



شکل ۳۹-۳. تعیین تندی خودروها به کمک اثر دوبلر

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 فاصله 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 فاصله $3/75 \text{ km}$ از یک استادیوم فوتبال قرار دارد. شخصی یک بازی فوتبال را از تلویزیون می‌بیند. او صدای هلهله تماشاگران را $11/2 \text{ s}$ پس از اینکه از تلویزیون شنید از بیرون می‌شنود. آیا او می‌تواند حدس بزند دمای محل استادیوم بیش یا کمتر از 20°C است؟ (راهنمایی : تندی صوت در دمای 20°C حدوداً برابر 343 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

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{3/75 \times 10^3 \text{ m}}{11/2 \text{ s}} = 334/8 \text{ m/s} \approx 335 \text{ m/s}$$

این عدد از 343 m/s کمتر است. بنابراین دمای استادیوم کمتر از 20°C است. محاسبه نشان می‌دهد مقدار آن برابر $6/4^\circ \text{C}$ 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؟

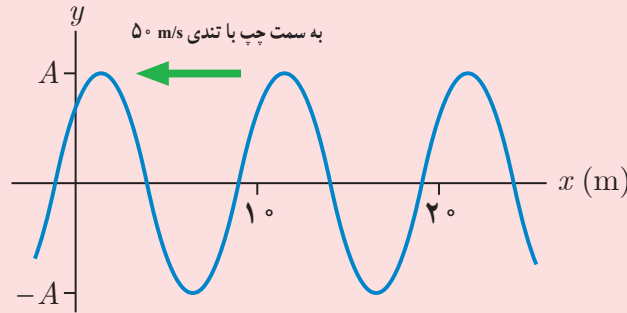
پاسخ : تخته کوتاه‌تر با سرعت بیشتری ارتعاش می‌کند و صوت‌هایی با ارتفاع زیاد ایجاد می‌کند و بنابراین صدایی زیرتر تولید می‌کند. درحالی که تخته بلندتر به آرامی ارتعاش می‌کند و صدایی که ایجاد بسامد کمتری داد و صدا بم‌تر به گوش می‌رسد. برای همین است که بال حشرات کوچک صدایی زیرتر از بال حشرات بزرگ ایجاد می‌کند.

۴ چرا وقتی شمعی را مقابل بلندگویی قرار می‌دهیم، شعله 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 شعله شمع می‌شود.

تمرین‌های پیشنهادی

۱) بسامد موج پیشرونده شکل زیر چقدر است؟



پاسخ: از روی شکل و با استفاده از رابطه ۳-۹ داریم:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{50 \text{ m/s}}{1.0 \text{ m}} = 50 \text{ s}^{-1} = 50 \text{ Hz}$$

۲) یک سر یک طناب نایلونی به تکیه‌گاهی در بالای یک چاه قائم به ارتفاع 8.0 m بسته شده است. طناب توسط جعبه‌ای سنگین به جرم 2.0 kg در انتهای چاه، محکم کشیده شده است. جرم طناب 2.0 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 2.0 Hz به طور هماهنگ با بسامد 2.0 Hz به نوسان درآید، طول 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 رابطه $v = \sqrt{F/\mu}$ استفاده می‌کنیم که در آن

$$F = mg = (2.0 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 19.6 \text{ N}$$

و

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{2.0 \text{ kg}}{8.0 \text{ m}} = 0.25 \text{ kg/m}$$

در نتیجه

$$v = \sqrt{\frac{19.6 \text{ N}}{0.25 \text{ kg/m}}} = 8.8 \text{ m/s}$$

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

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{8.8 \text{ m/s}}{2.0 \text{ s}^{-1}} = 4.4 \text{ m}$$

۳ گستره طول موج‌های رادیویی (الف) باند AM در گستره بسامدی 540° تا 1600° کیلوهرتز، و (ب) باند FM در گستره بسامدی 88° تا 108° مگاهرتز را به دست آورید.

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

$$\lambda_{\text{بالا}} = \frac{c}{f_1} = \frac{3/00 \times 10^8 \text{ m/s}}{540 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 5/55 \times 10^2 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{پایین}} = \frac{c}{f_2} = \frac{3/00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1600 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 1/87 \times 10^2 \text{ m}$$

$$\text{پس: } 1/87 \times 10^2 \text{ m} < \lambda_{\text{AM}} < 5/55 \times 10^2 \text{ m}$$

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

$$\lambda_{\text{بالا}} = \frac{c}{f_1} = \frac{3/00 \times 10^8 \text{ m/s}}{88/0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 3/41 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{پایین}} = \frac{c}{f_2} = \frac{3/00 \times 10^8 \text{ m/s}}{108 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 2/78 \text{ m}$$

$$\text{پس: } 2/78 \text{ m} < \lambda_{\text{FM}} < 3/41 \text{ m}$$

۴ یک موج طولی در یک فنر بلند با دوره $25^\circ/\text{s}$ و طول موج $30^\circ/\text{cm}$ در حرکت است. تندی این موج چقدر است؟
پاسخ: از رابطه $v = f\lambda$ استفاده می‌کنیم که در آن $f = 1/T$ است:

$$f = \frac{\lambda}{T} = \frac{30^\circ/\text{cm}}{0/25 \text{ s}} = 120 \text{ cm/s}$$

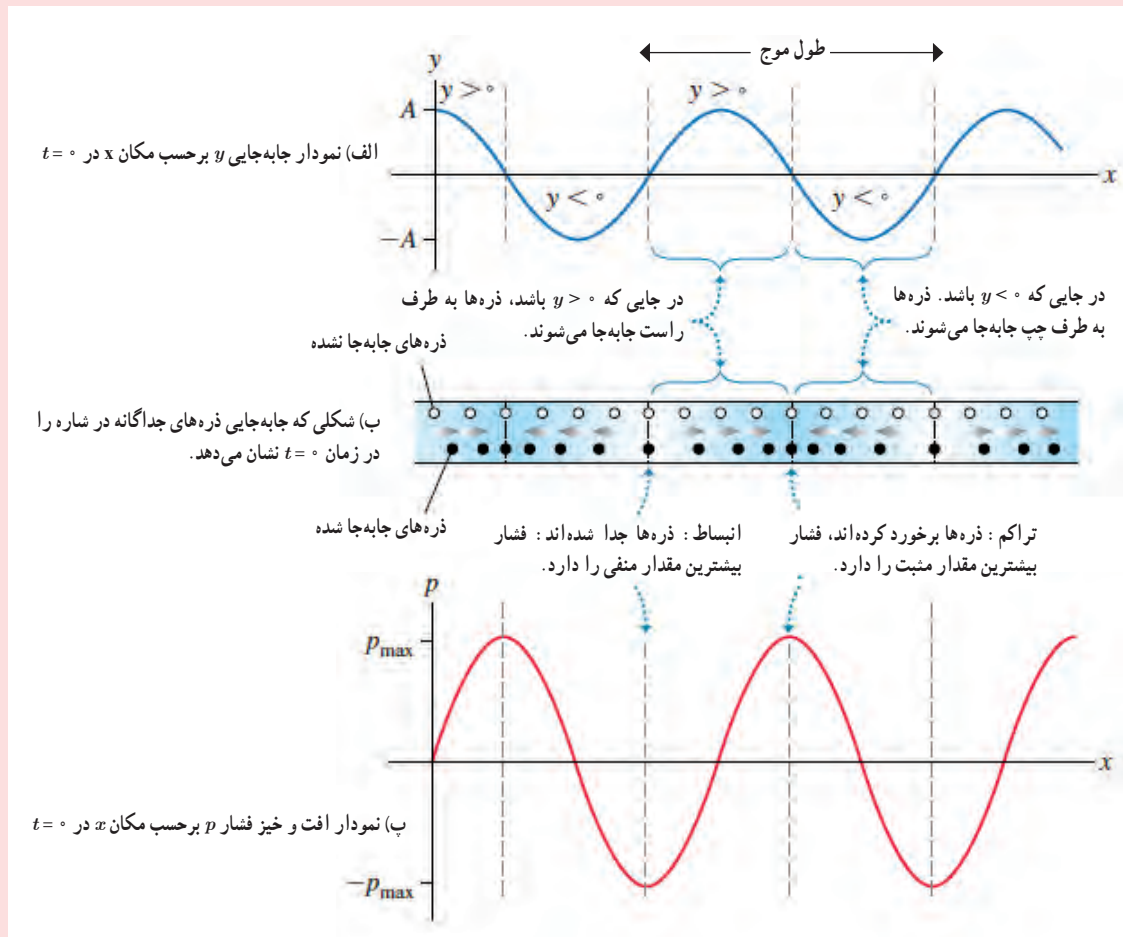
۵ یک موج صوتی را در نظر بگیرید که در لوله‌ای در حال انتشار است. جهت انتشار را محور x ها فرض کنید. در یک لحظه مشخص نمودارهای زیر را رسم کنید.

الف) نمودار جابه‌جایی y بر حسب مکان x در $t = 0^\circ \text{ s}$

ب) شکلی که جابه‌جایی ذره‌های جداگانه در شاره را در زمان $t = 0^\circ \text{ s}$ نشان می‌دهد.

پ) نمودار افت و خیز فشار p بر حسب مکان x در $t = 0^\circ \text{ s}$

پاسخ:



۶ یک چشمه نقطه‌ای $1/0 \text{ W}$ ، امواج صوتی را به‌طور یکنواخت در تمام جهات فضا گسیل می‌کند، با فرض آنکه انرژی موج‌ها پایسته بماند، شدت صوت را در فاصله الف) $1/0 \text{ m}$ از چشمه ب) $1/5 \text{ m}$ از چشمه به‌دست آورید.

پاسخ: الف) چشمه 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 همه انرژی گسیل شده توسط چشمه از سطوح کروی می‌گذرد. در این صورت برای شدت I در فاصله r از این چشمه داریم:

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2} = \frac{1/0 \text{ W}}{4\pi (1/0 \text{ m})^2} = 7/96 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2 \approx 8/0 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

$$I_r = I_1 \left(\frac{r_1}{r_r} \right)^2 = (7/96 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2) \left(\frac{1/0 \text{ m}}{1/5 \text{ m}} \right)^2$$

$$= 1/27 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2 \approx 1/3 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

(ب)

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

پاسخ: از رابطه ۳-۱۲ استفاده می کنیم:

$$\beta = 90 \text{ dB} = (10 \text{ dB}) \log \frac{I}{I_0}$$

در نتیجه:

$$\log \frac{I}{I_0} = 9/0 \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 1/0 \times 10^9$$

بدیهی است وقتی دو پتک باهم صدا می کنند خواهیم داشت:

$$\frac{I'}{I_0} = 2/0 \times 10^9$$

بنابراین داریم:

$$\beta' = (10 \text{ dB}) \log \frac{I'}{I_0} = (10 \text{ dB}) \log (2/0 \times 10^9) = 93/0 \text{ dB}$$

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

۸ ستونی از سربازان با صدای طبل طبال، با ۱۲۰ گام در هر دقیقه رژه می روند. وقتی طبال با پای راست پیش می رود، سربازان عقب ستون با پای چپ خود به جلو گام برمی دارند. طول تقریبی ستون سربازان چقدر است؟

پاسخ: از رابطه $x = vt$ استفاده می کنیم:

$$x = vt = (343 \text{ m/s}) \left(\frac{1}{120} \text{ min} \right) \left(60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \right) \approx 171 \text{ m}$$

۹ یک چشمه نقطه ای آرمانی را در نظر بگیرید که با توان ثابت، صدا تولید می کند. وقتی شما به نقطه ای به فاصله دوبرابر از آن حرکت کنید، تراز شدت صوت چقدر تغییر می کند؟

پاسخ:

$$\beta_r - \beta_l = (10 \text{ dB}) \left(\log \frac{I_r}{I_0} - \log \frac{I_l}{I_0} \right) = (10 \text{ dB}) \log \frac{I_r}{I_l}$$

از طرفی $I_r / I_l = r_l^2 / r_r^2$ است و در نتیجه:

$$\beta_r - \beta_l = (10 \text{ dB}) \log \frac{r_l^2}{r_r^2} = (10 \text{ dB}) \log \frac{1}{4} = -6 \text{ dB}$$

۱۰ موج های صوتی پس از رسیدن به پرده گوش، از گوش میانی عبور می کند. قطر سوراخ گوش میانی در افراد بزرگسال ۷ mm و طول آن ۲/۵ cm است. هنگام شنیدن صحبت های عادی، شدت موج های صوتی در گوش میانی $3/2 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ است. توان متوسط دریافتی توسط گوش میانی چقدر است؟

پاسخ:

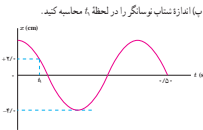
$$P = IA = I(\pi r^2) = (3/2 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2)(\pi)(3/5 \times 10^{-3} \text{ m})^2$$

این نوسان ناچیز را پرده گوش جذب می کند و نوسان حاصل از آن در گوش میانی و داخلی به تپ الکتریکی تبدیل و به مغز ارسال می شود.

راهنمای پاسخ‌یابی پرشی‌ها و مسئله‌های فصل ۳

پرشی‌ها و مسئله‌های فصل ۳

۳-۱ و ۳-۲ نوسان دوار و حرکت هابک ساده
 ۱. یک وزنه 2 N را از انتهای یک فنر قائم می‌آوریم، فنر 2 cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنه 5 N متصل است روی میز بدون اصطکاک به نوسان درمی‌آوریم. دوره تناوب این نوسان چقدر است؟
 ۲. گاه جسی به جرم m به فنری متصل شود و به نوسان درآید. با دوره تناوب $2/3\text{ s}$ نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم $2/3\text{ kg}$ افزایش یابد، دوره تناوب $2/3\text{ s}$ می‌شود، مقدار m چقدر است؟
 ۳. جرم خودروی همار با سرشتیان آن 1400 kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $2.1 \times 10^5\text{ N/m}$ سوار شده است. دوره تناوب، بسامد و دامنه زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جاده‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکواخت روی چهار جعبه توزیع شده است.
 ۴. دامنه نوسان یک حرکت هابک ساده $3 \times 10^{-3}\text{ m}$ و بسامد آن 50 Hz هرتز است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را در یک دوره رسم کنید.
 ۵. نمودار مکان-زمان نوسانگری مطابق شکل زیر است؛ (الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید. (ب) مقدار A را بدست آورید. (ج) به نظر شما آیا افزایش دامنه یک ساعت آرگن‌دار جلو می‌افتد یا عقباً؟



۳-۳ انرژی در حرکت هابک ساده

۱. دامنه نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت فنر 27 N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با 4 cm است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان $1.8 \times 10^{-3}\text{ J}$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای افقی چشم‌پوشی شود.)

۳-۴ تشدید
 ۱. هر فرد معمولاً با عرض اندک بدنتش به چپ و راست، راه می‌رود و بدین ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود 2 Hz دارند. زلزله شدید پیل هوایی ملبورن در آغاز هزاره جدید را به عبور منظر گروهی از افراد از این پل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب چنین لرزنی شده باشد؟



۱. Millennium Bridge
 ۸۵

۱ از رابطه $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ 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

$$k = \frac{|F|}{x} = \frac{2\text{ N}}{0.2\text{ m}} = 10\text{ N/m}$$

در نتیجه :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{W/g}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{(5/9\text{ N}) / (9.8\text{ N/kg})}{10\text{ N/m}}} = 0.44\text{ s}$$

۲ از رابطه $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ استفاده می‌کنیم. بنابراین داریم :

$$\frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = \sqrt{\frac{(m + 2/3)}{m}} = \frac{3}{2}$$

از آنجا $m = 1/6\text{ kg}$ به دست می‌آید.

۳ چون وزن (و در نتیجه جرم) به‌طور یکواخت توزیع شده است، روی هر فنر $\frac{1}{4}$ جرم کل قرار می‌گیرد. بنابراین $m = M/4 = 400\text{ kg}$ ، و در نتیجه :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{400\text{ kg}}{2/3 \times 10^4\text{ N/m}}} = 0.888\text{ s}$$

و از آنجا

$$f = \frac{1}{T} = 1/0.888\text{ s}^{-1} \approx 1.12\text{ Hz}$$

و

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(1.12\text{ s}^{-1}) = 7.07\text{ rad/s}$$

۴ معادله حرکت نوسانگر با رابطه $x = A\cos\omega t$ داده می‌شود. که در اینجا

$$A = 3/0 \times 10^{-2}\text{ m}, \quad \omega = 2\pi f = 2\pi(5/0\text{ s}^{-1}) = 10\pi\text{ rad/s}$$

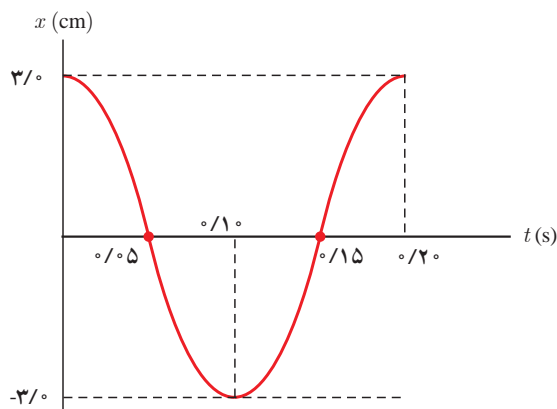
در نتیجه

$$x = (3/0 \times 10^{-2}\text{ m}) \cos(10\pi t)$$

برای رسم نمودار مکان-زمان خوب است دوره تناوب را محاسبه کنیم :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{5/0\text{ s}^{-1}} = 0.2\text{ s}$$

بنابراین شکلی شبیه زیر خواهیم داشت



۵ الف) معادله حرکت نوسانگر با رابطه $x = A \cos \omega t$ داده می شود. اگر در شکل دقت کنیم داریم :

$$\frac{\Delta T}{4} = 0.05 \text{ s} \Rightarrow T = 0.2 \text{ s}$$

در نتیجه

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.2 \text{ s}} = 10\pi \text{ rad/s}$$

بنابراین معادله حرکت نوسانگر چنین می شود

ب) در زمان t_1 ، $x = A/2$ است و در نتیجه

در نتیجه

$$x = A \cos 5\pi t$$

$$\frac{A}{2} = A \cos 5\pi t_1$$

$$\cos 5\pi t_1 = \frac{1}{2}$$

چون t_1 نخستین زمانی است که $x = A/2$ است، در رابطه بالا $5\pi t_1$ را برابر $\pi/3$ می گذاریم. در نتیجه $t_1 = \frac{1}{15} \text{ s}$ می شود.

پ) با فرض آنکه نوسانگر این مسئله، دستگاه جرم – فنر باشد، از قانون هوک به صورت $|F| = k|x|$ استفاده می کنیم. 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 می دانیم برابر با 2 cm است. اگر x را در لحظه t_1 نداشته باشیم، باید از محاسبه ای نظیر محاسبه زیر آن را به دست می آوریم :

$$x(t_1) = A \cos 5\pi t_1$$

$$= (0.04 \text{ m}) \cos \left(5\pi \frac{1}{15} \right) = (0.04 \text{ m}) \cos \frac{\pi}{3}$$

$$= 0.02 \text{ m} = 2 \text{ cm}$$

در نتیجه

$$|a| = (5\pi)^2 (0.02 \text{ m}) = 493 \text{ m/s}^2 \approx 49 \text{ m/s}^2$$

۶ الف) انرژی کل نوسانگر برابر است با

$$E = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} (74 \text{ N/m}) (0.08 \text{ m})^2 = 0.2368 \text{ J} \approx 0.24 \text{ J}$$

پرسش ها و مسئله های فصل ۳

۱. جسی به جرم $1/2 \text{ kg}$ به فتر افقی با ثابت $9/2 \text{ N/cm}$ متصل

است. فتر به اندازه $4/2 \text{ cm}$ فشرده و سپس رها می شود و جسم روی سطح افقی شروع به نوسان می کند. با چسبندگی اصطکاک

الف) دامنه نوسان و تندی بیشینه جسم چقدر است؟

ب) با فتر تندی جسم $1/4 \text{ m/s}$ است. انرژی پتانسیل کشش آن چقدر است؟

ج) معادله حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به صورت $x = (0.05 \text{ m}) \cos 2\pi t$ است.

الف) در چه زمانی، پس از لحظه صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به بیشترین مقدار خود می رسد؟

ب) در چه زمانی، پس از لحظه صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به صفر می رسد؟

ج) با تندی نوسانگر چقدر باید تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

د) الف) ساعتی از یکبار (یا از یک بار) در همان نقطه تنظیم شده است. اگر این ساعت به نقطه ای در استوار شود، عقب می افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلو افتادن در یک شباه روز چقدر است؟

ب) با تندی نوسانگر $1/4 \text{ m/s}$ و $1/2 \text{ m/s}$ در $1/4 \text{ s}$ و $1/2 \text{ s}$ (در $1/4 \text{ s}$ و $1/2 \text{ s}$)

ب) با مقدار $1/4$ را بدست آورید.

ب) با مقدار $1/4$ را بدست آورید.

۳-۳ تشدید

۱. هر فرد معمولاً با چرخش آهک هتس به چپ و راست، راه

میرود و بدن ترتیب تیرهای کوچک به زمین نرم تابش وارد می کند. این تیرها بسطی در حدود 0.02 Hz دارند. انرژی تشدید

بله های ملایم در آغاز هزاره جدید را به عبور مظهر گروهی از افراد از این بله ربط داده اند. چگونه ممکن است نوسان های بدن این افراد موجب چرخش تشدید شده باشد؟



Millenium bridge
AS



۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

۲. دامنه نوسان وزنه ای که به فتر با ثابت 27 N/m متصل

است و در راستای افقی نوسان می کند، برابر با $4/2 \text{ cm}$ است.

اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه ای از مسیر نوسان

$(1/2 \times 10^{-3} \text{ J})$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای افقی چشمپوشی نمود.)

ب) $E = K + U$ است و بنابراین

$$K = E - U = 0.2368 \text{ J} - 0.08 \text{ J} = 0.1568 \text{ J}$$

الف) بدیهی است دامنه نوسان $A = 9 \text{ cm}$ است و برای انرژی جنبشی

بیشینه داریم:

$$K_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \frac{1}{2} k A^2$$

بنابراین تندی بیشینه v_{\max} چنین می‌شود

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{k}{m}} A = \sqrt{\frac{6 \times 10^3 \text{ N/m}}{1 \times 10^{-3} \text{ kg}}} (0.09 \text{ m}) = 2.2 \text{ m/s}$$

ب) از $E = K + U$ استفاده می‌کنیم. $E = \frac{1}{2} k A^2$ قرار می‌دهیم و از آنجا درمی‌یابیم:

$$\begin{aligned} U &= E - K = \frac{1}{2} k A^2 - \frac{1}{2} m v^2 \\ &= \frac{1}{2} (6 \times 10^3 \text{ N/m}) (0.09 \text{ m})^2 - \frac{1}{2} (1 \times 10^{-3} \text{ kg}) (1.6 \text{ m/s})^2 \\ &= 24.3 \text{ J} - 0.8 \text{ J} = 23.5 \text{ J} \end{aligned}$$

الف) وقتی $x = 0$ است، یعنی در زمانی که نوسانگر از نقطه تعادل می‌گذرد، تندی آن بیشینه است.

چون نخستین بار را خواسته است، $n = 0$ می‌گذاریم:

و از آنجا $t = \frac{1}{4} \text{ s}$ به دست می‌آید. (این نتیجه را می‌توانستیم به طور ساده‌ای با رسم یک نمودار کسینوسی نیز به دست آوریم، به طوری که در لحظه $t = T/4$ در می‌یابیم برای نخستین بار $x = 0$ می‌شود.)

ب) تندی نوسانگر وقتی صفر است که $x = -A$ باشد که این متناظر با زمان $t = \frac{2}{\omega} \text{ s}$ است. این را می‌شود به طور ریاضی نیز نشان داد:

$$A \cos \omega t = -A \Rightarrow \cos \omega t = -1 \Rightarrow \omega t = n\pi$$

بنابراین برای نخستین بار $\omega t = \pi$ و از آنجا $t = \frac{2}{\omega} \text{ s}$ می‌شود.

پ) در $K = U = 2U = 2K$ باید $U = K$ قرار دهیم. در نتیجه $E = 2U = 2K$ می‌شود. از طرفی $E = K_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2$ است.

بنابراین

$$\begin{aligned} K &= \frac{E}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} m v_{\max}^2 \right) \\ \frac{1}{2} m v^2 &= \frac{1}{4} m v_{\max}^2 \Rightarrow |v| = \frac{1}{\sqrt{2}} v_{\max} \\ |v| &= \frac{1}{\sqrt{2}} A \omega = \frac{1}{\sqrt{2}} (0.05 \text{ m}) (20\pi) \\ &= 2.2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

۳-۱ و ۳-۲ نوسان دوزی و حرکت هماهنگ ساده
۱. یک وزنه 2 N را از انتهای یک فن قلم می‌آوریم، فن 20 cm کشیده می‌شود. سپس این فن را در حالی که به یک وزنه 50 N متصل است روی میز بدون اصطکاک به نوسان درمی‌آوریم. دوره تناوب این نوسان چقدر است؟
۲. هرگاه جسی به جرم 60 kg به فنری متصل شود و به نوسان درآید، با دوره تناوب $2/3 \text{ s}$ نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم 24 kg افزایش یابد، دوره تناوب $2/3 \text{ s}$ می‌شود. مقدار m چقدر است؟
۳. جرم خودروی همراه با سرشتیان آن 1600 kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $2 \times 10^5 \text{ N/m}$ قرار داده است. دوره تناوب، سیاه‌ر و سیاه‌زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جاده‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکگانه روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.
۴. دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $3 \times 10^{-2} \text{ m}$ و سیاه‌ر آن 50 Hz هرتز است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را در یک دوره رسم کنید.
۵. نمودار مکان-زمان نوسانگری مطابق شکل زیر است. (الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید. (ب) مقدار A را بدست آورید. (ج) به نظر شما آیا با افزایش m ، با سرعت آرگندار جرم می‌تواند باقی‌ماند؟
۳-۳ تشدید
۱. هر فرد معمولاً با چرخش کمک پدال به چپ و راست، راه می‌برد و به این ترتیب نوسانگر کوچکی به زمین نزدیک می‌کند. این نوسانگر با فرکانس حدود 2 Hz دارد. لرزش تشدید بی‌هوای ماشین در آغاز هزاره جدید را به‌طور متفکرانه از افراد از آن بی‌ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بین این افراد موجب چنین لرزشی شده باشد؟



۱۸۵ Millimeter bridge

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

- ۳-۱ و ۳-۲ نوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده
۱. یک وزنه ۰.۲ N را از انتهای یک فن قلم می‌زنیم. فن ۲ cm کشیده می‌شود. سپس این فن را در حالی که به یک وزنه ۵۰ N متصل است روی میز بدون اصطکاک به نوسان درمی‌آوریم. دوره تناوب این نوسان چقدر است؟
۲. هرگاه جرمی به جرم ۱۱۱ به فنری متصل شود و به نوسان درآید، با دوره تناوب ۲۰ s نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم ۲۰ kg افزایش یابد، دوره تناوب ۲۰ s می‌شود. مقدار ۱۱۱ چقدر است؟
۳. جرم خودروی همر با سرشتیان آن ۱۶۰۰ kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت ۰.۸ × ۱۰^۵ N/m خوابانده شده است. دوره تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جاده‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکواخت روی چهار فنر چهارچرخ توزیع شده است.
۴. دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده ۱۰ m × ۳/۰ است و بسامد آن ۵۰ Hz است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را در یک دوره رسم کنید.
۵. نمودار مکان-زمان نوسانگری طبق شکل زیر است: (الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید. (ب) مقدار Δt را بدست آورید. (ج) به اندازه شتاب نوسانگر را در لحظه t_1 محاسبه کنید.



- ۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده
۱. دامنه نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت ۲۷۲ N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با ۸ cm است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، $1/8 \times 10^{-1}$ J باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای افقی چشم‌پوشی نمود.)
۲. هر فرد معمولاً با چرخش آشک هشت به چپ و راست، راه می‌رود و بین ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زو زبانی وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود ۵ Hz دارند. انرژی شدید بی‌هرای میلیبرم در آغاز هزاره جدید را به عبور مغز گروهی از افراد از این بی‌خطر داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های متن این افراد موجب چرخش گردن شده باشد؟
۳. معادله شکل چند آرنک را از سیمی آرنک‌ها می‌توانیم به‌دست آوریم. نوسان درآوردن آرنک X، آرنک‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟
۴. در نمودار چاه جابی - مکان موج عرضی شکل زیر نشان داده شده است. طول موج، دامنه، تندی و دوره تناوب موج چقدر است؟
۵. شکل زیر یک موج عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که به تندی ۲ s^{-۱} به سمت راست حرکت می‌کند. درحالی‌که تندی نشان داده شده ریسمان ۸ s^{-۱} است. آیا این دو تندی با هم برابرند؟ توضیح دهید.
۶. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه‌ای از زمان نشان می‌دهد که در جهت محور x به 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 $\lambda/4$ می‌روند یا پایین؟
۷. سیمی با چگالی ۷/۸ g/cm^۳ و سطح مقطع ۰/۵ cm^۲ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶ N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.



۸۵

۹ الف) زمانی که ساعت نشان می‌دهد متناسب با عکس دوره نوسان آونگ است. با استفاده از رابطه $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ درمی‌یابیم که چون $g_{\text{نهران}} < g_{\text{استوا}}$ است، بنابراین ساعت در استوا عقب می‌افتد. میزان این عقب‌افتادگی را می‌توانیم محاسبه کنیم. چون $t_1/t_2 = T_1/T_2$ است، داریم

$$t_2 - t_1 = (\sqrt{g_2/g_1} - 1)t_1$$

که اگر $t_1 = ۸۶۴۰۰$ s قرار دهیم به $\Delta t = ۸۸/۲$ s می‌رسیم.

ب) با افزایش دما، طول آونگ زیاد می‌شود و بنا به رابطه $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ درمی‌یابیم که دوره 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 پدیده 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.

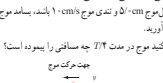
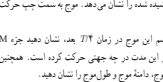
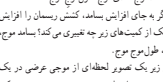
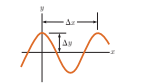
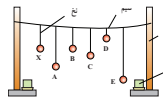
۱۱ با به نوسان درآمدن آونگ X، آونگ B با دامنه بزرگی به نوسان درمی‌آید. البته سایر آونگ‌ها نیز ممکن است به نوسان درآیند اما دامنه نوسان آنها کوچک است. در حالی که آونگ B که دوره نوسان (و در نتیجه بسامد) آن با آونگ X یکسان است، با دامنه بزرگی به نوسان ادامه می‌دهد. به عبارتی، به آونگ‌های دیگر هم انرژی منتقل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

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

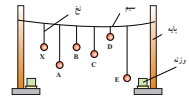
ب) چون $v = \sqrt{F/\mu}$ است، با افزایش کشش ریسمان تندی موج زیاد می‌شود. ولی چون بسامد نوسان ساز تغییر نکرده است، بسامد موج نیز تغییری نمی‌کند و طبق رابطه $\lambda = v/f$ طول موج زیاد می‌شود.

۱۳ الف) وقتی موج به سمت چپ می‌رود، پس از گذشت زمان $T/4$ دره نشان داده شده در شکل به اندازه $\lambda/4$ 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.

۸۶

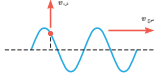


۱۱. معادله شکل چند آونگ را از سیم آویخته ایم. توضیح دهید با چه نوسان درآوردن آونگ X، آونگ های دیگر چگونه نوسان می کنند؟

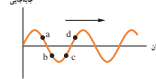


شکل ۳-۲ و ۳-۳ انواع آونگ و مشخصه های موج

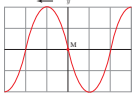
۱۲. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می دهد که با تندی v به سمت راست حرکت می کند. در حالی که تندی ذره نشان داده شده ریسمان v است. آیا این دو تندی با هم برابرند؟ توضیح دهید.



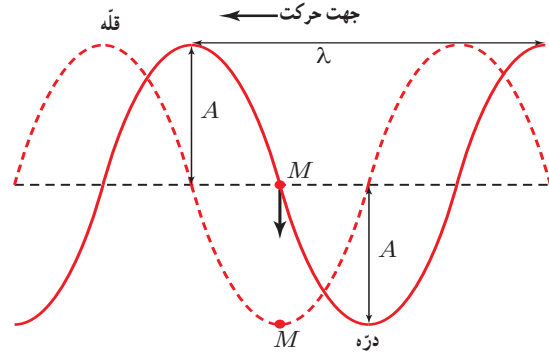
۱۳. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه ای از زمان نشان می دهد که در جهت معکوس x در طول ریسمان کشیده شده ای حرکت می کند. چهار جزء از این ریسمان روی شکل نشان داده شده اند. در این لحظه هر یک از این چهار جزء، بالا می روند یا پایین؟



۱۴. سیمی با چگالی $7.8 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ و سطح مقطع 10^{-5} m^2 بین دو نقطه با نیروی 156 N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.



۸۶



(ب) بسامد موج برابر است با

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{1^\circ \text{ cm/s}}{5^\circ \text{ cm}} = 2^\circ \text{ s}^{-1} = 2^\circ \text{ Hz}$$

(پ) از رابطه $x = vt$ استفاده می کنیم:

$$x = vt = v \left(\frac{T}{4} \right) = v \left(\frac{1}{4f} \right) = (1^\circ \text{ cm/s}) \left(\frac{1}{\lambda / \text{s}^{-1}} \right) = 1/25 \text{ cm} \approx 1/2 \text{ cm}$$

که این همان معادل $1/25 \text{ cm} = (5^\circ \text{ cm})/4 = \lambda/4$ است.

۱۲. از روی شکل درمی یابیم طول موج $\lambda = \Delta x = 4^\circ \text{ cm}$ و دامنه $A = \Delta y = 15^\circ \text{ cm}$ است. با استفاده از رابطه $v = \lambda f$ می توانیم تندی انتشار موج را به دست آوریم:

$$v = \lambda f = (4^\circ \text{ cm}) (8^\circ \text{ s}^{-1}) = 32^\circ \text{ cm/s} = 3/2^\circ \text{ m/s}$$

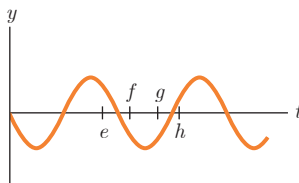
دوره تناوب نیز وارون بسامد است:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{8^\circ \text{ s}^{-1}} = 0.125 \text{ s}$$

۱۵. خیر؛ این دو تندی متفاوت اند. تندی موج v همان تندی انتشار موج است که با مشخصه های ریسمان تعیین می شود و همیشه مقدار ثابتی در هر جای ریسمان دارد. ولی هر ذره روی ریسمان به طور هماهنگ ساده ای با نوسان چشمه حرکت می کند. بنابراین هر ذره ریسمان تندی ذره v را دارد که با زمان تغییر می کند. تندی ذره وقتی از موضع تعادل می گذرد، بیشینه و در نقطه های اوج و حضیض صفر است. در حالی که تندی موج همواره مقدار ثابتی دارد که از مشخصه های ریسمان تعیین می شود.

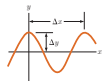
۱۶. با استدلالی مشابه آنچه در حل مسئله ۱۳ ارائه کردیم (و نیز با واریسی شکل ۳-۱۹ کتاب) درمی یابیم a و b رو به بالا، و c و d رو به پایین حرکت می کنند.

(پرسش جالب دیگری هم که می شد مطرح کرد در مورد جابه جایی یک جزء ریسمان بر حسب زمان، مطابق شکل زیر، است.

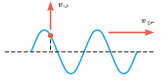


فصل سوم : نوسان و موج ۱۸۹

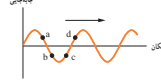
۱۸۹. شکل یک جبهه آوگرا از سیم آویخته‌ایم. توضیح دهید به نوسان در آوردن لوک ۸۰. لوک‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟



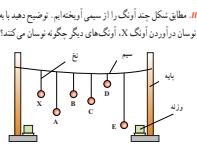
۱۹۰. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که به سمت راست حرکت می‌کند. در حالی که تندی ذره ۱۰۰ Hz باشد، طول موج، دامنه، تندی و دوره تناوب موج چقدر است؟



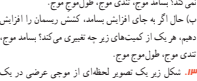
۱۹۱. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه‌ای از زمان نشان می‌دهد که در جهت محور x در طول ریسمان کشیده شده‌ای حرکت می‌کند. چهار جزء از این ریسمان روی شکل نشان داده شده‌اند. در این لحظه هر یک از این چهار جزء، بالا می‌روند یا پایین؟



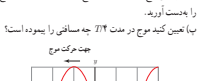
۱۹۲. سیمی با چگالی ۷۸۸ g/cm^۳ و سطح مقطع ۱۰۰ mm^۲ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶ N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.



۱۹۳. یک نوسان‌ساز موج‌های دورهای در یک ریسمان کشیده ایجاد می‌کند. امپدانس نوسان‌ساز کدام یک از کیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج، (ب) حال اگر به جای افزایش سیم، کشش ریسمان را افزایش دهیم، حرکت از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج.



۱۹۴. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده شده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند. امپدانس نوسان‌ساز کدام یک از کیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج، (ب) حال اگر به جای افزایش سیم، کشش ریسمان را افزایش دهیم، حرکت از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج.



۱۹۵. سیمی با چگالی ۷۸۸ g/cm^۳ و سطح مقطع ۱۰۰ 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 جزء ریسمان رو به پایین و در لحظه‌های g و h جزء ریسمان حرکت می‌کند.

۱۷. باید از رابطه $v = \sqrt{F/\mu}$ 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:

$$\mu = \rho A$$

$$= (\text{g/cm}^3) \left(\frac{1}{4} \pi (0.5 \times 10^{-2} \text{ cm})^2 \right) \left(\frac{1}{\text{g}} \right) \left(\frac{1}{\text{m}} \right)$$

$$= 0.0039 \text{ kg/m}$$

از آنجا تندی انتشار موج چنین می‌شود:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{156 \text{ N}}{0.0039 \text{ kg/m}}} = 200 \text{ m/s} = 2 \times 10^2 \text{ m/s}$$

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 ۳-۲۲ کتاب که طیف امواج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد درمی‌یابیم P, Q, R, S به ترتیب معادل ناحیه‌های فرابنفش، مرئی، فروسرخ، میکروموج و امواج رادیویی است.

۱۹. از قاعده دست راست برای تعیین جهت میدان مغناطیسی استفاده می‌کنیم (شکل ۳-۲۱ کتاب). جهت انتقال انرژی همان جهت انتشار موج و در سوی \hat{k} است. سوی میدان الکتریکی نیز در جهت $\hat{j} + \hat{k}$ است. بنابراین جهت میدان مغناطیسی در سوی $\hat{i} + \hat{j}$ (سوی مثبت محور z) می‌شود.

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

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{6 \times 10^{-7} \text{ m}} = 5 \times 10^{14} \text{ Hz} \approx 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

ب) طول موج در هوا چنین می‌شود:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 5 \times 10^{-7} \text{ m} \approx 5 \times 10^{-7} \text{ m}$$

و در آب

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{2 \times 10^8 \text{ m/s}}{6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 3 \times 10^{-7} \text{ m} \approx 3 \times 10^{-7} \text{ m}$$

۱۸۹. شکل یک جبهه آوگرا از سیم آویخته‌ایم. توضیح دهید به نوسان در آوردن لوک ۸۰. لوک‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟

۱۹۰. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که به سمت راست حرکت می‌کند. در حالی که تندی ذره ۱۰۰ Hz باشد، طول موج، دامنه، تندی و دوره تناوب موج چقدر است؟

۱۹۱. 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؟

۱۹۲. سیمی با چگالی ۷۸۸ g/cm^۳ و سطح مقطع ۱۰۰ mm^۲ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶ N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.

۱۹۳. یک نوسان‌ساز موج‌های دورهای در یک ریسمان کشیده ایجاد می‌کند. امپدانس نوسان‌ساز کدام یک از کیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج، (ب) حال اگر به جای افزایش سیم، کشش ریسمان را افزایش دهیم، حرکت از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج.

۱۹۴. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده شده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند. امپدانس نوسان‌ساز کدام یک از کیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج، (ب) حال اگر به جای افزایش سیم، کشش ریسمان را افزایش دهیم، حرکت از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج.

۱۹۵. سیمی با چگالی ۷۸۸ g/cm^۳ و سطح مقطع ۱۰۰ mm^۲ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶ N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.

۱۹۶. شکل زیر طیف موج‌های الکترومغناطیسی را با یک نمایش تجربی نشان می‌دهد. امپدانس نوسان‌ساز کدام یک از کیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج، (ب) حال اگر به جای افزایش سیم، کشش ریسمان را افزایش دهیم، حرکت از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج.

۱۹۷. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده شده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند. امپدانس نوسان‌ساز کدام یک از کیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج، (ب) حال اگر به جای افزایش سیم، کشش ریسمان را افزایش دهیم، حرکت از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج.

۱۹۸. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده شده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند. امپدانس نوسان‌ساز کدام یک از کیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج، (ب) حال اگر به جای افزایش سیم، کشش ریسمان را افزایش دهیم، حرکت از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج.

۱۹۹. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده شده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند. امپدانس نوسان‌ساز کدام یک از کیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج، (ب) حال اگر به جای افزایش سیم، کشش ریسمان را افزایش دهیم، حرکت از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج.

۲۰۰. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده شده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند. امپدانس نوسان‌ساز کدام یک از کیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج، (ب) حال اگر به جای افزایش سیم، کشش ریسمان را افزایش دهیم، حرکت از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ سیم، تندی موج، طول موج.

۲۱ از رابطه $\lambda = v/f$ ، طول موج را به دست می آوریم :

$$\lambda = \frac{1 \text{ m/s}}{1 \text{ s}^{-1}} = 1 \text{ m}$$

الف) فاصله بین دو تراکم متوالی همان طول موج است.

ب) فاصله بین یک تراکم و یک انبساط متوالی $\lambda/2 = 0.5 \text{ m}$ می شود.

۲۲ براساس آنچه در شکل آمده است درمی یابیم مسافت d برابر است با

$$d = v_L t_L = v_T t_T$$

که در آن v_L و v_T به ترتیب تندى امواج طولی و عرضی، و t_L و t_T به ترتیب زمان رسیدن امواج طولی و عرضی است. از هر کدام از فرمول های سمت راست می توانیم 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، می توانیم t_L یا t_T را به دست آوریم :

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_T - t_L = t_T - t_T \frac{v_T}{v_L} = t_T \left(1 - \frac{v_T}{v_L}\right) \\ &= t_T \left(1 - \frac{0.5 \text{ m/s}}{1.5 \text{ m/s}}\right) = \frac{2}{3} t_T = 4 \times 10^{-4} \text{ s} \end{aligned}$$

و از آنجا $t_T = 6 \times 10^{-4} \text{ s}$ می شود و در نتیجه

$$d = v_T t_T = (0.5 \text{ m/s}) (6 \times 10^{-4} \text{ s}) = 3 \times 10^{-4} \text{ m} = 3 \text{ cm}$$

۲۳ همان طور که در متن درس آمده است، از گزینه های داده شده تنها دمای هوا بر تندى صوت تأثیر می گذارد. البته در حالت کلی عوامل مؤثر بر تندى صوت، تراکم پذیری 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 می شود.

۲۴ الف) بسامد زاویه ای برابر است با

$$\omega = 2\pi f = 2\pi (6/7 \times 10^6 \text{ s}^{-1}) = 4/21 \times 10^7 \text{ rad/s} \approx 4/2 \times 10^7 \text{ rad/s}$$

توجه کنید که مقدار ω بسیار زیاد است و این به معنای نوسان های بسیار سریع کاوه است. در حالی که برای یک نوسانگر کند، مانند آونگ یک ساعت پاندولی، ماجرا برعکس است و دوره تناوب زیاد و بسامد پایین است.

ب) از رابطه $\lambda = v/f$ داریم :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1500 \text{ m/s}}{6/7 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 2/23 \times 10^{-4} \text{ m} \approx 2/2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

شکل ۲۱. امواج و صوت

که در سطح مایه منتشر می شوند، و در نواحی: امواج عرضی با تندى $v_T = 0.5 \text{ m/s}$ و امواج طولی با تندى $v_L = 1.5 \text{ m/s}$ ، غرض مایه ای می تواند با استفاده از اختلاف زمانی بین زمان رسیدن این امواج به نزدیک ترین بای خود، فاصله خود از طعمه را تخمین کند. اگر این اختلاف زمان برابر $\Delta t = 4 \times 10^{-4} \text{ s}$ باشد، طعمه در چه فاصله ای از غروب قرار دارد؟



۲۲ توضیح دهید کدام یک از عامل های زیر بر تندى صوت در هوا مؤثر است.

الف) شکل موج ب) دامنه موج ج) بسامد موج د) دمای هوا
۲۳ در سونوگرافی معمولاً از کاوهای دینی موسوم به تراکنار فرامسری برای تشخیص پزشکی استفاده می شود که دقیقاً روی ناحیه مورد نظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می شود. این کاوه در بسامد 6 MHz عمل می کند.

الف) بسامد زاویه ای در این کاوه نوسان چندر است؟
ب) اگر تندى موج صوتی در باقی روز از بین 150 m/s باشد، طول موج این موج در این بافت چندر است؟



۲۴. Ultrasonic Transducer

AV

۲۵ شکل زیر میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی را با یک مقیاس تجربی نشان می دهد.

الف) نام قسمت هایی از علف را که با جروف علامت گذاری شده اند، بنویسید.

ب) اگر در طول علف از جیب به راست حرکت کنیم، مقدار کدام مشخصه های موج افزایش یا کاهش می یابد و کدام ثابت می ماند؟

S	R	Q	P	S	برخلاف	برخلاف	برخلاف	برخلاف	برخلاف
---	---	---	---	---	--------	--------	--------	--------	--------

۲۶ شکل زیر میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در نقطه ای متن و دور از چشمه، در یک لحظه نشان می دهد. موج از روی را در خلاف جهت محور z انتقال می دهد. جهت میدان مغناطیسی موج را در این نقطه و این لحظه تعیین کنید.



۲۷ الف) طول موج نور نارنجی در هوا حدود $6/2 \times 10^{-7} \text{ m}$ است، بسامد این نور چندر است؟

ب) بسامد نور قرمز در حدود $4/3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ است، طول موج این نور را در هوا و آب حساب کنید. (سرعت نور را در هوا $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ و در آب $2/25 \times 10^8 \text{ m/s}$ فرض کنید).

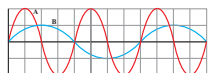
۲۸ چشمه موجی با بسامد 10 Hz در یک محیط که تندى انتشار موج در آن 100 m/s است، نوسان های طولی ایجاد می کند. اگر دامنه نوسان ها $2/0 \text{ cm}$ باشد،

الف) فاصله بین دو تراکم متوالی این موج چندر است؟
ب) فاصله بین یک تراکم و یک انبساط متوالی چندر است؟

۲۹ غرض های مایه ای وجود طعمه را با امواجی که بر اثر حرکت طعمه در ساحل نشتی ایجاد می شود، احساس می کنند. این امواج

می‌شود. فرض کنید صوت به‌طور یکجانبه در تمام جهات منتشر شود. از جاذب انرژی صوتی در محیط و نیز از انرژی که ممکن است امواج صوتی از زمین پیدا کند چشم‌پوشی کنید. با فرض اینکه صوت با شدت $I = 1 \times 10^{-11} \text{ W/m}^2$ به شونده‌ای رسد که به فاصله $r_1 = 44 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد. این صوت به شونده‌ای که در فاصله $r_2 = 16 \text{ m}$ از

محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟
پاسخ: نمودار چاه‌جایی مکان دو موج صوتی A و B که در یک محیط منتشر شده‌اند، به‌صورت زیر است. دامنه طول موج، بسامد و شدت این دو موج صوتی را با هم مقایسه کنید.



پاسخ: شکل زیر جهت‌های حرکت یک جنبه صوتی و یک نظر (شونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

جنبه	ناظر (شونده)
•	• (الف)
•→	• (ب)
•←	• (پ)
•	•→ (ت)
•	•← (ث)
•→	•→ (ج)
•←	•→ (د)

پس‌مندی را که ناظر در حالت‌های مختلف می‌بیند با حالت افق مقایسه کنید.

پاسخ: تندی صوت در یک قطر خاص، برابر با است. به یک سر لوله نوحه‌ای بشدی از جنس این فلز به طول L ضربه محکمی می‌زنیم. شونده‌ای که در سر دیگر این لوله قرار دارد دو صدا را می‌شنود. یکی ناشی از موجی است که از دیواره لوله می‌گذرد و دیگری از موجی است که از طریق هوای داخل لوله عبور می‌کند.

الف) اگر تندی صوت در هوا v باشد، بازه زمانی Δt بین دریافت این دو صدا در گوش شونده چقدر خواهد بود؟

ب) اگر $\Delta t = 1/10 \text{ s}$ و $L = 1/10 \text{ m}$ باشد، طول L لوله چقدر است؟ ($v = 340 \text{ m/s}$)

پاسخ: موج صوتی با توان $1/2 \times 10^{-4} \text{ W}$ از دو صفحه فرضی شکل ۲۶-۳ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به ترتیب $A_1 = 4 \text{ m}^2$ و $A_2 = 1 \text{ m}^2$ باشد، شدت صوت در دو سطح را تعیین کنید و توضیح دهید چرا شونده در محل صفحه دوم، دو صدای آهسته‌تر می‌شنود.

پاسخ: شدت صدای حاصل از یک مت‌سنگ‌شکن در فاصله 1 m از آن $1/10 \times 10^{-11} \text{ W/m}^2$ است. تراز شدت صوتی آن بر حسب dB چقدر می‌شود؟

پاسخ: اگر به مدت 10 دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت 120 dB باشید، آستانه شنوایی به‌طور موقت از 120 dB به 140 dB افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که به‌طور متوسط اگر به مدت 10 سال در معرض صدایی با تراز شدت 120 dB قرار گیریم، آستانه شنوایی به‌طور دائم به 140 dB افزایش می‌یابد. شدت‌های صوت مربوط به 120 dB و 140 dB چقدر است؟ (راهنمایی: برای پاسخ دادن لازم است از بسامد حساب مناسب استفاده کنید.)

پاسخ: یک دستگاه صوتی، صدایی با تراز شدت 120 dB و $f = 440 \text{ Hz}$ ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این تراز شدت 120 dB (ايجاد) ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_1/I_2 را تعیین کنید.

پاسخ: در یک آتش‌بازی، موشکی در بالای آسمان منفجر

۲۵ الف) برای Δt داریم:

$$\Delta t = t_{\text{فلز}} - t_{\text{هوا}} = \frac{L}{v_{\text{فلز}}} - \frac{L}{v_{\text{هوا}}} = L \left(\frac{v_{\text{هوا}} - v_{\text{فلز}}}{v_{\text{فلز}} v_{\text{هوا}}} \right)$$

ب) از رابطه 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 ۱-۳ کتاب، این تندی را برابر 5941 m/s در می‌یابیم. در نتیجه برای L داریم:

$$L = \frac{(1/10 \text{ s})(5941 \text{ m/s})(340 \text{ m/s})}{5941 \text{ m/s} - 340 \text{ m/s}} = 360/3 \text{ m} \approx 361 \text{ m}$$

۲۶ از رابطه $I = \bar{P}/A$ استفاده می‌کنیم. به ترتیب در محل صفحه‌ها داریم:

$$I_1 = \frac{\bar{P}}{A_1} = \frac{1/2 \times 10^{-4} \text{ W}}{4 \text{ m}^2} = 3/10 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

$$I_2 = \frac{\bar{P}}{A_2} = \frac{1/2 \times 10^{-4} \text{ W}}{1 \text{ m}^2} = 1/10 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

گرچه توان عبوری از سطوح برابر است، ولی شنونده دوم توان بر واحد سطح کمتری از شنونده اول دریافت می‌کند.

۲۷ تراز شدت صوت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

که در آن $I_0 = 1/10 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ است. بنابراین β به ازای $I = 1/10 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ چنین می‌شود

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{1/10 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2}{1/10 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 1/10 \times 10^5 \text{ dB}$$

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، آستانه 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:

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

و از آنجا

$$I = I_0 10^{\left(\frac{\beta}{10 \text{ dB}} \right)}$$

که به ترتیب به ازای $\beta_1 = 120 \text{ dB}$ و $\beta_2 = 140 \text{ dB}$ چنین به دست می‌دهد:

$$I_1 = (1/10 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2) 10^{\left(\frac{120 \text{ dB}}{10 \text{ dB}} \right)} = 6/31 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$$

$$\approx 6/3 \times 10^{-1} \text{ W/m}^2$$

$$I_T = (10 \times 10^{-1} \text{ W/m}^2) 10^{9.2 \text{ dB}/10} = 1/58 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

$$\approx 1/6 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

۲۹ نخست تفاضل β ها را محاسبه می کنیم.

$$\beta_T - \beta_1 = (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I_T}{I_0} \right) - (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I_1}{I_0} \right)$$

$$= (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I_T}{I_1} \right)$$

و از آنجا

$$\frac{I_T}{I_1} = 10^{5/10} = 3/16 \approx 3/2$$

۳۰ از رابطه $I = \bar{P}/A$ استفاده می کنیم که در اینجا $A = 4\pi r^2$ است. بنابراین داریم:

$$\frac{\bar{P}}{I_1} = \frac{4\pi r_1^2}{\bar{P}} = \frac{r_1^2}{r_1^2} = \left(\frac{16 \text{ m}}{64 \text{ m}} \right)^2 = \left(\frac{1}{4} \right)^2$$

و در نتیجه

$$I_T = 16 I_1 = 16 (10^{-1} \text{ W/m}^2) = 1/6 \text{ W/m}^2$$

۳۱ همان طور که از شکل مشخص است دامنه A دو برابر دامنه B است. همچنین طول موج B دو برابر طول موج A است. از طرفی، طبق رابطه $f = v/\lambda$ درمی یابیم که بسامد B نصف بسامد A است. در مورد شدت نیز با توجه به اینکه طبق رابطه $I = \bar{P}/A$ ، شدت با توان متوسط متناسب است و نیز همان طور که در متن درس اشاره کردیم توان متوسط با مربع بسامد و دامنه متناسب است، بنابراین داریم:

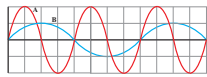
$$\frac{I_B}{I_A} = \left(\frac{A_B^2 f_B^2}{A_A^2 f_A^2} \right) = \left(\frac{A_B}{A_A} \right)^2 \left(\frac{f_B}{f_A} \right)^2 = \left(\frac{1}{2} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \right)^2 = \frac{1}{16}$$

یعنی شدت موج صوتی A ، ۱۶ برابر شدت موج صوتی B است.

۳۲ در حالت های (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 به کار می گیریم. اگر چشمه به طرف ناظر حرکت کند (حالت ب)، تجمع جبهه های موج در جلوی آن بیشتر خواهد شد و بنابراین ناظر ساکن روبه روی آن طول موج کوتاه تری نسبت به وضعیتی که چشمه ساکن بود اندازه می گیرد که این به معنی افزایش بسامد برای این ناظر است. با استدلالی مشابه درمی یابیم که با دور شدن چشمه، از بسامدی که ناظر اندازه می گیرد کم می شود و بنابراین در حالت (پ) کاهش بسامد داریم. حالت های (ت) و (ث) نیز همان وضعیتی هستند که در حالت ب اثر دوپلر در متن درس آن را بررسی کردیم. در این وضعیت ها تجمع جبهه های موج تغییر نمی کند، و اگر مانند حالت (ث) ناظر به هدف چشمه حرکت کند با جبهه های موج بیشتری مواجه می شود که به معنی افزایش بسامد است. ولی اگر ناظر مانند حالت

می شود. فرض کنید صوت به طور یکواخت در تمام جهات منتشر شود. از جذب انرژی صوتی در محیط و نیز از بازتابی که ممکن است امواج صوتی از زمین پیدا کند چشمپوشی می شود. فرض اینکه صوت با شدت $I = 10^{-1} \text{ W/m}^2$ به شونده ای برسد که به فاصله $r_1 = 44 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد، این صوت به شونده ای که در فاصله $r_2 = 16 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می رسد؟

۲۸ نمودار جابجایی-بسامد مکان موج صوتی A و B که در یک محیط منتشر شده اند، به صورت زیر است. دانه، طول موج، بسامد و شدت این دو موج صوتی را با هم مقایسه کنید.



۲۹ شکل زیر جهت های حرکت یک چشمه صوتی و یک ناظر (شونده) را در وضعیت های مختلف نشان می دهد.

جهت ناظر (شونده)	جهت چشمه
(الف)	•
(ب)	•
(پ)	•
(ت)	•
(ث)	•
(ج)	•
(د)	•

بسامدی را که ناظر در حالت های مختلف می شنود با حالت الف مقایسه کنید.

۲۸ تندی صوت در یک قطر خاص، وابسته است. به یک سر لوله توخالی بندی از جنس این قطر به طول L ضربه محکم می زنیم. شونده ای که در سر دیگر این لوله قرار دارد دو صدا را می شنود. یکی ناشی از موجی است که از دیواره لوله می گردد و دیگری از موجی است که از طریق هوای داخل لوله عبور می کند.

الف) اگر تندی صوت در هوا v باشد، بازه زمانی Δt بین دریافت این دو صدا در گوش شونده چقدر خواهد بود؟
ب) اگر $\Delta t = 1/10 \text{ s}$ و قطر از جنس فولاد باشد، طول L لوله چقدر است؟ ($v_{\text{air}} = 344 \text{ m/s}$)

۲۹ موج صوتی با توان $1/2 \times 10^{-3} \text{ W}$ از دو صفحه فرضی شکل ۲۴-۳ می گردد. با فرض اینکه مساحت صفحه ها به ترتیب $A_1 = 4 \text{ m}^2$ و $A_2 = 1 \text{ m}^2$ باشد، شدت صوت در دو سطح را تعیین کنید و توضیح دهید چرا شونده در محل صفحه دوم، صدا را آهسته تر می شنود.

۳۰ شدت صدای حاصل از یک مژه سنگینکن در فاصله $1/10 \text{ m}$ از آن $1/10 \times 10^{-1} \text{ W/m}^2$ است. تراز شدت صوتی آن بر حسب dB چقدر می شود؟

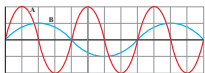
۳۱ اگر به مدت ۱۰ دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت 120 dB باشیم، آستانه شنوایی به طور موقت از 10 dB به 140 dB افزایش می یابد. مطالعات شنوایی به طور موقت از 140 dB اگر به مدت ۱۰ سال در معرض صدای با تراز شدت 140 dB قرار گیریم، آستانه شنوایی به طور دائم به 140 dB افزایش می یابد. شدت های صوت مربوط به 140 dB و 120 dB چقدر است؟ (از اذهانی برای پاسخ دادن لازم است از ماسک حساب مناسب استفاده کنید.)

۳۲ یک دستگاه صوتی، صدای با تراز شدت 100 dB و دستگاه صوتی دیگر، صدای با تراز شدت 120 dB ایجاد می کند. شدت های مربوط به این دو تراز (بر حسب W/m^2) به ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_2 را با I_1 تعیین کنید.

۳۳ در یک آنتن یزدی، موسیقی در بالای آسمان متفجر

می‌شود. فرض کنید صوت به‌طور یکجانبه در تمام جهات 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 $I = 1 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$ به شونده‌ای برسد که به فاصله $r_1 = 440 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد. این صوت به شونده‌ای که در فاصله $r_2 = 1660 \text{ m}$ از

محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟
پاسخ: نمودار جابجایی مکان دو موج صوتی A و B که در یک محیط منتشر شده‌اند، به‌صورت زیر است. دامنه طول موج بسامد و شدت این دو موج صوتی را با هم مقایسه کنید.



پاسخ: شکل زیر جهت‌های حرکت یک جنبه صوتی و یک ناظر (شونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

جنبه	ناظر (شونده)
•	• (الف)
•	• (ب)
•	• (پ)
•	• (ت)
•	• (ث)
•	• (ج)
•	• (ح)

بسامدی را که ناظر در حالت‌های مختلف می‌شنود با حالت الف مقایسه کنید.

پاسخ: شدت صوت در یک قطر خاص، برابر I است. به یک سر لوله توخالی‌شده‌ای از جنس این قطر به طول L ضربه محکمی می‌زنیم. شونده‌ای که در سر دیگر این لوله قرار دارد دو صدا را می‌شنود. یکی ناشی از موجی است که از دیواره لوله می‌گذرد و دیگری از موجی است که از طریق هوای داخل لوله عبور می‌کند.

(الف) اگر تندی صوت در هوا برابر v باشد، بازه زمانی Δt بین دریافت این دو صدا در گوش شونده چقدر خواهد بود؟
 (ب) اگر $\Delta t = 1/10 \text{ s}$ و $v = 340 \text{ m/s}$ باشد، طول L لوله چقدر است؟ ($v = 340 \text{ m/s}$)

پاسخ: موجی صوتی با توان $1 \times 10^{-4} \text{ W}$ از دو صفحه فرضی شکل ۲۶-۳ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به ترتیب $A_1 = 1 \text{ m}^2$ و $A_2 = 4 \text{ m}^2$ باشد، شدت صوت در دو سطح را تعیین کنید و توضیح دهید چرا شونده در محل صفحه دوم، دو صدای آهسته‌تر می‌شنود.

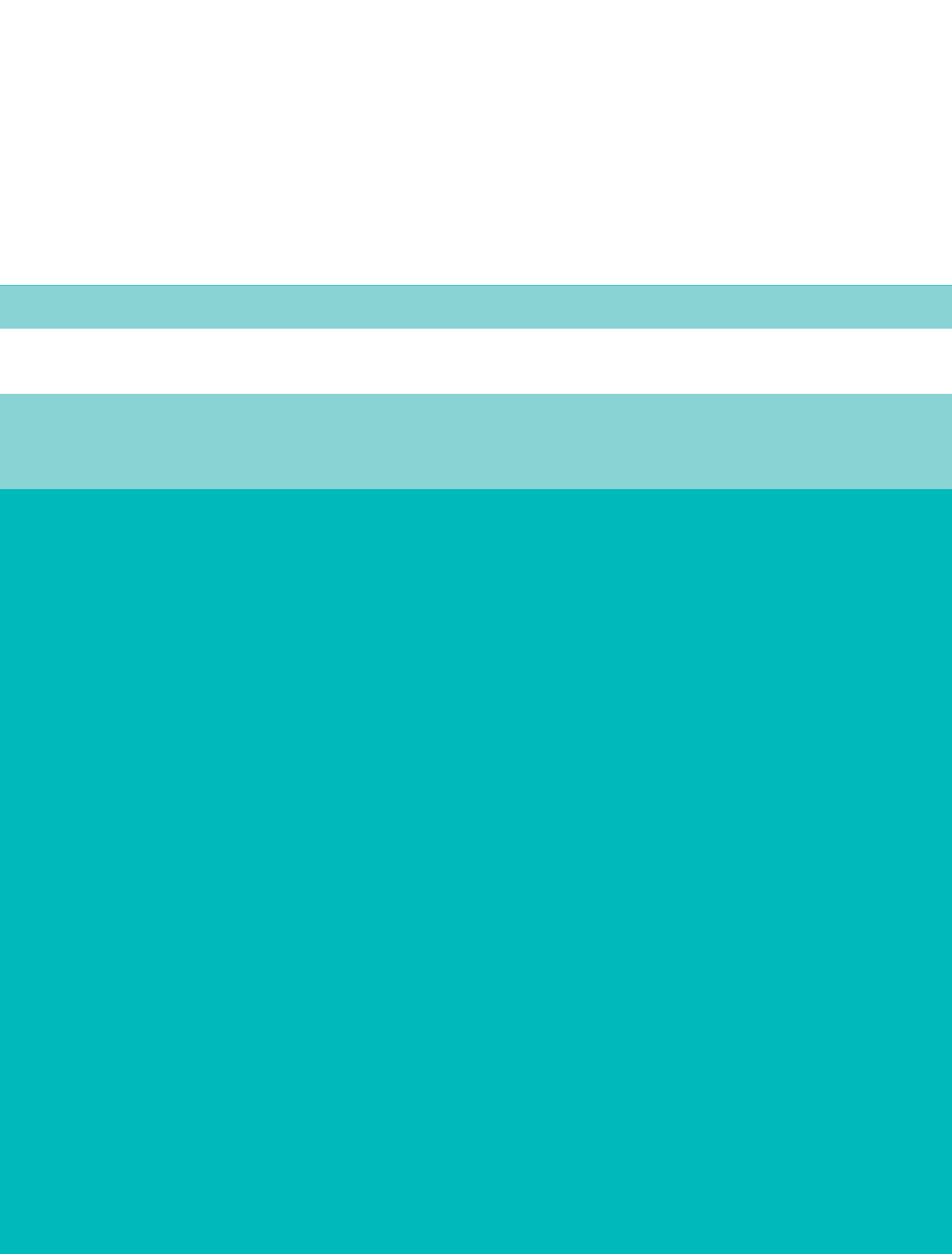
پاسخ: شدت صدای حاصل از یک متر سگشت‌کن در فاصله 1 m از آن $1 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$ است. تراز شدت صوتی آن بر حسب dB چقدر می‌شود؟

پاسخ: اگر به مدت ۱۰ دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت ۱۲۰ dB باشید، آستانه شنوایی به‌طور موقت از ۱۰ dB به ۲۸ dB افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که به‌طور متوسط اگر به مدت ۱۰ سال در معرض صدای با تراز شدت ۹۲ dB قرار گیریم، آستانه شنوایی به‌طور دائم به ۲۸ dB افزایش می‌یابد. شدت‌های صوت مربوط به ۲۸ dB و ۹۲ dB چقدر است؟ (راهنمایی: برای پاسخ دادن لازم است از ماشین‌حساب مناسب استفاده کنید.)

پاسخ: یک دستگاه صوتی، صدای با تراز شدت ۹۰ dB و $f_1 = 400 \text{ Hz}$ و دستگاه صوتی دیگر، صدای با تراز شدت ۹۵ dB و $f_2 = 1000 \text{ Hz}$ ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این دو تراز (بر حسب W/m^2) به ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_2/I_1 را تعیین کنید.

پاسخ: در یک آتش‌بازی، موشکی در بالای آسمان منفجر

(ت) از چشمه دور شود به معنی کاهش بسامد خواهد بود. در این مسئله می‌شود 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.



فصل چهارم

برهم کنش های موج

۴-۱- بازتاب موج

۴-۲- شکست موج

۴-۳- پراش موج

۴-۴- تداخل امواج

راهنمای پاسخ یابی پرسش ها و مسئله های فصل ۴

پیامدها

دانش آموزان با درک مفاهیم این فصل :

- درمی یابند امواج با محیط و نیز با خود برهم کنش می کنند.
- درمی یابند امواج، اعم از اینکه مکانیکی باشند یا الکترومغناطیسی، برهم کنش های مشابهی با محیط و نیز با خود دارند.
- با بازتاب امواج، شکست امواج، پراش و تداخل امواج به عنوان اقسامی از برهم کنش های امواج آشنا می شوند و به قوانین حاکم بر آنها پی می برند.
- با کاربردهای برهم کنش های امواج در پدیده های طبیعی و در علوم کاربردی آشنا می شوند.

چه شناختی مطلوب است؟

- در بازتاب امواج، زاویه تابش با زاویه بازتابش برابر است.
- از مکان یابی پژواکی می توان برای تعیین مکان و نیز تندی اجسام متحرک استفاده کرد.
- بر شکست امواج قانونی عمومی حاکم است که در مورد نور به قانون اسنل می انجامد.
- در شکست نور، برای دو محیط ضریب شکست تعریف می شود که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است.
- توجیه پدیده سراب تنها به کمک جبهه های موج میسر است.
- وقتی باریکه نوری شامل پرتوهایی با طول موج های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه های متفاوتی شکسته می شوند.
- وقتی ابعاد مانع یا شکاف در مسیر پیشروی یک موج در حدود طول موج آن موج باشد، موج به اطراف مانع یا شکاف گسترده می شود.
- وقتی امواج با یکدیگر تداخل پیدا می کنند (ترکیب می شوند) دامنه موج برآیند در برخی نواحی بیشینه (تداخل سازنده) و در برخی ناحیه های دیگر کمینه می شود (تداخل ویرانگر) و نقش متناوب یک در میانی از بیشینه ها و کمینه ها تشکیل می شود.
- آزمایش ینگ اثباتی تجربی بر این مدعا است که نور نیز یک موج است.
- برهم نهی موج های پیش رونده در جهت های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می کند.
- یک موج ایستاده با گره ها و شکم ها نشان داده می شود. در گره ها، دو موج کاملاً ناهم فاز و در شکم ها هم فاز هستند.
- به ازای بسامدهای خاصی موج ایستاده بارزی تشکیل می شود که به آن بسامدها، بسامدهای تشدید گفته می شود.

چه پرسش هایی اساسی است و باید در نظر گرفته شود؟

- بازتاب موج چیست و چگونه ایجاد می شود؟
- بین زاویه تابش و بازتابش در بازتاب چه رابطه ای وجود دارد؟
- تفاوت بازتاب آینه ای با بازتاب پخشنده چیست؟
- شکست چیست و در چه صورت موج شکست پیدا می کند؟
- رابطه ضریب شکست با تندی نور در یک محیط، و رابطه زاویه های شکست و بازتابش نور با ضریب های شکست دو محیط چیست؟
- رابطه ضریب شکست با دما چگونه است و چه چیز باعث پدیده سراب می شود؟
- پاشندگی نور چیست و با طول موج چه ارتباطی دارد؟
- پراش موج چیست و چه ارتباطی به ابعاد مانع یا شکاف دارد؟
- چگونه اصل برهم نهی امواج به تداخل های سازنده و ویرانگر می انجامد؟
- نقش تداخلی چیست و پهنای هر نوار تداخلی چه ارتباطی با طول موج دارد؟
- چگونه آزمایش یانگ تأییدی بر سرشت موجی نور است؟
- بسامدهای تشدید چیست و دو مورد تار و لوله صوتی چه ارتباطی با طول تار یا لوله دارند؟
- در یک تشدیدگر هلمهولتز چگونه تشدید ایجاد می شود؟

در پایان این واحد یادگیری دانش آموزان چه دانش و مهارت های اساسی را کسب می کنند؟

دانشی

با مفاهیم بازتاب امواج، قانون بازتاب عمومی، پژواک، مکان بابی پژواکی، بازتاب های آینه ای و پخشنده، شکست امواج، قانون شکست عمومی، قانون شکست اسنل، پدیده سراب، پاشندگی نور، پراش امواج، اصل برهم نهی و تداخل امواج، تداخل سازنده و ویرانگر، آزمایش یانگ، موج ایستاده، بسامدهای تشدید، لوله های صوتی و تشدیدگر هلمهولتز آشنا می شوند.

مهارتی

با مهارت های تحقیق قانون بازتاب عمومی برای امواج صوتی، تعیین تندی صوت با استفاده از پژواک، تحلیل دلیل کج شدن جبهه های موج در ساحل، استفاده از تشت موج در تحلیل پدیده های شکست و پراش موج، تعیین ضریب شکست، توجیه پدیده سراب، تحقیق پاشندگی نور با استفاده از منشور، توجیه پدیده های مبتنی بر پراش و کاربردهای آن، تحلیل آزمایشگاهی تداخل امواج صوتی، انجام آزمایش یانگ، تحلیل بسامدهای تشدید 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 موج های ایستاده و محاسبه بسامدهای تشدید و تعیین هماهنگ ها دست پیدا می کنند.

بودجه بندی پیشنهادی

بنا به صلاح دید مدرس می توان ۱۶ جلسه ۹۰ دقیقه ای به آموزش این فصل اختصاص داد.



۴

برهم کنش های موج

فصل



در این تصویر نقش شکست انگیز از امواج دریا موسوم به دریای شطرنجی (Cross Sea) را می بینید. این نقش آفون کننده چگونه ممکن است ایجاد شده باشد؟

یافته ها

- ۱-۴ بازتاب موج
- ۲-۴ شکست موج
- ۳-۴ برآش موج
- ۴-۴ تداخل امواج

تصویر شگفت انگیز آغاز فصل وقتی ایجاد می شود که دو مجموعه از جبهه های موج تقریباً به حالت عمود بر یکدیگر، با هم برخورد کنند. این اتفاق معمولاً هنگامی رخ می دهد که جبهه های موج حاصل از دو سامانه آب و هوایی در نقطه ای دور از هر دو سامانه، با هم برخورد کنند. توجه کنید دریای شطرنجی را به سادگی نمی توانید مشاهده کنید و باید از فاصله ای دور یا از آسمان آن را ببینید. در فیلم زیر چگونگی ایجاد یک دریای شطرنجی را می بینید.

در فیلم چگونگی تشکیل دریای شطرنجی را مشاهده می کنید.



خوب است اشاره شود ساختار این فصل کتاب مبتنی بر بررسی پدیده های برهم کنش انواع امواج در یک بعد، دو بعد و سه بعد است.

در این فیلم بازتاب تپ از یک انتهای ثابت را می بینید.



فیلم

در این فیلم بازتاب تپ از یک انتهای باز را می بینید.



فیلم

در این فیلم بازتاب دو تپ از انتهای ثابت و آزاد را با هم می بینید.



فیلم

در این فیلم بازتاب دو موج سینوسی از تکیه گاه های ثابت و آزاد را می بینید.



فیلم

دوباره گوشزد می شود وب گاه www.falstad.com/ripple کلیه آزمایش های ممکن با تشت موج را دارد.

در این فیلم برهم کنش جبهه های موج دریا را می بیند.



فیلم

خوب است اشاره شود قانون بازتاب عمومی برای امواج دایره ای و کروی نیز برقرار است. مثلاً اگر در تشت موج به جای تیغه نوسان کننده از گوی کوچک نوسان کننده استفاده کنیم، امواجی دایره ای بر سطح آب تشکیل خواهد شد. این امواج در برخورد با یک مانع تخت بازتابیده می شوند و بر اثر این بازتاب، امواج دایره ای دیگری تشکیل می شود که در ترکیب با امواج تابیده، شبکه ای را در جلوی مانع تشکیل می دهند. شکل الف تصویری واقعی از این پدیده در تشت موج

آیا تاکنون زوایای صدای خود را شنیده اید؟ زوایای صدای بازتاب امواج مکانیکی است. برخی از جامداران ظفر خفاش از همین ویژگی برای یافتن مسیر خود با طعمه استفاده می کنند (شکل ۳-۲). امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) نیز بازتابی دارند. در واقع همان طور که در علوم هشتم آموختیم، وقتی نور بازتابیده از جسمی به چشم ما برسد، آن جسم را می بینیم. بازتاب، تنها راه برهم کنش امواج با محیط نیست. شکست نیز نوع دیگری از برهم کنش امواج با محیط است.



شکل ۳-۲: خفاش برای یافتن طعمه از بازتاب موج صوتی خود استفاده می کند.

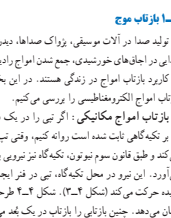
شکل ۳-۳: بازتاب نور از بال پروانه.

شکل ۳-۴: بازتاب موج تپ از یک انتهای ثابت.

شکست وقتی رخ می دهد که جهت پیشروی موج در ورود به یک محیط جدید تغییر کند. وقتی یک ماهی را از بالای یخ کای می بینید، آن را در مکان واقعی خود مشاهده نمی کنید، بلکه مکانی ظاهری بر اثر شکست نور را ادراک می کنید (شکل ۳-۴). همان طور که خواهیم دید، شکست برای امواج مکانیکی نیز رخ می دهد. براساس نیز نوع دیگری از برهم کنش امواج با محیط است. امواج به تنها با محیط بلکه با یکدیگر نیز برهم کنش می کنند. تداخل نوعی از برهم کنش امواج با یکدیگر است. در این فصل، بازتاب، شکست، پراش و تداخل را به عنوان برهم کنش های امواج بررسی می کنیم.

۳-۴ بازتاب موج

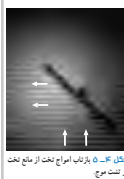
تولید صدا در آلات موسیقی، زوایای صداها، دیدن ماه، دیدن صفحه این کتاب، گرم شدن مواد غذایی در اجاق های خورشیدی، جمع شدن امواج رادیویی در کانون آنتن های شغلا و ... مثال هایی از کاربرد بازتاب امواج در زندگی هستند. در این بخش، نخست بازتاب امواج مکانیکی و سپس بازتاب امواج الکترومغناطیسی را بررسی می کنیم. بازتاب امواج مکانیکی: اگر تپ را در یک تار (یا یک رسمان) کشیده بلند که یک سر آن در تکیه گاهی ثابت شده است روانه کنیم، وقتی تپ به تکیه گاه (مرز) می رسد نیروی به آن وارد می شود و طبق قانون سوم نیوتن، تکیه گاه نیز نیروی با اندازه برابر و در جهت مخالف بر تپ وارد می آورد. این نیرو در محل تکیه گاه، تپ را فشرده ایجاد می کند که روی فتر در جهت مخالف تپ تابیده حرکت می کند (شکل ۳-۴). شکل ۳-۴: طرحی واضح تر از تابش و بازتابش چنین تپ را نشان می دهد. چنین بازتابی را بازتاب در یک بعد می گویند.



شکل ۳-۴: بازتاب موج تپ از یک انتهای ثابت.

شکل ۳-۵: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

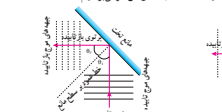
شکل ۳-۵: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز



شکل ۳-۵: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

به خاطر داریم وقتی تپه تختی را بر سطح آب تشت می نوسان می آوریم، امواج تختی بر سطح آب تشکیل می دهند. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این مانع بازتاب می یابند. به چنین بازتابی، بازتاب در دو بعد می گویند. ساده ترین شکل یک مانع، مانع تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تشت اند (شکل ۳-۵). شکل ۳-۵: طرحی از چنین بازتابی را نشان می دهد. با استفاده از جبهه های موج می توانیم به طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع پی ببریم. طرح معادل دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از نوارهای پستی است. یک پستی به یک مانع مستقیم عبود بر جبهه های موج است که جهت انتشار موج را نشان می دهد. بدین ترتیب می توان نوارهای پستی شکل ۳-۵ را در حضور جبهه های موج به صورت شکل ۳-۵ رسم کرد. زاویه بین خط عبود بر سطح مانع و پستی تابیده (افزودی) را زاویه تابش می نامند و با θ نشان می دهند. و زاویه بین خط عبود بر سطح مانع و پستی بازتابیده را زاویه بازتابش می نامند و با θ_r نشان می دهند. آزمایش هایی نظیر آنچه در شکل ۳-۵ نشان داده شده است، ثابت می کند که برای هر وضعت مانع و همه انواع دیگر موج، مانند امواج دایره ای یا کروی نیز، همواره زاویه بازتابش برابر با زاویه تابش است. یعنی: $\theta_r = \theta$ که به آن، قانون بازتاب عمومی گفته می شود.

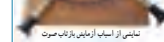
نمونه دیگری از بازتاب امواج مکانیکی، بازتاب امواج صوتی است. صوت می تواند از یک سطح سخت مانند دیوار بازتابش کند. این مثالی از بازتاب امواج در سه بعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می کند. در فعالیت ۳-۴ به تحقیق این امر می پردازیم.



شکل ۳-۶: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۷: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

با اسباب نشان داده شده در شکل رویه رو، می توان زاویه تابش و زاویه بازتابش را در امواج صوتی اندازه گیری کرد. با استفاده از این اسباب، قانون بازتاب عمومی را برای امواج صوتی تحقیق کنید.



شکل ۳-۸: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۹: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۰: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۱: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۲: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۳: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۴: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۵: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۶: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۷: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۸: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۱۹: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۲۰: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۲۱: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

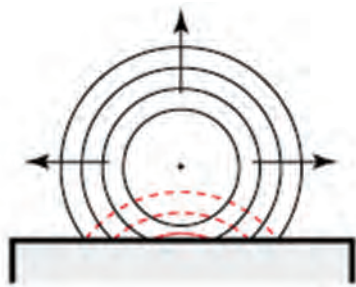
شکل ۳-۲۲: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۲۳: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۲۴: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

شکل ۳-۲۵: بازتاب موج تپ از یک انتهای باز.

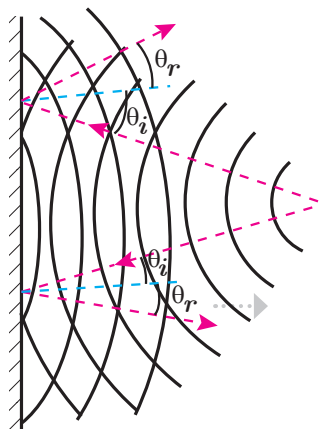
و شکل ب طرحی از آن را نشان می‌دهد. آزمایش‌هایی نظیر آنچه که در شکل الف نشان داده شده است ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، زاویه تابش برابر با زاویه تابش است. ولی باید توجه کرد زاویه تابش در نقاط مختلف، متفاوت است و بنابراین زاویه بازتابش نیز که برابر زاویه تابش در محل برخورد است، در نقاط مختلف متفاوت 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 ب) طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط توپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین) و ترکیب آنها در جلوی مانع.

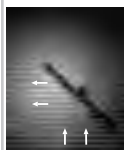


شکل الف) امواج دایره‌ای بازتابیده از مانعی تخت در یک تست موج در ترکیب با امواج دایره‌ای تابیده، شبکه‌ای را در جلوی مانع تشکیل داده‌اند.



شکل پ) قانون بازتاب در هر نقطه سطح مانع بازتاب‌دهنده برقرار است.

فصل ۱۴: برهم کنش های موج



شکل ۱۴-۵: بازتاب امواج تخت از سطح تخت در حالت موج

به خاطر داریم وقتی نیتة تختی را بر سطح آب تخت می‌آوردیم، امواج تختی بر سطح آب تشکیل می‌شود. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع‌هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این موانع بازتاب می‌یابند. به چنین بازتابی، بازتاب در دو بعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل یک مانع، ممانی تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۱۴-۵). شکل ۱۴-۶: 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 معادله دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از **نودار بر روی** است. یک برتو، یککان مستطینی عمود بر جبهه‌های موج است که جهت انتشار موج را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نمودار برتویی شکل ۱۴-۶ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۱۴-۷ رسم کرد. زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و برتوی بازتابیده (برتوی را **زاویه تابش** می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند) و زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و برتوی بازتابیده را **زاویه بازتابش** می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند. آزمایش‌هایی نظیر آنچه در شکل ۱۴-۸ نشان داده شده است، ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، و همه انواع دیگر موج، مانند امواج دایره‌ای یا گوی نیز، همواره زاویه بازتابش برابر با زاویه تابش است یعنی: $\theta_i = \theta_r$ که به آن **قانون بازتاب عمومی** گفته می‌شود.

نمونه 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 بعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند. در فعالیت ۱۴-۱ به تحقیق این امر می‌پردازیم.

شکل ۱۴-۶: طرحی از جبهه‌های موج تابیده. نظیر شکل ۱۴-۷: نمودار برتویی همراهِ با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانع تخت

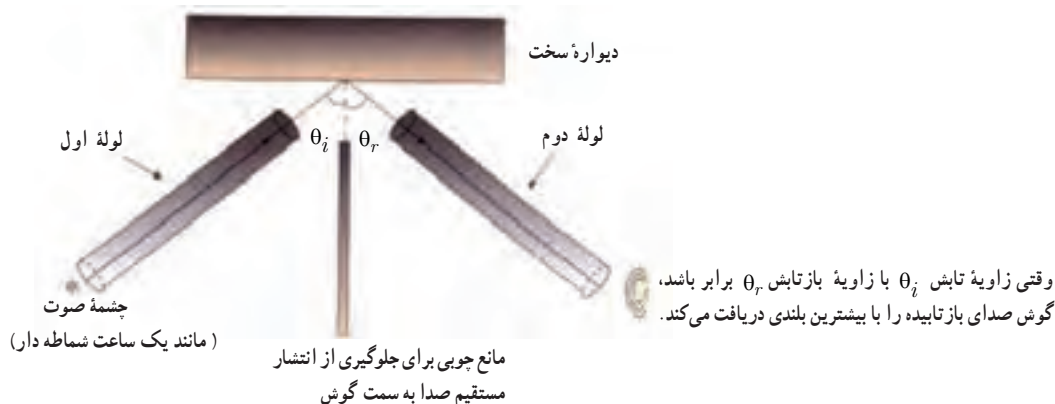


فعالیت ۱۴-۱
با اسباب نشان داده شده در شکل روی‌هم‌رو، می‌توان زاویه تابش و زاویه بازتابش را در امواج صوتی اندازه‌گیری کرد. با استفاده از این اسباب، قانون بازتاب عمومی را برای امواج صوتی تحقیق کنید.

۱- توجه کنید که خط مانع باید در عمود بر خط θ_i باشد. دلیل آن از آنرا در بحث بران امواج می‌بینید.
۲- اگر زاویه θ_i را در یک طرف از θ_r قرار دهید، در آن طرف θ_r را می‌بینید.

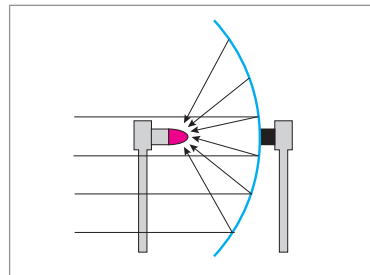
پاسخ فعالیت ۱۴-۱

این اسباب شامل دو لوله متصل به دو دهانه است که یکی نقش دهانه ورودی صدا و دیگری نقش گوشی را بازی می‌کند. با ایجاد صدا در دهانه ورودی، صوت پس از عبور از لوله اول، و بازتاب از یک دیواره سخت، با عبور از لوله دوم وارد دهانه گوشی می‌شود و ما آن را می‌شنویم. برای جلوگیری از انتشار مستقیم صوت از منبع به سمت شنونده، مانعی بر روی گیره‌های شکل نصب می‌شود. شنونده با حرکت لوله دوم، در زاویه مشخصی درمی‌یابد که صدا با بیشترین بلندی به گوش او می‌رسد. اکنون اگر مکان لوله دوم ثابت شود، با واریسی زاویه لوله اول با مانع (خط عمود بر دیواره بازتابنده) و زاویه لوله دوم با مانع، درمی‌یابیم که بیشترین بلندی دریافتی به ازای برابر بودن زاویه تابش و زاویه بازتابش حاصل می‌شود.



پاسخ فعالیت ۲-۴

در میکروفون سهموی از یک سطح کاو سهموی برای جمع و کانونی کردن امواج صوتی در یک گیرنده استفاده می‌شود. این میکروفون‌ها به همین دلیل، حساسیت بسیار زیادی به صداهایی دارند که موازی با محور سطح سهموی به این سطح می‌تابند. استفاده مرسوم از این میکروفون‌ها در ثبت صداهای پرندگان دوردست، و صداهای میداین ورزشی (شکل الف)، و نیز استراق سمع است. شکل ب طرحی از چگونگی کار این دستگاه را نشان می‌دهد.



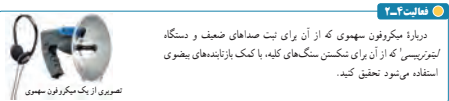
(ب)



(الف)

دستگاه لیتوتریپسی از این ویژگی سطح بیضوی که دو کانون دارد استفاده می‌کند. 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 بازتابنده بیضوی ایجاد می‌کنند و محل بیمار را طوری تنظیم می‌کنند که سنگ کلیه او در محل کانون دوم سطح این بازتابنده باشد. شکل پ، طرحی از چگونگی کار این دستگاه را نشان می‌دهد.

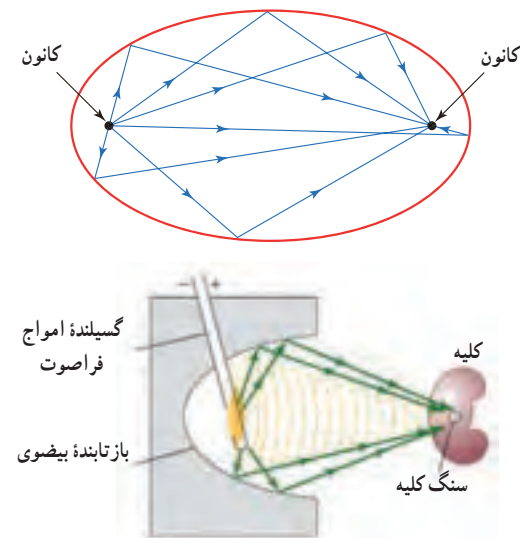


پژواک: در برابر دیواره یا صخره‌ای بلندی که چند متر از شما فاصله دارد، بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی، بازتاب صدای دست زدن خود را خواهید شنید. اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شما برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی **پژواک** می‌گویند. اگر تأخیر زمانی بین این دو صوت کمتر از $\frac{1}{8}$ باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

فناوری و کاربرد مکان‌یابی پژواکی
مکان‌یابی پژواکی روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابنده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند. مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر که در فصل پیش آموختیم، در تعیین مکان متحرک و نیز تعیین تندی آنها به کار می‌رود. برخی از جانوران نظیر خفاش و دلفین از این روش استفاده می‌کنند. همین‌طور در فناوری‌های نظیر آرایه‌گیری تندی تبارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود. خفاش، قورباغه از امواج فراصوتی را گسیل می‌کند که این بسته به نوع خفاش از دهان با سوراخ‌های بینی آن گسیل می‌شود. این امواج از اشیایی که در مسیر خفاش قرار دارند بازتاب می‌یابند و بدین ترتیب خفاش را از اشیایی که بر سر راه او قرار دارند آگاه می‌سازد. البته بسته به اینکه بسته به بازتابنده، خود خفاش، یا هر دو متحرک باشند، خفاش تغییر بسامدی ناشی از اثر دوپلر را در موج بازتابنده ادراک می‌کند و بدین‌وسیله می‌تواند سرعت خود یا شیء متحرک را تعیین کند. خفاش‌ها از این ویژگی برای تناسباتی و شکار طعمه‌های خود استفاده می‌کنند. همچنین در دستگاه سونار که در کشتی‌ها برای مکان‌یابی اجسام زیر آب به کار می‌رود، و در سونوگرافی نیز از مکان‌یابی پژواکی استفاده می‌شود.

Lithotripsy Echo Echolocation

۹۲



خوب است تمرین ۱-۴ را بی‌درنگ در همین جا مطرح می‌کنید و از دانش‌آموزان بخواهید پاسخ خود را بیان کنند و سپس پاسخ‌ها را بررسی و پاسخ صحیح را مطرح کنید.

پاسخ تمرین ۱-۴

همان طور که در متن درس اشاره شد، اگر تأخیر زمانی صوت بازتابیده و صوت اولیه کمتر از $1/8$ s باشد، گوش انسان قادر به تمیز پژواک از صوت اولیه نخواهد بود. از اینجا می توان فاصله کمینه لازم بین چشمه صوت و سطح بازتابنده را برای تمیز یک پژواک از صوت اولیه محاسبه کنیم. اگر چشمه صوت و شنونده هر دو تقریباً در یک مکان واقع باشند، آنگاه با توجه به اینکه تندی صوت در هوا را تقریباً 340 m/s در نظر گرفته ایم، این مسافت به راحتی با استفاده از رابطه $x = vt$ محاسبه می شود. با جای گذاری $x = 2L$ ، که L فاصله بین چشمه و سطح بازتابنده است، به ازای $t = 1/8 \text{ s}$ خواهیم داشت :

$$L = \frac{1}{2}vt = \frac{1}{2}(340 \text{ m/s})(1/8 \text{ s}) = 21 \text{ m}$$

فصل ۳۴ برهم کنش های موج

تمرین ۱-۴

کمترین فاصله بین شما و یک دیوار بلند جقدر باشد تا پژواک صدای خود را از صدای اصلی تمیز دهید؟ تندی صوت در هوا را 340 m/s در نظر بگیرید.

مثال ۱-۳

والی غنای یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکانیابی می کند. به سادگی امواج فراصوتی ای که این وال تولید می کند حدود 100 kHz است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۱-۳ حدود 1520 m/s است، (الف) طول موج این صوت و (ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای ماهی که در فاصله 100 m از آن قرار گرفته، جقدر است؟

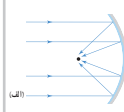
پاسخ : (الف) با استفاده از رابطه $\lambda = v/f$ داریم :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1520 \text{ m/s}}{100 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 1.52 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.52 \text{ cm}$$

همان طور که بعداً در بحث راس خواهد دید برای تشخیص یک جسم، اندازه آن باید در حدود طول موج به کار رفته با بزرگتر از آن باشد. بنابراین، وال اجسامی در حدود این طول موج یا بزرگتر را می تواند تشخیص دهد.

ب) زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و ماهی برابر است با :

$$t = \frac{2L}{v} = \frac{2(100 \text{ m})}{1520 \text{ m/s}} = 0.132 \text{ s}$$

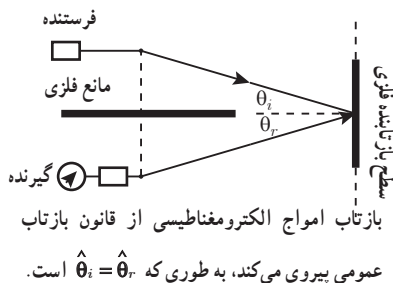


بازتاب امواج الکترومغناطیسی : امواج الکترومغناطیسی نیز می تواند از یک سطح، بازتابیده شود و بازتاب آنها از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می کند. امواج الکترومغناطیسی تحت تأثیر به یک سطح کار پس از بازتابش، مانند شکل ۹-۴ (الف) در یک خطه کانونی می شوند. این نمونه دیگری از بازتاب در سه بعد است. از همین سازوکار برای دریافت امواج رادیویی توسط آنتن های بنشانی و با امواج فرسرخ وای گرم کردن آب با مواد غذایی در اجاق های خورشیدی (شکل ۹-۴ ب) استفاده می شود.



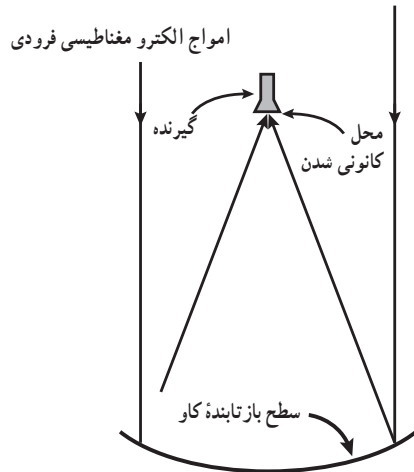
۹-۴ (الف) بازتاب امواج الکترومغناطیسی : از امواج الکترومغناطیسی نیز می توان از یک سطح کار، تحت پس از بازتابش از یک سطح کار، در فضای مقابل سطح، کانونی می شود. (ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

توجه کنید که بازتاب امواج الکترومغناطیسی را می توانید به عنوان نمونه ای از بازتاب در سه بُعد مطرح کنید. همچنین چون این مبحث را عمدتاً برای نور مطرح می کنند خوب است به اسباب های آزمایشگاهی ای که قانون بازتاب عمومی را بر فرض برای امواج رادیویی بررسی کرده اند نیز اشاره کنید تا دانش آموزان صرفاً این قانون را برای نور نپندارند. شکل زیر طرحی از چنین آزمایش هایی را نشان داده است. یک فرستنده امواج رادیویی (RF)، امواجی را به سمت سطح یک بازتابنده فلزی ارسال کرده است. در صورت حضور مانع فلزی می توان توسط گیرنده، امواج بازتابیده را آشکار کرد. با حرکت دادن سطح بازتابنده در امتداد خط CD که موازی خط AB است، مشاهده می شود که وقتی سطح بازتابنده وسط خط AB (در امتداد مانع فلزی) است، گیرنده پاسخ شدیدتری را دریافت و آشکار می کند و به این ترتیب قانون بازتاب عمومی برای امواج رادیویی تأیید می شود.



سازوکار تقریباً مشابهی در رادارها وجود دارد، با این تفاوت که آنتن گیرنده و فرستنده امواج رادیویی یکی است و امواج رادیویی گسیل شده توسط یک آنتن، پس از بازتاب از مثلاً یک هواپیما دوباره به همان آنتن بازمی گردند و بدین ترتیب حضور هواپیما آشکار می شود.

خوب است با رسم طرح‌هایی مانند زیر، چگونگی کانونی شدن امواج رادیویی به وسیله یک آنتن بشقابی را نشان دهید.



فصل ۳۴: بررسی کانونی شدن امواج

۳-۱-۲ تمرین

کمترین فاصله بین شما و یک دیوار بلند چقدر باشد تا پژواک صدای خود را از صدای اصلی نیز تندی صدای خود را ۳۰٪ را در نظر بگیرید.

۳-۱-۳ مثال

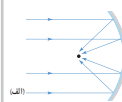
والی شریکی از جاورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکانیابی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی‌ای که این وال تولید می‌کند حدود 100 kHz است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۳-۲ حدود 1520 m/s است، الف) طول موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل‌شده توسط وال برای ماهی که در فاصله 100 m از آن قرار گرفته، چقدر است؟ پاسخ: الف) با استفاده از رابطه $\lambda = v/f$ داریم:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1520\text{ m/s}}{100 \times 10^3\text{ s}^{-1}} = 1.52 \times 10^{-2}\text{ m} = 1.52\text{ cm}$$

همان‌طور که بعداً در بحث برآش خواهیم دید برای تشخیص یک جسم، اندازه 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 ماهی برابر است با:

$$t = \frac{x}{v} = \frac{2L}{v} = \frac{2 \times 100\text{ m}}{1520\text{ m/s}} = 0.132\text{ s}$$



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 کاور پس از بازتابش، مانند شکل ۳-۴ الف در یک نقطه کانونی می‌شوند. این نمونه دیگری از بازتاب در سه بعد است. از همین سازوکار برای دریافت امواج رادیویی توسط آنتن‌های بشقابی و با امواج فرسوخ رای گرم کردن آب با مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی (شکل ۳-۴ ب) استفاده می‌شود.



شکل ۳-۴ الف) بازتاب امواج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاور در نقطه کانونی می‌شود. ب) تصویر از یک اجاق خورشیدی



۳-۱-۴ فعالیت: وادار دویبری: از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکانیابی پژواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید.

۳-۴ پاسخ فعالیت

روش کار به این ترتیب است که امواج میکروموج یا فرسوخ را مطابق شکل کتاب در محدوده مشخصی گسیل می‌کنند. فاصله خودرو از فرستنده گسیلنده موج با اندازه‌گیری زمان بین گسیل و دریافت موج به دست می‌آید. تندی خودرو نیز از تغییر بسامد موج دریافتی نسبت به موج گسیل‌شده با استفاده از رابطه دوپلری که برای امواج الکترومغناطیسی به کار می‌آید، تعیین می‌شود. خوب است بدانید این رابطه در تندی‌ها کم، برای تابش مستقیم $\Delta f = 2 \frac{v}{c} f_0$ را به دست می‌دهد که در آن c تندی نور است $(3 \times 10^8\text{ m/s})$. برای تابش زاویه‌دار که در شکل نشان داده شده است به $\Delta f = 2 f_0 \frac{v \cos \theta}{c}$ می‌رسیم که در آن θ زاویه بین پرتوی گسیل‌شده و امتداد حرکت خودرو است. یک مثال نوعی برای تابش مستقیم ($\theta = 0^\circ$) را در نظر می‌گیریم. یک پلیس با دریافت بازتاب امواج گسیل‌شده با بسامد $1.4 \times 10^7\text{ Hz}$ به سمت یک خودرو به تغییر بسامدی برابر $4/7 \times 10^4\text{ Hz}$ می‌رسد. آنگاه با استفاده از رابطه بالا به $v = 15\text{ km/h}$ برای تندی خودرو می‌رسیم.

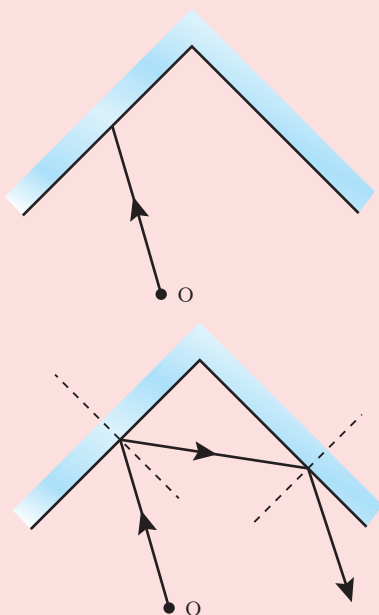
۳-۹ پاسخ فعالیت کتاب تجربی

این فعالیت که برای رشته تجربی آمده است، زیرمجموعه‌ای از مکان‌یابی پژواکی است که در «فناوری و کاربرد» رشته ریاضی نیز مطرح شده است. در اندازه‌گیری تندی شارش خون، امواج فراصوت (با بسامدی عموماً بین 2° تا 10° مگاهرتز) به سمت یک رگ خونی گسیل می‌شود و با استفاده از تغییر بسامد بازتابی موج فراصوتی بازتابیده از گویچه سرخ، که ناشی از اثر دوپلر است، تندی v آن به دست می‌آید. خوب است بدانید رابطه‌ای که از آن برای این تندی استفاده می‌شود، برای تابش مستقیم $\Delta f \approx \frac{v}{v_s} f_0 - \left(\frac{-v}{v_s}\right) f_0 = 2 \frac{v}{v_s} f_0$ است که در آن v_s تندی صوت است. برای تابش زاویه‌دار که در شکل نشان داده شده است

به $\Delta f \approx 2f_s \frac{v \cos \theta}{v_s}$ می‌رسیم. آنگاه با دانستن تغییر بسامد ناشی از بازتاب و زاویه تابش امواج فراصوت می‌توان به راحتی تندی v شارش خون را محاسبه کرد. برای اینکه به حسی از عدد تندی شارش خون دست یابید، یک تابش غیرمستقیم با $\theta = 3^\circ$ را در نظر بگیرید. در یک آزمایش نوعی، به ازای $v_s = 1540 \text{ m/s}$ و $f_s = 3 \text{ MHz}$ به تغییر بسامدی حدود 1 MHz می‌رسند که از آن تندی شارش خون حدود 3 cm/s حاصل می‌شود. خوب است بدانید تندی شارش خون به سطح مقطع رگ بستگی دارد و مثلاً در آئورت حدود 4 cm/s ، و در مویرگ‌ها حدود 3 cm/s است. البته در هنگام دویدن این عددها افزایش می‌یابد.

تمرین های 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 $1/5$ ثانیه، و چندین بازتاب رفت و برگشت آخرین پژواک صدا را از دیواری که $25/7 \text{ m}$ از شما فاصله دارد می‌شنوید. این پژواک مربوط به چندمین بازتاب است؟
پاسخ : به ازای یک رفت و برگشت، زمان پیمودن صوت $T/2$ می‌شود. بنابراین به ازای n رفت و برگشت، زمان برابر $T/(n+1)$ است. آنگاه برای بازتاب‌های چندگانه داریم :

$$d = vt = (343 \text{ m/s}) \left(\frac{1/5 \text{ s}}{n+1} \right)$$

و در نتیجه

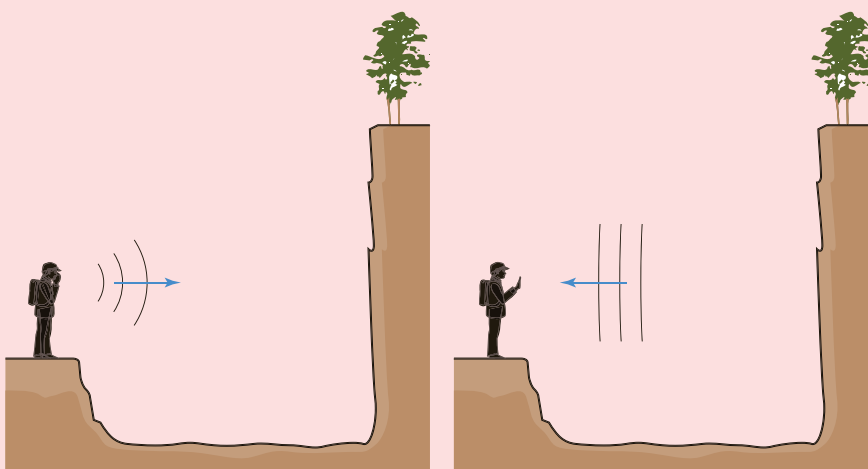
$$n = \frac{(343 \text{ m/s})(1/5 \text{ s})}{25/7 \text{ m}} - 1 = 19$$

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 صخره بلندی که حدوداً 100 m 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 آن قدر به طور متوالی 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 30 s) بشمارد. از اینجا می‌توانید فاصله زمانی بین دو کف زدن متوالی را محاسبه کنید. با توجه به هم‌زمانی هر پژواک با یک صدای کف زدن، این فاصله زمانی برابر زمان رفت و برگشت صوت است. اکنون با دانستن فاصله دقیق خود از دیواره یا صخره می‌توانید با استفاده از رابطه $x=vt$ تندی صوت را در محل آزمایش تعیین کنید.



۲) قانون بازتاب را تحقیق کنید.

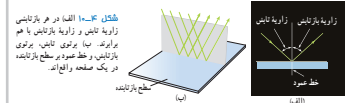


دو جفت سوزن ته‌گرد با رنگ‌های متفاوت را روی سطح افقی تختی در برابر یک آینه تخت قرار دهید طوری که این چهار سوزن، مطابق شکل، یک نمای V شکل را تشکیل دهند که رأس آن تقریباً در وسط آینه قرار گیرد. اکنون به آینه نگاه کنید و سر خود را آن قدر حرکت دهید تا بتوانید تصویر یک جفت سوزن را در امتداد جفت سوزن دیگر ببینید. این فعالیت، روشی دیگر برای تحقیق قانون بازتاب است.

در اینجا خوب است ضمن یادآوری مفاهیمی که دانش آموزان در کتاب علوم هشتم خود آموختند، دوباره اسباب آزمایش بازتاب نور را جهت تحقیق قانون بازتاب عمومی به دانش آموزان معرفی کنید. اگر با یک لیزر مدادی باریکه نور را به آینه ای تخت که عمود بر صفحه مدرجی برحسب زاویه قرار دارد بتابانند، درمی یابند که اندازه زاویه های تابش و بازتابش برای هر زاویه تابشی برابر است و بدین ترتیب قانون بازتاب عمومی را برای نور مرئی تحقیق می کنند.



همان طور که قبلاً دیدیم نور مرئی بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است. بنابراین نور مرئی نیز از همان قانون بازتاب عمومی امواج پیروی می کند؛ یعنی زاویه تابش و بازتابش در هر بازتابشی با هم برابرند (شکل ۳-۲). 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 واقع اند (شکل ۳-۱ ب).



در مواردی که سطح بازتابنده نور همچون یک آینه، بسیار هموار باشد، بازتاب نور را بازتاب آینه ای یا منظم می گویند.

نوع دیگر بازتابش، بازتاب پخشنده یا نامنظم است. این بازتاب وقتی رخ می دهد که نور به سطحی برخورد کند که صیقلی و هموار نباشد. پرتوهای نور به طور کانونی از سطح و بلندی های سطح بازتابنده، و در تمام جهات پراکنده می شوند (شکل ۳-۲). به دلیل این بازتاب است که شما این صفحه کاغذ، دیوار، دستان، دوست خود، و... را می بینید. در بازتاب آینه ای از یک آینه تخت، بازتابش یک دسته پرتوی موازی را فقط در یک جهت می تواند ببینید. ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته پرتو را می تواند 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 می رسد اما از دید میکروسکوپی این سطح از اجزای شمار و کوچکی تشکیل شده است که بسیار بزرگتر از ۱mm هستند. با توجه به اینکه طول موج نور مرئی در حدود ۰.۵mm است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می شود. در مقابل، ناهمواری های یک آینه با یک سطح فیزی صیقلی، بسیار کوچکتر از ۱mm است و بنابراین برای نور مرئی سطحی هموار محسوب می شود.



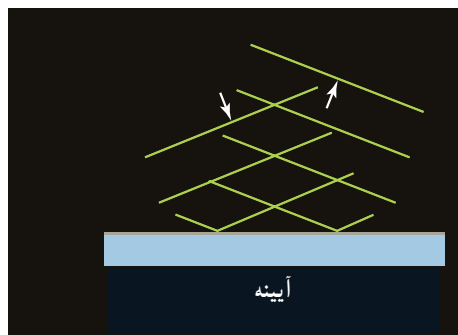
کریستین هویگس (۱۶۴۵-۱۶۹۷م.)
در سال ۱۶۹۷ هویگس در دانشگاههای لیدن و پرا تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله ای در زمینه تابش و انتشار نور را منتشر کرد که مورد توجه به داکتر، ریاضی دان، فیزیک، و... قرار گرفت. هویگس در زمان خود دانشمندی با نفوذ و مشهور بود و در آن دوران از او به عنوان یک زن باهوش و توانمند یاد می کردند. او با اثبات خود در مورد تابش و انتشار نور، به طور کلی به درک ما از تابش و انتشار نور کمک کرد. هویگس همچنین توانایی ریاضیاتی داشت که به او کمک می کرد تا بتواند به خوبی توضیح دهد که چرا نور در آب و هوا به گونه ای خاص حرکت می کند. او همچنین توانایی نوشتن یک کتاب در مورد تابش و انتشار نور را داشت. هویگس اختراعاتی در زمینه تابش و انتشار نور را اختراع کرد.



طیف کاغذی از بازتاب پخشنده
نور از سطح هموار نوبه کشیده که در آینه نور را به بازتاب زاویه های تابش و بازتاب با هم برابر و پرتوی تابش و پرتوی بازتاب، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع اند.

۳-۲ شکست موج
رنگ های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی های آبراهای توری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می شود، و... مثالهای رایجی از شکست شدن موج های توری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می دهد ولی به اندازه موج های توری اهمیت ندارد. وقتی موج به مرز جدایی دو محیط می رسد بخشی از آن بازتابیده می شود و بخشی دیگر عبور می کند که این افزون بر جنب موج است که در هر دو محیط رخ می دهد؛ مثلاً عبور یک تب در طول طنابی را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی

خوب است اشاره شود که واژه «آینه ای» در بازتاب آینه ای به این بازمی گردد 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 آینه ای رخ می دهد. همچنین خوب است طرح بازتاب آینه ای را با جبهه های موج تخت نیز افزون بر نمایش پرتویی نشان دهید.



فصل ۱۴: برهم‌کنش‌های موج

این تب از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۱۴-۳). بخش از این تب بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۱۴-۴). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط چینه موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطه $v = \lambda f$ ، طول موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

پرسش ۱۴-۴

اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طایب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول موج عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟

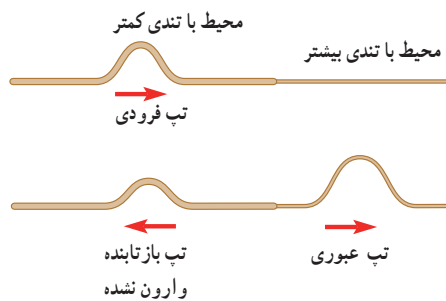
در حالت‌های دو به سه پندی یا عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج **شکست** پیدا کند. همان‌طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب به عمق آن بستگی دارد. از این ویژگی می‌توانیم برای تحقیق پدیده شکست در تشت موج استفاده کنیم؛ یعنی با تغییر دادن 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 ناحیه کم‌عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیه موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصله بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۱۴-۴ 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 فهم این موضوع، مثال یک اسباب‌بازی چرخ‌دار که با عبور از یک صاف‌افاق وارد قالیچه‌ای می‌شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب‌بازی به قالیچه، تندی آن کم می‌شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می‌کند (شکل ۱۴-۵).

شکل ۱۴-۳: برهم‌کنش‌های موج

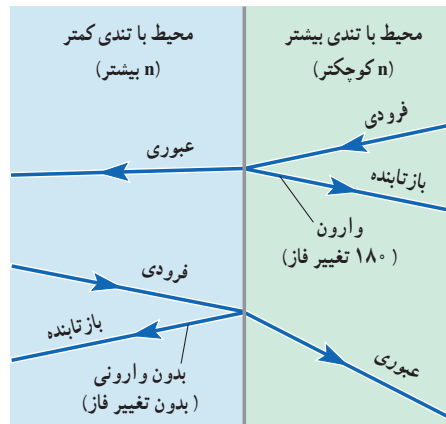
شکل ۱۴-۴: وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود، مسیر آن تغییر می‌کند و به قالیچه می‌رسد. زودتر که نسبت به قالیچه می‌رسد، زودتر که می‌رسد.

شکل ۱۴-۵: وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود، مسیر آن تغییر می‌کند و به قالیچه می‌رسد. زودتر که نسبت به قالیچه می‌رسد، زودتر که می‌رسد.

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 تب 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 حدی که بخش دوم مثلاً دیواره یا تکیه‌گاه صلبی باشد، تقریباً همه انرژی فرودی بازمی‌تابد. بنابراین در توضیح مورد دوم که تب از بخش ضخیم به بخش نازک وارد می‌شود، انرژی موج عبوری بیشتر است، ولی موج بازتابیده وارون نمی‌شود.



در مورد نور نیز وضعیت مشابهی رخ می‌دهد و شکل زیر بسیار آموزنده است.



در این فیلم ورود تپ از یک محیط کم چگال به محیطی چگال تر را می بینید.



در این فیلم ورود تپ از یک محیط پرچگال به محیطی کم چگال تر را می بینید.



فصل ۳۴: برهم کنش های موج

این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می رسد (شکل ۱۲-۴ الف)، بخشی از این تپ بازمی تابد و بخشی دیگر عبور می کند (شکل ۱۲-۴ ب). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط جنس ماده موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطه $v = \lambda f$ ، طول موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

پرسش ۱۲-۴

اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طاب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول موج عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می کند؟

در حالت های دو به سه پدیده با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج **شکست** پیدا کند. همان طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب به عمق آن بستگی دارد. از این ویژگی می توانیم برای تحقیق پدیده شکست در تانت موج استفاده کنیم؛ حتی با تغییر دادن عمق آب در بخشی از تانت می توان تندی موج سطحی در آن بخش را تغییر داد که این همان طور که دیدیم به تغییر جهت انتشار موج در آن بخش، و به عبارتی به شکست موج می انجامد. مشاهده می شود با ورود موج به بخش کم عمق، تندی موج سطحی کاهش می یابد. روشن است، آن بخش موج که زودتر به ناحیه کم عمق می رسد، چون با تندی کمتر حرکت می کند از فیه موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می افتد و بنابراین فاصله بین جبهه های موج و در نتیجه طول موج کاهش می یابد و به این ترتیب جبهه های موج مطابق شکل ۱۲-۴ در مرز دو ناحیه تغییر جهت می دهند. این مطلب را می توان در نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیب دار نیز مشاهده کرد که با رسیدن جبهه های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می شود، جهت انتشار جبهه های موج تغییر می کند. شاید برای فهم این موضوع، مثال یک اسباب بازی چرخ دار که با عبور از یک صاف اتاق وارد قالیچه ای می شود، زیرا چرخ که نخست به قالیچه می رسد، مناسب باشد. با ورود این اسباب بازی به قالیچه، تندی آن کم می شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می کند (شکل ۱۲-۴).

شکل ۱۲-۴ الف) طوری از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم عمق در تانت موج و ب) تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تانت موج

شکل ۱۲-۴ ب) وقتی اسباب بازی دارد قالیچه می رسد مسیر تغییر می کند؛ زیرا چرخ که نخست به قالیچه می رسد، زودتر کند می شود.

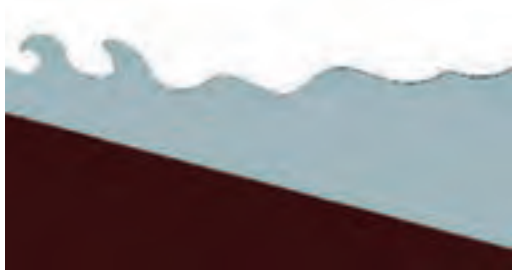
شکل ۱۲-۴ ب) وقتی اسباب بازی دارد قالیچه می رسد مسیر تغییر می کند؛ زیرا چرخ که نخست به قالیچه می رسد، زودتر کند می شود.

شکل ۱۲-۴ ب) وقتی اسباب بازی دارد قالیچه می رسد مسیر تغییر می کند؛ زیرا چرخ که نخست به قالیچه می رسد، زودتر کند می شود.

پاسخ پرسش ۱۲-۴

وقتی موج سینوسی از قسمت ضخیم طاب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد موج عبوری تغییری نمی کند، زیرا بسامد توسط چشمه موج تعیین می شود. اما تندی در قسمت نازک طاب بیشتر است و بنا به رابطه $\lambda = v/f$ در می یابیم طول موج موج عبوری بیشتر از طول موج موج فرودی می شود. (همچنین محض اطلاعات عمومی خوب است بدانید اینجا نیز موج بازتابیده داریم، ولی موج بازتابیده تغییر فاز نمی دهد.)

شاید محض اطلاعات عمومی خوب باشد در اینجا به شکن (kink) هم اشاره شود. وقتی ستیغ موج از آب عمیق وارد آب کم عمق می شود، سرعت آن قسمت از ستیغ که ابتدا عبور کرده است کم می شود و بقیه ستیغ موج عقب می ماند و این باعث ایجاد یک شکن در ستیغ موج می شود.



پاسخ تمرین ۲-۴

لازم به توضیح است که حل این مسئله ربطی به شکست موج ندارد و اگر جبهه‌های موج به‌طور موازی به مرز می‌تابند نیز مسئله به همین ترتیب حل می‌شود. 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، طول موج فرودی که مربوط به ناحیه عمیق است $\lambda_d = 10 \text{ cm}$ داده شده است. همچنین تندی امواج در ناحیه کم‌عمق $v_s = 0.4 \cdot v_d$ داده شده است. بنابراین داریم:

$$\frac{v_d}{10 \text{ cm}} = \frac{0.4 \cdot v_d}{\lambda_s}$$

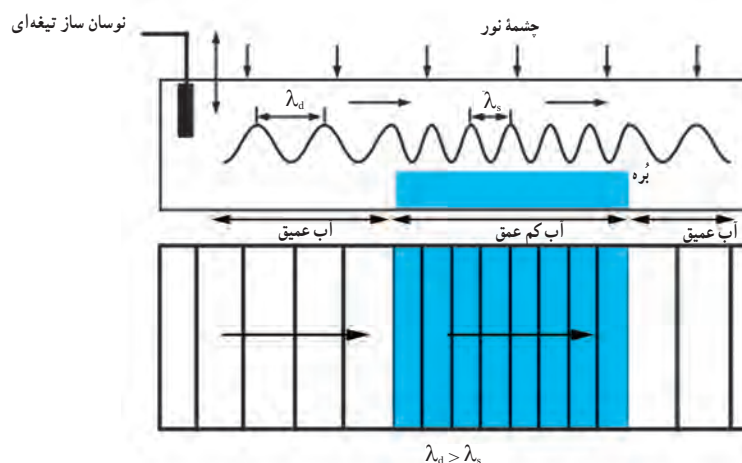
از آنجا $\lambda_s = 4 \text{ cm}$ به دست می‌آید که همان طور که انتظار داشتیم از λ_d کوچک‌تر است. در این تمرین برای محاسبه λ_s

نیازی به دانستن بسامد f نداشتیم، مگر آنکه در ادامه تمرین، پرسش دیگری نیز مطرح می‌شد و مثلاً تندی موج در ناحیه عمیق یا کم‌عمق پرسیده می‌شد. در آن صورت، به ترتیب برای تندی در ناحیه عمیق و کم‌عمق خواهیم داشت

$$v_d = (5^\circ \text{ s}^{-1}) (10 \text{ cm}) = 50 \text{ cm/s}$$

$$v_s = 0.4 \cdot v_d = 0.4 \cdot (50 \text{ cm/s}) = 20 \text{ cm/s}$$

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 ناحیه عمیق و کم‌عمق هستند و برای آنها شکستی رخ نمی‌دهد، ولی همچنان طول موج تغییر می‌کند.



فصل ۱۲-۴

در یک تشت موج به کمک یک نوسان‌ساز تیغه‌ای که با بسامد 50° Hz کار می‌کند، امواجی تخت ایجاد می‌کنیم. به طوری که فاصله بین دو برآمدگی متوالی آن برابر با 10 cm می‌شود. اگر اکنون برای شیشه‌ای را در تک تشت قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیه کم‌عمق 90° شکست پیدا می‌کنند. اگر تندی امواج در ناحیه کم‌عمق، 40° برابر تندی در ناحیه عمیق باشد، طول موج امواج در ناحیه کم‌عمق چقدر می‌شود؟

قانون شکست عمومی: در پدیده‌های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می‌پردازیم. فرض کنید مطابق شکل ۱۵-۳ جبهه‌های موج تختی به‌طور مایل به مرز در محیط می‌رسند و سپس شکست پیدا می‌کنند. از آنجا که جبهه‌های موج در مرز جدایی دو محیط می‌شکنند، این پرتوهای موج که همواره عمود بر جبهه‌های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می‌دهند. این پرتوها نیز در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که دیدیم در یک نمودار پرتویی، زاویه پرتوی فرودی با خط عمود بر مرز را زاویه تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند، در حالی که زاویه پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز را زاویه شکست می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند. در شکل ۱۵-۳، θ_i با θ_1 و θ_r با θ_2 نشان داده شده است. اگر تندی انتشار موج فرودی را v_1 و تندی انتشار موج شکسته یافته را v_2 بنامیم، بین تندی‌های v_1 و v_2 و زاویه‌های θ_i و θ_r رابطه زیر برقرار است که به آن قانون شکست عمومی می‌گویند.

(۱۵-۳) قانون شکست عمومی

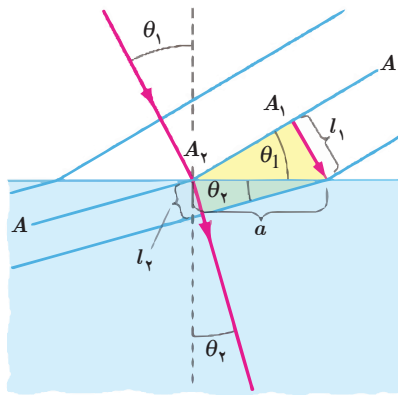
$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

شکل ۱۵-۳: جبهه موجی با زاویه تابش θ_i از محیط ۱ به محیط ۲ شکست پیدا می‌کند. زاویه شکست θ_r و تندی موج در محیط ۲ v_2 نسبت به محیط ۱ v_1 کمتر می‌شود. زاویه تابش θ_i و زاویه شکست θ_r و تندی موج در محیط ۲ v_2 نسبت به محیط ۱ v_1 کمتر می‌شود.

در شکل ۱۵-۳ 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، زاویه شکست بزرگتر از زاویه تابش می‌شود (شکل ۱۵-۴).

۱- شاخص پاشی ۲- مرز از کلاه آنگلی reflection به معنی شکست است.

اثبات رابطه ۱-۴ بسیار ساده است و دانش آموزان می توانند با دانشی که از درس هندسه خود آموخته اند به آسانی آن را درک کنند. خوب است برای دانش آموزان علاقه مند به عنوان یک دانستنی این اثبات مطرح شود. دانش آموزان از درس هندسه خود آموخته اند که اگر دو ضلع یک زاویه حاده (بسته) بر دو ضلع زاویه حاده ای دیگر عمود باشد، آن دو زاویه با هم برابرند. بنابراین زاویه های حاده نشان داده شده در مثلث های قائم الزاویه 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 مثلث های قائم الزاویه زرد و سبز داریم :



شکل ۲۵-۴ جبهه موجی با زاویه تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می شود و با زاویه θ_2 شکست پیدا می کند.

$$\sin \theta_1 = \frac{L_1}{a} = \frac{v_1 t}{a}, \quad \sin \theta_2 = \frac{L_2}{a} = \frac{v_2 t}{a}$$

از تقسیم این دو رابطه بر هم قانون شکست عمومی به دست می آید.

نمونه ۲-۴

در یک تست موج به کمک یک نوسان ساز نغدی که با بسامد 50 Hz کار می کند، امواجی تخت ایجاد می کنیم، به طوری که فاصله بین دو برآمدگی متوالی آن برابر با 10 cm می شود. اگر اکنون ژوادی شیشه ای را در کف تست قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیه کوهنی پلای ژو، شکست پیدا می کنند. اگر تندی امواج در ناحیه کوهنی، 0.40 برابر تندی در ناحیه عمیق باشد، طول موج امواج در ناحیه کوهنی چقدر می شود؟

قانون شکست عمومی : در پدیده های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می پردازیم. فرض کنید مطابق شکل ۱۵-۴، جبهه های موج تختی به طور مایل به مرز دو محیط می رسند و سپس شکست پیدا می کنند. از آنجا که جبهه های موج در مرز جدایی دو محیط می شکند، پرتوهای موج که همواره عمود بر جبهه های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می دهند. این پرتوهای تخت در شکل ۱۵-۴ نشان داده شده اند. همان طور که دیدیم در یک نمودار پرتویی، زاویه پرتوی فرودی با خط عمود بر مرز را زاویه تابش می نامند و با θ_1 نشان می دهند، در حالی که زاویه پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز را زاویه شکست می نامند و با θ_2 نشان می دهند. در شکل ۱۵-۴، با θ_1 و θ_2 و θ_1 و θ_2 با θ_1 و 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 تندی های v_1 و v_2 و زاویه های θ_1 و θ_2 رابطه زیر برقرار است که به آن قانون شکست عمومی می گویند.

(۱-۴) (قانون شکست عمومی)

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

شکل ۱۵-۴ جبهه موجی با زاویه تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می شود و با زاویه θ_2 شکست پیدا می کند (شکل با فرض $v_2 < v_1$ رسم شده است).

در شکل ۱۵-۴ 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، زاویه شکست بزرگتر از زاویه تابش می شود (شکل ۱۶-۴).

۱- تابعی این ۲ میزان کده انگلیسی refraction به معنی شکست است.

پاسخ تمرین ۳-۴

در اینجا فرض شده است رابطه $v_s = v_d \sin \theta_i$ همچنان برقرار است. بنابراین با استفاده از قانون شکست عمومی داریم:

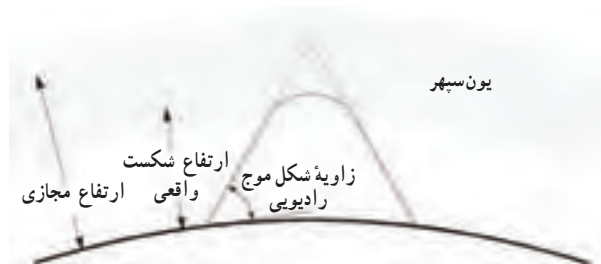
$$\frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} = \frac{v_s}{v_d} = \frac{0.40 v_d}{v_d} = 0.40$$

که در آن $\sin \theta_i = 3^\circ$ است. بنابراین داریم:

$$\sin \theta_r = (0.40)(\sin 3^\circ) = 0.20$$

و در نتیجه $\theta_r = 11.53^\circ \approx 12^\circ$ می شود.

در اینجا خوب است با نشان دادن تصاویری مانند شکل زیر تأکید کنید که آنچه در یون سپهر رخ می دهد یک بازتاب «تیز» نیست و توضیح این بازتاب مانند چیزی است که در پدیده سراب خواهید دید.



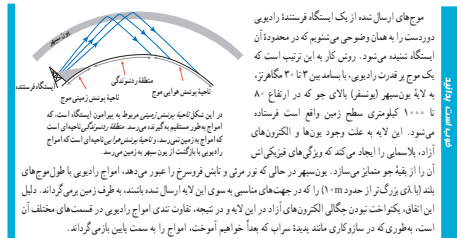
پاسخ پرسش ۲-۴

باید بر خط جدایی محیط ها، خطوط عمود بر سطح را رسم کنیم و بعد به تحلیل این پرسش بپردازیم. اگر توجه کنید درمی یابید در محیط b پرتو از خط عمود دور می شود. 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 خط عمود نزدیک می شود. 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، همان طور 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) می شود. پس ترتیب ضریب شکست های 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.

شکل ۳-۴: برهم‌کنش امواج موج

تمرین ۳-۴

در تمرین ۳-۴ با فرض اینکه زاویه تابش امواج برابر 30° باشد، زاویه شکست چقدر می شود؟
شکست امواج الکترومغناطیسی: امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور مرئی) نیز با گذر از یک محیط به محیط دیگر که در آن تندی آنها متفاوت می شود، شکست پیدا می کنند. به جز گستره نور مرئی که بیشترین و معروفترین موارد شکست برای آنها مطرح می شود و به پدیده ها و کاربردهای جالبی می انجامد، شکست امواج رادیویی نیز اهمیتی کاربردی در ارتباطات رادیویی دارد.



پرسش ۲-۴

شکل رویه یک پرتوی موج الکترومغناطیسی را نشان می دهد که با عبور از محیط اولیه a ، از طریق محیط های b و c به محیط d بازمی گردد. این محیط ها را بر حسب تندی موج در آنها از بیشترین تا کمترین مرتب کنید.

وقتی یک پرتوی نور از محیطی شفاف وارد محیطی شفاف دیگری شود، بخشی از نور بازمی تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم می شود. همان طور که انتظار داریم آن بخش نور که وارد محیط دوم می شود، به دلیل آنکه تندی آن در محیط دوم تغییر می کند، شکسته می شود (شکل ۳-۴). به همین دلیل برای هر محیط ضریب شکست تعریف می کنند که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است:

$$n = \frac{c}{v} \quad (۳-۴) \quad \text{(تعریف ضریب شکست)}$$

شکل ۳-۴: امواج الکترومغناطیسی در محیط های مختلف

از نور بازمی تابد و بخشی می شکند

۹۷

فیلم

فیلم

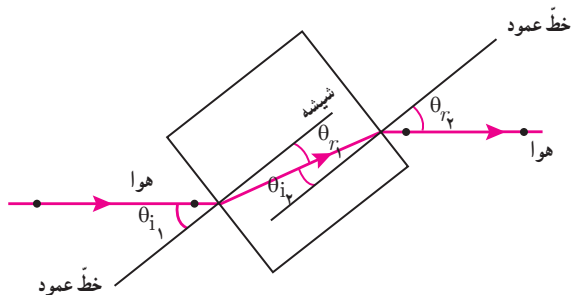
[illegible]

فیلم

فیلم

[illegible]

را به دست آوریم و یا اینکه ضریب شکست را با استفاده از قانون اسنل برای خروج باریکه از تیغه به هوا بیاییم. بدیهی است که این دو مقدار نباید تفاوت چندانی داشته باشند. در هر 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.



الف) تصویری از اسباب آزمایش اندازه گیری ضریب شکست
 ب) در نمودار پرتویی آزمایش توجه کنید $\theta_i = \theta_r$ و $\theta_i = \theta_t$ است. بنابراین پرتوهای فرودی و خروجی باهم موازی اند

فصل ۱۴: برهم کنش های موج

توضیح ۲-۱-۲
 کدام یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می دهد، که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

شکل ۱۴-۱: سه شکل مختلف از شکست نور. (الف) نور از محیطی با ضریب شکست کمتر به محیطی با ضریب شکست بیشتر می خورد و زاویه تابش θ_i بزرگتر از زاویه تنید θ_t است. (ب) نور از محیطی با ضریب شکست کمتر به محیطی با ضریب شکست بیشتر می خورد و زاویه تابش θ_i کوچکتر از زاویه تنید θ_t است. (ج) نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به محیطی با ضریب شکست کمتر می خورد و زاویه تابش θ_i کوچکتر از زاویه تنید θ_t است.

توضیح ۲-۱-۳
 اندازه گیری ضریب شکست: با توجه به مثال ۲-۱-۲، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک نطفه نوزایی سطح شفاف را اندازه گرفت.

سراب: در روزهای گرم ممکن است وکه آبی را در دوردست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد، اما وقتی به آن محل می رسید، آنجا را خشک می یابید. به این پدیده **سراب** یا **سراب آبیگر** می گویند و علتها می توان آن را دید، بلکه می توان از آن عکس هر گرفت (شکل ۱۴-۲).

در روزهای گرم هر سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، جگالی هوا با افزایش دما کاهش می یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می شود (شکل ۱۴-۳). در شکل ۱۴-۳ پدیده سراب را می بینید و جبهه های موج نشان داده ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه های موجی را در نظر می گیریم که به طرف پایین می آیند. با پایین آمدن هر چه بیشتر پرتوهای نظیر این جبهه های موج، آنها با ضریب شکستهای کوچکتر و کوچکتری روبرو می شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می شوند (شکل ۱۴-۳ الف).

وقتی پرتوها در نزدیکی سطح زمین تقریباً افقی می شوند به سمت بالا خم می دارند. این خم شدن رو به بالا را می توان با استفاده از جبهه های موج توضیح داد. بخش پیش هر جبهه موج در هوای کمی گرم تر قرار دارد و بنابراین کمی بیشتر از بخش بالایی جبهه موج حرکت می کند. این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه های موج، موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می شود. زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه های موج باشند (شکل ۱۴-۳ ب). وقتی پرتوها رو به بالا می روند به خشن شدن رو به بالای خود ادامه می دهند، زیرا اکنون تمام با محیطهایی با ضریب شکستهای بزرگ و بزرگتر مواجه می شوند و بنابراین در هر مرحله با نزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می شوند (شکل ۱۴-۳ ب). اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می آید که منشأ این نور از امتداد رو به عقب پرتوهای است که به چشم ما رسیده اند و همانطور که در شکل ۱۴-۳ نشان داده شده است این حس را ایجاد می کند که گویی از سطح زمین آمده است.

شکل ۱۴-۲: نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

شکل ۱۴-۳: الف) تغییرات ضریب شکست هوا با دما. ب) سراب. ج) سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۱: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۲: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۳: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۱۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۱: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۲: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۳: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۲۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۱: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۲: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۳: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۳۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۱: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۲: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۳: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۴۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۱: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۲: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۳: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۵۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۱: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۲: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۳: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۶۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۱: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۲: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۳: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۷۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۱: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۲: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۳: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۸۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹۱: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹۲: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹۳: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹۴: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹۵: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹۶: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹۷: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

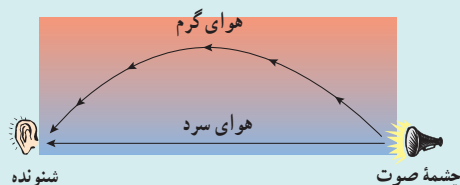
شکل ۱۴-۹۸: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

شکل ۱۴-۹۹: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

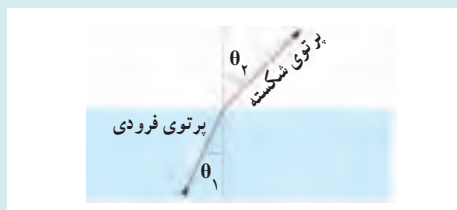
شکل ۱۴-۱۰۰: سراب و سطح گرم جاده. تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده.

یکی از خطاهای بسیار رایج این است که پدیده سراب را مبتنی بر پدیده بازتاب داخلی کلی توضیح می دهند. تأکید شود که این یک خطای رایج است و اگر قانون اسنل را برای حضیض خمیدگی بنویسید به سادگی نادرستی این استدلال را درمی یابید، 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 دانش آموزان را به پدیده سراب صوتی نیز ارجاع دهید و نیز اکنون دانش آموزان «خوب است بدانید» مربوط به ارسال امواج رادیویی را می توانند درک کنند.

شکست امواج صوتی



شکل ۱- 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 ۲- در صورتی که موج از محیطی با تندی بیشتر برود، زاویه شکست θ_2 بزرگ‌تر از زاویه تابش θ_1 می‌شود.

شکست برای امواج صوتی نیز می‌تواند رخ دهد ولی اهمیت آن به اندازه 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 پدیده 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 طبیعی صوت معمولاً در صبح‌های خیلی زود، پیش از طلوع آفتاب بر فراز دریاچه‌های سرد و یا هرگاه وارونگی هوا رخ دهد، بروز پیدا می‌کنند. یک توضیح این پدیده با استفاده از رابطه ۴-۱ است که برای شکست امواج به دست آوردیم. اگر در شکل ۴-۱۶ 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، زاویه شکست بزرگ‌تر از زاویه 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 زاویه پرتوی صوت با خط عمود، با افزایش ارتفاع، بیشتر و بیشتر می‌شود. وقتی صوت رو به پایین می‌آید، چون از هوای گرم‌تر به هوای سردتر رفته است، تندی آن کاهش می‌یابد و بدین ترتیب زاویه پرتوی صوت با خط عمود، با کاهش ارتفاع، کمتر و کمتر می‌شود. بنابراین صوت گسیل شده از چشمه صوت، افزون بر مسیر مستقیم، از مسیر خمیده نیز به شنونده می‌رسد. البته روش پرتویی به سادگی نمی‌تواند دلیل خم شدن مسیر پرتو از نقطه 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 جبهه 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 ۳- چگونگی خم شدن جبهه های موج صوتی، وقتی هوای سطح زمین سردتر از هوای بالای آن است.

دانستنی برای معلم

شنیدن صدای زیردریایی های دشمن

در طول جنگ سرد، کشور آمریکا، زیردریایی های کشور شوروی را با شبکه ای از آنتن های صوتی در زیرآب دیدبانی می کرد، به طوری که حتی می توانست صدای ملخ پرسروصدای یک زیردریایی را از فاصله ای ۱۰۰۰ کیلومتری، در عرض های جغرافیایی میانی بشنود. در واقع صداهایی که از این زیردریایی ها گسیل می شد، در چیزی موسوم به کانال صوتی عمیق (DSC) گیر می افتاد و به طور طولی به سمت آنتن های صوتی حرکت می کرد. 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 می یابد. اما با بیشتر رفتن در عمق آب سرانجام تأثیر عمق غالب می شود و از آن به بعد، تندی صوت افزایش پیدا می کند. بنابراین گستره ای از عمق وجود دارد که در آن تندی صوت کمینه است. اگر صوت در این گستره حرکت کند و بخواهد به درون منطقه ای با تندی بیشتر برود، بر اثر تغییر تندی، مانند آنچه در شکل ۳ دانستنی قبل دیدیم به طرف ناحیه ای با تندی کمتر شکست پیدا می کند و بنابراین در حرکتی رفت و برگشتی در این کانال صوتی گیر می افتد و به جلو، به سمت آنتن های گیرنده، پیش می رود. از این سازوکار برای ارسال کم اتلاف امواج صوتی در اقیانوس ها نیز استفاده می شود.



خوب است در پایان بحث به عنوان اطلاعات عمومی توضیحی در مورد زاویه حد به دانش آموزان ارائه شود و آنها را به دانستنی مربوط به آن نیز ارجاع دهید.

پاسخ تمرین ۴-۴

قانون اسنل را به طور مجزا برای دو پرتوی قرمز و آبی می نویسیم.

برای پرتوی قرمز داریم:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{قرمز}$$

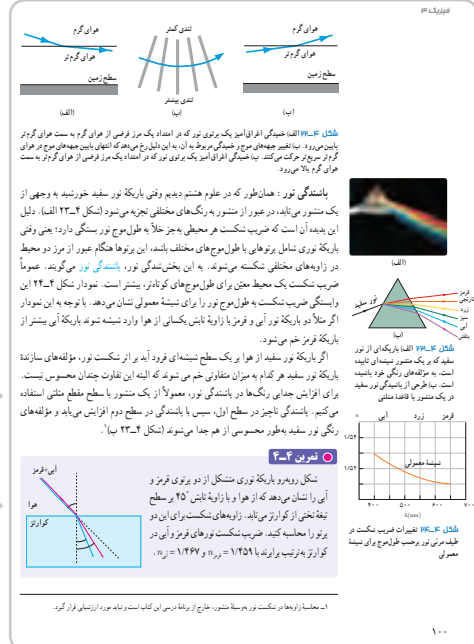
و از آنجا

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = \frac{1/000}{1/459} \sin 45^\circ$$

که به $\theta_2 = 28/9^\circ$ قرمز می انجامد و برای پرتوی آبی داریم:

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 = \frac{1/000}{1/467} \sin 45^\circ$$

که به $\theta_2 = 28/8^\circ$ قرمز می انجامد. (در حل این تمرین، زاویه تابش دقیقاً 45° در نظر گرفته شد، چرا که در غیر این صورت هر دو پاسخ به 29° می انجامید و تفاوت فیزیکی این دو حالت دیده نمی شد.) اختلاف ناچیز همین دو زاویه است که به پاشندگی نور انجامیده است.



در این فیلم چگونگی طرز کار یک تار نوری را می بینید.



فیلم

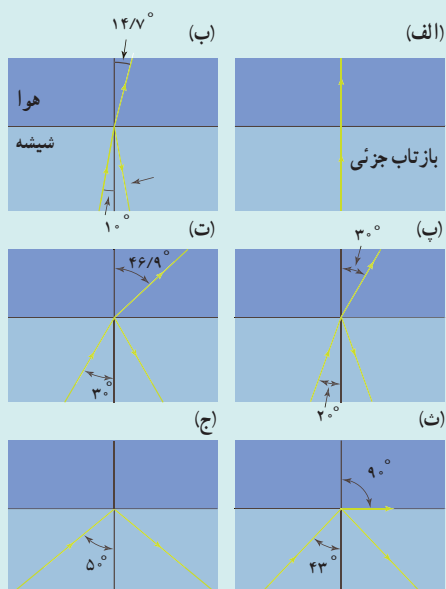
بازتاب داخلی کلی

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 بازمی تابد و بقیه نور طوری شکست می یابد که از خط عمود دور می شود. اگر زاویه تابش را بزرگ تر و بزرگ تر کنیم، زاویه شکست نیز بزرگ تر و بزرگ تر می شود (شکل های ۱ الف تا ت) تا اینکه به 90° برسد (شکل ۱ ث). از این پس برای هر زاویه تابش بزرگ تری پرتوی شکسته ای وجود نخواهد داشت و همه نور فرودی، بازتابیده می شود (شکل ۱ ج). به این پدیده بازتاب داخلی کلی می گویند. زاویه های شکست در شکل ۱ براساس قانون اسنل تعیین شده اند و به زاویه تابشی که به ازای آن، زاویه شکست برابر 90° می شود (اصطلاحاً زاویه حد می گویند و آن را با θ_C نشان می دهند). اکنون به ازای $\theta_2 = 90^\circ$ و $\theta_1 = \theta_C$ ، با استفاده از قانون اسنل خواهیم داشت

$$n_1 \sin \theta_C = n_2 \sin 90^\circ$$

و از آنجا زاویه حد θ_C را می توانیم با استفاده از رابطه زیر به دست آوریم

$$\sin \theta_C = \frac{n_2}{n_1}$$

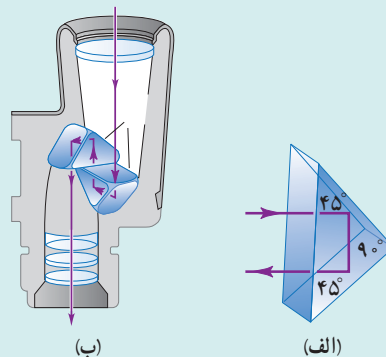


شکل ۱ — پرتوی نوری با عبور از شیشه به سطح مشترک شیشه — هوا با زاویه های تابش مختلف برخورد می کند. با بزرگ تر شدن زاویه تابش، زاویه شکست نیز بزرگ می شود تا اینکه به ازای زاویه حد، به 90° می رسد. از آن پس، همه نور فرودی بازمی تابد.

افزون بر تارای نوری، بازتاب داخلی کلی کاربردهای دیگری نیز دارد که در اینجا به آنها می پردازیم.

بازتاباننده‌ها و دوربین‌های دوچشمی

این واقعیت که زاویه حد برای سطح شیشه - هوا با استفاده از رابطه $\sin \theta_c = \frac{1}{1.52} = 0.658^\circ$ برای $\theta_c = 41.8^\circ$ به دست می‌آید، استفاده از منشوری مثلثی با زاویه‌های 45° ، 45° و 90° را به عنوان یک سطح بازتاباننده کامل برای پرتویی که مطابق شکل ۲ الف به وجوه 45° ی آن تابیده، امکان‌پذیر می‌کند. به عبارتی، زاویه تابش در این وجوه 45° و بزرگ‌تر از زاویه حد است و بنابراین در این وجوه بازتاب کلی رخ می‌دهد. یک منشور بازتاباننده کامل این مزیت را بر آینه‌های معمولی دارد که برخلاف آنها 100% نور تابیده به خود را باز می‌تاباند، ضمن اینکه خاصیت بازتابانندگی آن تحت تأثیر کدر شدن سطوح آن قرار نمی‌گیرد. به چنین منشوری، منشور پورِو^۱ می‌گویند و معمولاً از ترکیب دوتای آنها در دوربین‌های دوچشمی استفاده می‌شود (شکل ۲ ب).



شکل ۲- (الف) بازتاب داخلی کلی در یک منشور پورِو (ب) دوربین‌های دوچشمی از دو منشور پورِو 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: ۱- 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 مشاهده رنگین‌کمان بیشتر است. ۲- برخی از نور تابیده بازتابش پیدا می‌کند. این مانند حالتی است که تصویر خود را در یک شیشه پنجره شفاف می‌بینید. شیشه هم بخشی از نور را عبور می‌دهد و هم بخشی از آن را باز می‌تاباند. ۳- بقیه نور شکست پیدا می‌کند. چون ضریب شکست آب بیشتر از هواست، نور به سمت خط عمود شکست پیدا می‌کند. ۴- 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. ۵- نور شکسته‌یافته با سطح عقبی قطره برخورد می‌کند و اگر زاویه تابش آن بزرگ‌تر از زاویه 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. ۶- نور در هنگام خروج از قطره 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. ۷- 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

بازتاب رخ می دهد که آنها رنگین کمان دیگری موسوم به رنگین کمان ثانویه را می سازند که عریض تر و کم نورتر، و بنابراین مشاهده آن دشوارتر است. ترتیب رنگ ها در رنگین کمان ثانویه برعکس ترتیب رنگ ها در رنگین کمان اولیه است (شکل ۴).



شکل ۳- تشکیل رنگین کمان شامل چندین مرحله است که در اینجا برای دو قطره باران نشان داده شده است.



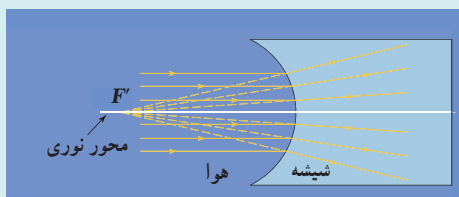
شکل ۴- مقایسه رنگین کمان اولیه و ثانویه

شکست امواج نوری در مرز کروی

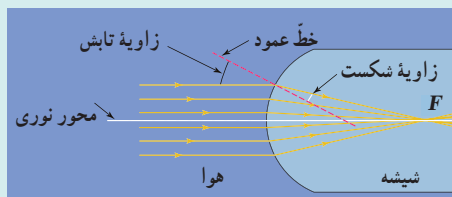
شکست نور در مرزهای کروی اهمیت فراوانی در فیزیک دارد و اساس کار بسیاری از ابزارهای نوری از جمله میکروسکوپ، دوربین‌های نجومی و حتی چشم ما مبتنی بر چنین شکستی است. شکست نور در سطحی کروی از همان قوانین شکست در یک سطح تخت پیروی می‌کند. یعنی پرتوهای تابش و شکست در دو طرف خط عمود بر سطح جدایی دو محیط در نقطه 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 – 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 (نقطه F) می‌گردد. ولی اگر این پرتوها مانند شکل ۲ از هوا وارد مرز کاو هوا – شیشه شوند، پرتوهای شکست یافته 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، مشخصه 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 شکست‌دهنده 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، فاصله کانون از عدسی که به آن فاصله 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 فاصله کانونی است:

$$\frac{1}{f} = \text{توان عدسی}$$

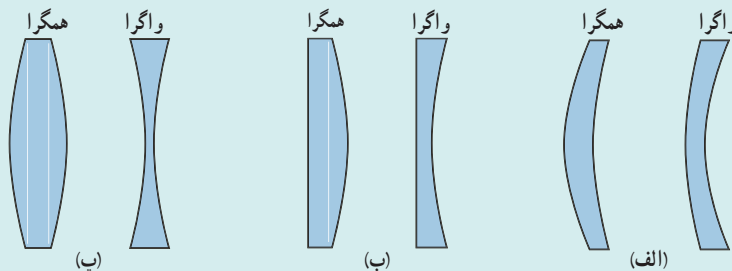
که یکای آن $1/m$ است و آن را دیوپتر می‌نامند و با D نشان می‌دهند. بنابراین هرچه توان یک عدسی همگرا بیشتر باشد، توان آن برای کانونی کردن پرتوهای موازی بیشتر و فاصله کانونی آن کوتاه‌تر است. رابطه بالا و آنچه در مورد توان و مقایسه دو عدسی همگرا گفتیم در مورد عدسی‌های واگرا نیز برقرار است، یعنی هرچه توان یک عدسی واگرا بیشتر باشد، توانایی این عدسی برای واگرا کردن پرتوهای موازی بیشتر و فاصله کانونی آن کوتاه‌تر است، یعنی کانون F' آن به عدسی نزدیک‌تر است.



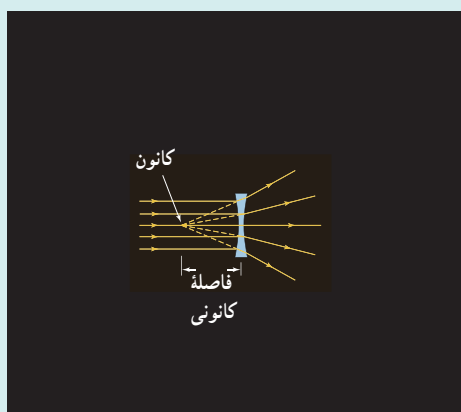
شکل ۲- شکست پرتوهای نور در مرز کاو هوا – شیشه. توجه کنید که پرتوهای فرودی موازی محور نوری و نزدیک به آن هستند و طوری شکست یافته‌اند که گویی از کانون F' ناشی شده‌اند.



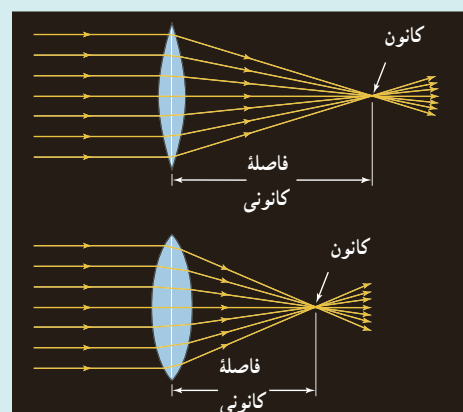
شکل ۱- شکست پرتوهای نور در مرز کوژ هوا – شیشه. توجه کنید که پرتوهای فرودی موازی محور نوری و نزدیک به آن هستند و در کانون F متمرکز می‌شوند.



شکل ۳- مثال هایی از چند نوع عدسی : (الف) کوژ- کوژ چپ، کاو - کاو راست ؛ (ب) تخت - کوژ چپ، تخت - کاو راست؛ (پ) هلالی - کوژ چپ، هلالی - کاو راست.



شکل ۵- چگونگی شکست نور در عدسی کاو - کاو که نمونه رایج عدسی های واگرا است.



شکل ۴- مقایسه توان دو عدسی همگرا با سطوح خمیدگی متفاوت. توان عدسی خمیده تر در کانونی کردن پرتوها، بیشتر و در نتیجه فاصله کانونی آن کوتاه تر است.

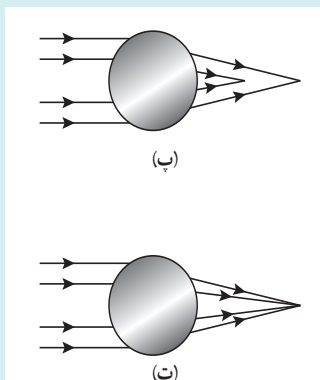
نمره عینک را معمولاً با یک علامت مثبت یا منفی در کنار یک عدد مشخص می کنند. علامت مثبت در کنار عدد به معنی دوربینی، و علامت منفی در کنار عدد به معنی نزدیک بینی است و عددها همان توان عدسی اصلاح کننده بینایی شخص است که همان طور که دیدیم با یکای دیوپتر مشخص می شود. هر چه عدد نمره عینک بیشتر باشد به معنی آن است که چشم شما ضعیف تر است و باید از عدسی تصحیح کننده با توان بیشتری استفاده کنید. عدسی تصحیح کننده دوربینی، همگرا و عدسی تصحیح کننده نزدیک بینی، واگرا است. مثلاً اگر با مراجعه به چشم پزشک دریافته اید که نمره عینک تصحیح کننده بینایی چشم شما $-4/25D$ است، به این معنی است که با توجه به منفی بودن نمره عینک، بیماری چشم شما نزدیک بینی است و بنابراین باید از یک عدسی واگرا برای تصحیح آن استفاده کنید. فاصله کانونی این عدسی از رابطه زیر به دست می آید :

$$f = \frac{1}{\text{توان عدسی}} = \frac{1}{4/25D} = 0.25m = 25cm$$

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، به طوری که تصویر واضحی بر روی شبکیه تشکیل می‌شود. حدود $\frac{2}{3}$ از این خم شدن در سطح خمیده قرنیه رخ می‌دهد، بقیه آن به هنگام عبور پرتوها از عدسی چشم که در پشت قرنیه قرار دارد (شکل ب). وقتی شما داخل آب می‌روید همه قدرت کانونی‌سازی توسط قرنیه از دست می‌رود، زیرا ضریب شکست ماده سازنده قرنیه $1/376$ و ضریب شکست آب حدود $1/333$ 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 نزدیک بین 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 شیشه ماسک و چشم موجب می‌شود خمیدگی پرتوهای نور در سطح قرنیه عادی گردد.

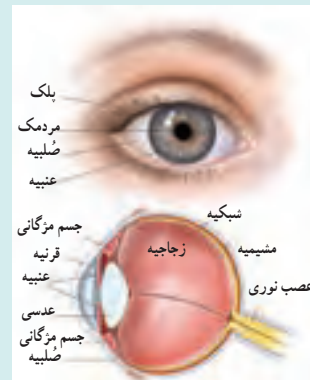
اما در مورد ماهی، چون در درون آب زیست می‌کند عدسی چشم آن به شکل کروی است تا بتواند پرتوها را به دقت بشکند و تصویری در شبکیه ایجاد کند. ولی یک عدسی کروی تمام پرتوهای موازی تابیده به خود را در یک نقطه کانونی نمی‌کند و پرتوها در گستره وسیعی کانونی می‌شوند (شکل پ) و بنابراین قاعداً نباید تصویر واضحی تشکیل 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 واریسی چشم یک ماهی تازه یا پخته شده دریابید: بافت چشم ماهی در نزدیکی محور مرکزی سخت‌تر است. همین امر سبب می‌شود پرتوهای موازی در نقطه واحدی کانونی شوند (شکل ت) و ماهی تصویر واضحی ببیند.



(پ) طرحی از کانونی‌سازی پرتوهای نور توسط یک عدسی کروی با ضریب شکست یکنواخت
(ت) طرحی از کانونی‌سازی پرتوهای نور توسط عدسی چشم ماهی



(ب) بیشتر خم شدن پرتوها در سطح قرنیه رخ می‌دهد.



(الف) اجزای مختلف چشم

پرسش پیشنهادی

شکل الف مکان واقعی دو سوزن را نشان می دهد که شما آنها را از بالای قطعه ای شیشه ای مشاهده می کنید. کدام یک از گزینه های شکل ب مکان ظاهری سوزن ها را نشان می دهند؟

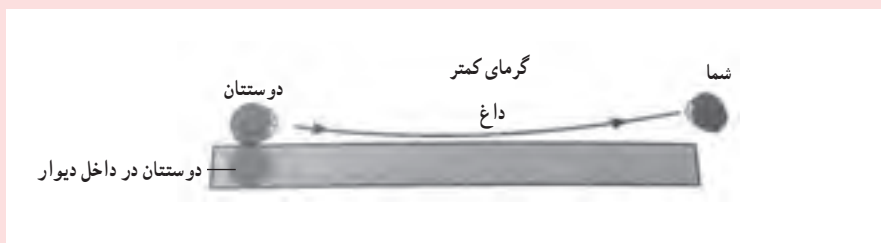
پاسخ : A

شکل الف مکان واقعی دو سوزن را نشان می دهد که شما آنها را از بالای قطعه ای شیشه ای مشاهده می کنید. کدام یک از گزینه های شکل ب مکان ظاهری سوزن ها را نشان می دهند؟

پاسخ : A

فعالیت های پیشنهادی

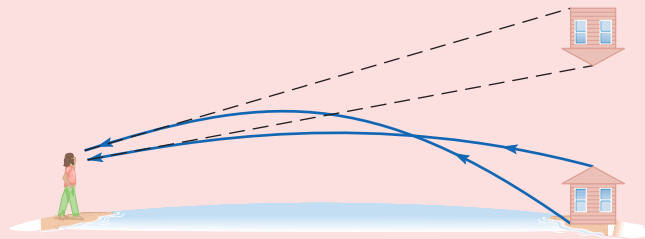
۱ سرتان را مماس بر دیواری طویل که رو به خورشید است قرار دهید، طوری که چشم هایتان نزدیک به سطح دیوار باشد. حال اگر به دوستان نگاه کنید که در سر دیگر این دیوار ایستاده است، تصویری آینه ای از دوست خود را در دیوار می بینید که به نظر می رسد در نقاطی به دوستان وصل شده است. به این، سراب دیوار می گویند.



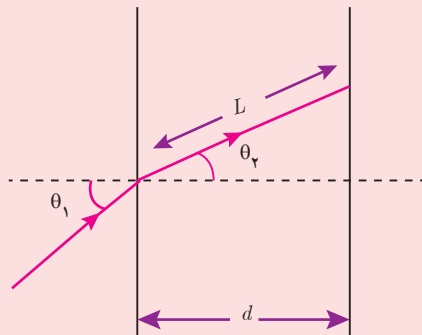
۲ در نواحی بسیار سرد معمولاً سراب دیگری موسوم به سراب فوقانی رخ می دهد که ناشی از سردتر بودن لایه هوای نزدیک سطح زمین نسبت به هوای بالاتر آن است و بنابراین بر اثر تغییر تدریجی دما و در نتیجه ضریب شکست، سراب به جای سطح زمین بر روی هوا تشکیل می شود و تصویر وارونه ای از جسم مورد نظر در هوا دیده می شود. مثلاً شکل زیر، سرابی فوقانی از یک خانه در ناحیه ای از قطب شمال را نشان می دهد. بارسم نموداری پرتویی دلیل امر را نشان دهید.



پاسخ:



تمرین‌های پیشنهادی



۱ نور تحت زاویه $\theta = 38/5^\circ$ بر تیغه‌ای با ضریب شکست $n = 1/5^\circ$ و ضخامت $d = 5/9^\circ \text{ cm}$ تابیده است. مسافت L ی که نور در تیغه پیموده، چقدر است؟

پاسخ: از مثلث شکل درمی‌یابیم

$$\cos \theta_2 = \frac{d}{L}$$

زاویه θ_2 را از قانون اسنل می‌یابیم

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

در نتیجه

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} = \frac{\sin 38/5^\circ}{1/5^\circ} = 0/415$$

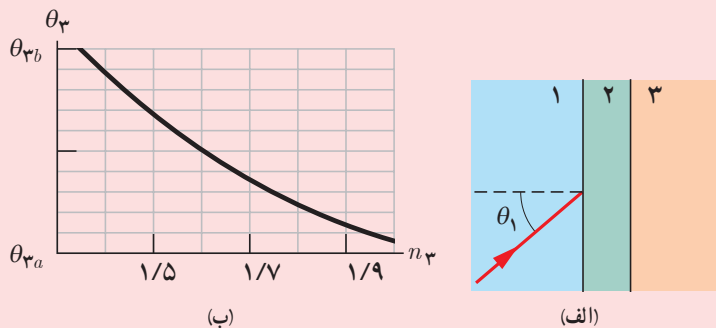
و بنابراین $\cos\theta_r$ چنین می شود :

$$\cos\theta_r = \sqrt{1 - \sin^2\theta_r} = 0.91^\circ$$

(که حدوداً مربوط به زاویه $24/5^\circ$ است). بنابراین برای L خواهیم داشت :

$$L = \frac{d}{\cos\theta_r} = \frac{5/9^\circ \text{ cm}}{0.91^\circ} = 6/485 \text{ cm} \approx 6/48 \text{ cm}$$

۲ یک باریکه نور مطابق شکل الف تحت زاویه $\theta_1 = 4^\circ$ بر یک مرز تابیده است. دو مرز بین سه لایه، موازی و جنس لایه های ۱ و ۳ یکسان است. شکل ب زاویه شکست θ_r در لایه سوم را در حالت کلی برحسب n_r نشان می دهد (به عبارتی این نمودار نشان می دهد بسته به اینکه جنس محیط سوم چه باشد، زاویه شکست چگونه است). اکنون دو وضعیت را در نظر بگیرید. الف) نخست فرض کنید جنس لایه های اول و سوم یکسان است. در این صورت ضریب شکست ماده ۱ چقدر است؟ ب) اکنون فرض کنید جنس ماده سوم با ماده اول متفاوت و ضریب شکست ماده ۳ برابر $2/4$ باشد. در صورتی که $\theta_1 = 7^\circ$ باشد، θ_r چقدر خواهد بود؟



پاسخ: از قانون اسنل داریم :

$$n_1 \sin\theta_1 = n_r \sin\theta_r = n_3 \sin\theta_r$$

الف) چون جنس لایه های ۱ و ۳ یکسان است، $\theta_1 = \theta_r$ می شود و بنابراین $\theta_r = 4^\circ$ است. از روی منحنی (ب) درمی یابیم $\theta_r = 4^\circ$ حدوداً مربوط به $n_r = 1/6$ است که همان n_1 نیز هست.

ب) اکنون $\theta_1 \neq \theta_r$. پس داریم :

$$n_1 \sin\theta_1 = n_r \sin\theta_r$$

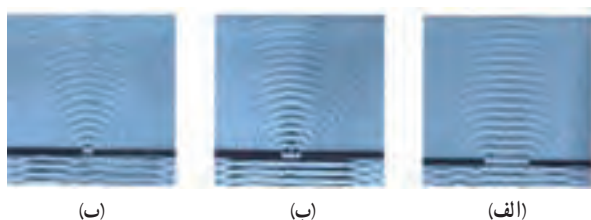
که به ازای $n_1 = 1/6$ ، $\theta_1 = 7^\circ$ ، و $n_r = 2/4$ به $\theta_r = 39^\circ$ می انجامد.

شکل ۱. شماتیک سیستم پیشنهادی

۱- سنسور، ۲- دوربین، ۳- کنترلر، ۴- کامپیوتر، ۵- مانیتور، ۶- شبکه، ۷- پایگاه داده

اگر در مسیر یثیروی یک موج مائعی 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 لب‌های مانع یا شکاف‌های موجود در آن، می‌گذرد. در صورتی که ابعاد مانع یا شکاف در حدود طول موج باشند، بخشی از موج که از لب‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، به‌وضوح به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.

برای توضیح بهتر شکل ۴-۲۶، خوب است در شکل هایی متوالی مانند شکل زیر، کوچک و کوچک تر شدن عرض شکاف و تأثیر آن بر شکل موج فرودی را نشان دهیم. اگر با شکاف هایی با اندازه های مختلف در تست موج آزمایش را انجام دهیم درمی یابیم هر قدر اندازه شکاف کمتر باشد، پراش بیشتر نمایان می شود و موج های تخت به شکل امواجی نیم دایره ای، گسترده تر می شوند. در شکل الف که اندازه شکاف در مقایسه با طول موج بزرگ تر است، امواج عبوری همچنان تخت هستند، اما در شکل های ب و پ با کوچک تر شدن شکاف ها، امواجی نیم دایره ای به وجود آمده اند، به طوری که در شکل پ گویی امواج از چشمه ای نقطه ای در محل شکاف منشأ گرفته اند.



شکل ۴-۲۵: وضعیت طرح واری را نشان می دهد که در آن موجی تخت با طول موج λ به مانی می رسد که شکافی به پهنای a دارد. در شکل ۴-۲۵الف، پهنای شکاف خیلی بزرگ تر از طول موج λ است ($a \gg \lambda$). همان طور که دیده می شود قسمتی از موج که از شکاف می گردد تقریباً تخت باقی می ماند. در شکل ۴-۲۵ب، پهنای شکاف کمتر شده است ($a \approx \lambda$) و همان طور که می بیند قسمتی از موج که از شکاف می گردد از حالت موج تخت خارج شده و نسبت به حالت قبل، مقدار بیشتری به اطراف گسترده شده است. در شکل ۴-۲۵ج، که پهنای شکاف، $a \approx \lambda/2$ شده است، قسمتی از موج که از شکاف می گردد کاملاً از حالت موج تخت خارج و به اطراف شکاف گسترده شده است. به این پدیده که موج در عبور از یک شکاف با پهنای از مرتبه طول موج، به اطراف گسترده می شود، پراش می گویند. پراش فقط به وضعیت عبور موج از یک شکاف باریک (یا روزنه) محدود نمی شود، بلکه هنگام عبور موج از لبه های مانعی که ابعاد آن در حدود طول موج باشند نیز رخ می دهد. پراش برای همه انواع موج اتفاق می افتد. برای مثال شکل ۴-۲۶، پراش امواج تخت را روی سطح آب در یک تست موج، هنگام عبور امواج از یک شکاف باریک نشان می دهد.

الته پراش در واقع چیزی فراتر از صرفاً یک گسترده گی بیشتر موج است و مثلاً اگر پراش نوری تکدام از یک شکاف باریک یا لبه ای نیز را روی یک پرده ملاحظه کنیم، هوازه نوارهای تاریک و روشنی موسوم به **نقش پراش** را موازی با لبه های شکاف مشاهده می کنیم. شکل ۴-۲۷، نقش پراش نوری تکدام از لبه های نیز درون و بیرون یک تیغ را نشان می دهد. تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث تداخل امواج است. تداخل امواج را در بخش بعد می آموزیم.



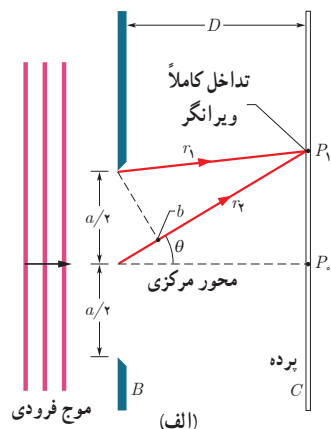
شکل ۴-۲۵: برای شکل ۴-۲۵الف، پهنای شکاف خیلی بزرگ تر از طول موج λ است. در شکل ۴-۲۵ب، پهنای شکاف کمتر شده است ($a \approx \lambda$) و همان طور که می بیند قسمتی از موج که از شکاف می گردد کاملاً از حالت موج تخت خارج و به اطراف شکاف گسترده شده است. در شکل ۴-۲۵ج، که پهنای شکاف، $a \approx \lambda/2$ شده است، قسمتی از موج که از شکاف می گردد کاملاً از حالت موج تخت خارج و به اطراف شکاف گسترده شده است.

تجربۀ ۴-۴: در تئوریون های متداول، سیگنال ها از آنتن های روی دیگ ها به گره های تئوریون فرستاده می شود. حتی وقتی گره به دلیل وجود یک تپه یا ساختمان در معرض ارسال مستقیم امواج یک آنتن نباشد، همچنان سیگنال را به دلیل پراش امواج از لبه های مانع دریافت خواهد کرد (اگر سیگنال در اطراف آن مانع به حد کافی به داخل ناحیه سایه مانع واصله شود). سابق بر این، طول موج سیگنال های تئوریون در حدود ۵۰ cm بود، ولی طول موج سیگنال های تئوریون دیجیتال که امروزه از آنتن ها فرستاده می شود بسیار کمتر است. آیا این تغییر طول موج، پراش سیگنال ها به داخل ناحیه سایه را افزایش می دهد یا کاهش؟

۱۰۲

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 ۴-۴ آمده است دانشی کافی برای این تحلیل را ارائه نمی کند. در واقع کتاب های مبتنی بر حسابان، نخست به تداخل و سپس به پراش می پردازند تا دانش ریاضی لازم برای تحلیل این مبحث را داشته باشند.

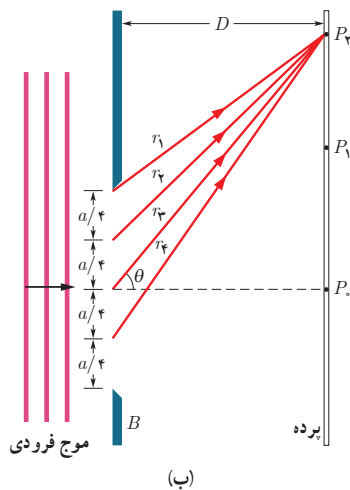


همان طور که در «دانشنی برای معلم» بخش تداخل خواهید دید، در تداخل دوشکافی، شرط تداخل کاملاً ویرانگر آن است که $a \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda$ باشد که در آن a فاصله دو شکاف است. برای تحلیل نقش پراش از روشی مشابه و البته هوشمندانه استفاده می کنیم. در این روش تمام پرتوهای عبوری از شکاف را به صورت جفت - جفت در نظر می گیریم و سپس شرط تداخل ویرانگر را به کار می بندیم.

این روش را در شکل الف برای تعیین مکان نخستین فریز تاریک به کار برده ایم. یعنی به طور ذهنی شکاف را به دو منطقه با پهنای مساوی $a/2$ تقسیم کرده ایم. پرتوی نور r_1 از نقطه بالایی منطقه بالا و پرتوی نور r_2 از نقطه بالایی منطقه پایین به نقطه P_1 وصل شده اند. برای اینکه موجک های این پرتو در هنگام رسیدن به P_1 یکدیگر را حذف کنند

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

باید داشته باشیم



سپس در حالی که طول موج ثابت است شروع به باریک کردن شکاف می‌کنیم. بدین ترتیب زاویه‌ای که در آن نخستین فریز دیده می‌شود افزایش می‌یابد. یعنی میزان پراش (پهن شدن پهنای نقش پراش) برای یک شکاف باریک‌تر، بیشتر است. وقتی پهنای شکاف را به اندازه طول موج کاهش دهیم (یعنی $a = \lambda$)، زاویه نخستین فریزهای تاریک 90° می‌شود. چون نخستین فریزهای تاریک دو لبه فریز روشن مرکزی را مشخص می‌کنند، این فریز روشن باید کل پرده را بپوشاند. با تقسیم شکاف به منطقه‌های بیشتری با پهنای مساوی می‌توانیم به یافتن محل 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 معادله $a \sin \theta = m\lambda$ به ازای $m = 1, 2, 3, \dots$ داده می‌شود.

در این فیلم، به زیبایی پراش برای موج‌های آب و نور را مشاهده می‌کنید.

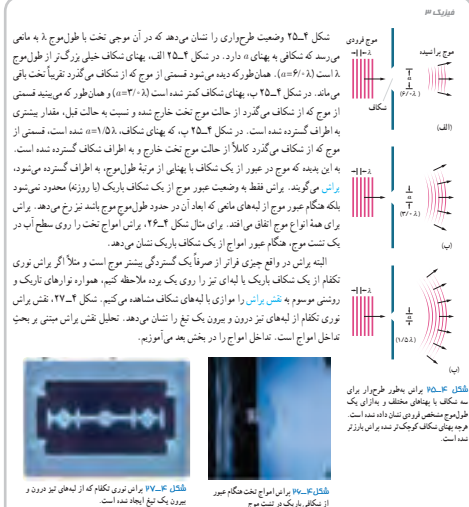
فیلم

در این فیلم، ایجاد نوارهای تاریک و روشن موسوم به نقش پراش را می‌بینید.

فیلم

پاسخ پرسش ۴-۴

هرگاه اندازه ابعاد مانع در مقایسه با طول موج، بزرگ باشد ناحیه سایه واضحی تشکیل می‌شود و هرچه مانع در مقایسه با طول موج کوچک‌تر باشد اندازه ناحیه سایه کوچک‌تر می‌شود تا اینکه عملاً سایه ناپدید گردد. بنابراین برای ممانعی با ابعاد مشخص، هرچه طول موج تابیده کوچک‌تر باشد عملاً به این معنی است که اندازه مانع در مقایسه با طول موج بزرگ‌تر می‌شود و به عبارتی ناحیه سایه بزرگ‌تر می‌شود. پس برای سیگنال‌های تلویزیونی دیجیتال که طول موج آنها بسیار کمتر از طول موج سیگنال‌های تلویزیونی قدیمی است، ناحیه سایه بزرگ‌تر است و به عبارتی دور زدن موج در اطراف مانع دشوارتر خواهد بود.



شکل ۴-۴: پراش نور در شکاف. تصویربرداری از شکاف پراش نور در شکاف. تصویربرداری از شکاف پراش نور در شکاف.

شکل ۴-۴: پراش نور در شکاف. تصویربرداری از شکاف پراش نور در شکاف. تصویربرداری از شکاف پراش نور در شکاف.

۲۰۴

در تلویزیون‌های متداول، سیگنال‌ها از آنتن‌های روی دکل‌ها به گیرنده‌های تلویزیون فرستاده می‌شوند. 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 «ناحیه سایه» مانع برانداخته شود). سابق بر این، طول موج سیگنال‌های تلویزیونی در حدود ۵۰ cm بود، ولی طول موج سیگنال‌های تلویزیونی دیجیتال که امروزه از آنتن‌ها فرستاده می‌شود بسیار کمتر است. آیا این تغییر طول موج، پراش سیگنال‌ها به داخل ناحیه سایه را افزایش می‌دهد یا کاهش؟

دانستنی برای معلم

شناورها



شناورها^۱ یک نمونه آشنا از پدیده پراش هستند که ممکن است هنگام نگاه کردن به آسمان صاف آبی متوجه آنها بشوید. این نقش ها که مانند خال های ریز و ساختارهایی موم مانند هستند ناشی از خرده های ریزی در مایع زجاجیه چشم هستند که با گذشت عمر و کم شدن یکنواختی مایع زجاجیه، بر میزان آنها افزوده می شود. در واقع آنچه شما هنگام دیدن یک شناور می بینید، ناشی از پراش نور از لبه این خرده ها و تشکیل یک نقش پراشی بر روی شبکه است. این نقش از نوارهای تاریک و روشنی تشکیل شده است. اگر بی نظمی های زجاجیه تقریباً دایره ای باشند، نقش حاصل نیز دایره ای با یک نقطه مرکزی روشن خواهد بود. یک بی نظمی کشیده، نقش پراشی کشیده ای را ایجاد می کند. شناورها به این دلیل ایجاد می شوند که زجاجیه صلب نیست و می تواند جابه جا شود. برخی از شناورها ناشی از تکه های سفت شده ای از زجاجیه هستند. همچنین آنها می توانند ناشی از گویچه هایی باشند که در این مایع رخنه کرده اند، شناورها را همه دارند و حضور آنها نشانه بیماری نیست، ولی با پیر شدن بر شمار آنها افزوده می شود.

دانستنی برای معلم

لکه روشن فرنل

نظریه موجی نور توضیح ساده ای برای پدیده پراش ارائه می کند. ولی این نظریه که در اواخر سال های ۱۶۰۰ میلادی توسط هوگنس ارائه شد و ۱۲۳ سال بعد توسط یانگ برای توضیح تداخل دوشکافی به کار برده شد، به کندی مورد پذیرش قرار گرفت، عمدتاً به این دلیل که در مغایرت با نظریه نیوتون بود که نور را جریانی از ذرات می پنداشت.

در سال ۱۸۱۸، آگوستین جان فرنل^۲ یک مدل موجی نور را برای مسابقه ای در آکادمی علوم فرانسه^۳ ارائه داد. سایمون دی . پواسون^۴، یکی از اعضای کمیته داور، 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 دایره ای (مثل یک سکه یا یک گوی) توسط باریکه ای از نور روشن شود، مدل موجی فرنل پیش بینی می کند که باید نقطه ای روشن در مرکز سایه ای که آن جسم بر روی یک پرده در فاصله ای دور می اندازد، ظاهر شود. دومنیک اف. آراگو، عضو دیگر کمیته، ترتیبی داد که به رغم این نتیجه نامعقول پیش بینی فرنل را امتحان کند. او، در کمال تعجب، آن نقطه مرکزی روشن را یافت. از عجایب تاریخ آنکه، این نقطه اکنون به عنوان نقطه ای پواسون یا نقطه آراگو شناخته می شود، هرچند که هیچ یک از آن دو در ابتدا اعتقادی به وجود آن نداشتند.

از زمان کشف این نقطه، پژوهشگران بسیاری اشیاء کدري مثل ساچمه یک یاتاقان را به کار گرفته اند تا به عنوان یک عدسی برای ایجاد تصویر عمل کنند. اگر این تصویر بر روی فیلم شکل گیرد، شما می توانید درست مثل یک دوربین، عکسی از آن تهیه کنید.

۱- floaters

۲- Augustin Jean Fresnel

۳- French Academy

۴- Simeon D. Poisson



چرا نقطه پوآسون شکل می گیرد؟ و چگونه جسمی مثل یک گوی فلزی می تواند نور را به ایجاد یک تصویر وادارد؟

فرض کنید چشمه نور، نقطه ای روشن در فاصله ای دور است و تصویر توسط یک گوی صلب ایجاد می شود. وقتی امواج نوری به گوی می رسند، از اطراف آن پراشیده می شوند و به طور شعاعی به سمت بیرون و نیز به درون ناحیه سایه گوی پخش می شوند. اگر پرده ای کاملاً در پشت گوی قرار گیرد، نور نقش پراش کوچکی از دایره های هم مرکز تاریک و روشن را بر روی آن شکل می دهد. مرکز این نقش، نقطه ای روشن است، زیرا امواج عبوری از یک سمت گوی همان مسافتی را تا مرکز پرده طی می کنند که امواج عبوری از سمت مقابل آن طی می کنند و بنابراین، این امواج به طور هم فاز به یکدیگر می رسند و تداخل سازنده می کنند.

نخستین دایره 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 مسافت اضافی برابر با نصف یک طول موج است و بنابراین این دو دسته موج (یکی از پایین و یکی از بالا) وقتی به نقطه ای روی پرده می رسند، تداخل ویرانگر می کنند. بقیه این نقش نیز ناشی از تداخل سازنده و ویرانگر مشابهی است. در بعضی جاها، فاصله طی شده توسط امواجی که از طرف های مقابل هم می آیند به اندازه مضرب صحیحی از یک طول موج تفاوت دارند، که این به تداخل سازنده می انجامد، زیرا امواج را هم فاز می کند. در جاهای دیگر، تفاوت مسافت طی شده، برابر با مضرب فردی از نصف یک طول موج است، که این به تداخل ویرانگر می انجامد، زیرا امواج را ناهم فاز می کند.

وقتی یک گوی تصویری از یک جسم را به وجود می آورد، هر بخش روشن آن جسم به عنوان یک چشمه نور نقطه ای عمل می کند و نقطه ای نسبتاً روشن را در نزدیکی مرکز نقش پراش ایجاد می کند. ترکیب این نقاط روشن، تقریباً شکل آن جسم را دوباره می سازد و بنابراین تصویری از جسم به وجود می آورد.

در این فیلم، نمایشی از پراش فرنل را می بینید.



پرسش پیشنهادی

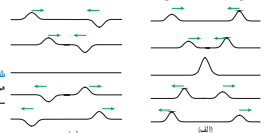
چرا امواج برنامه های تلویزیونی برخلاف امواج رادیویی به طور مستقیم پخش می شوند؟ پاسخ: ایستگاه های تلویزیونی در طول موج های کمتری از امواج رادیویی کار می کنند. برای چنین امواجی یون سپهر شفاف است و امواج را مانند امواج رادیویی باز نمی گرداند. بنابراین نمی توان آنها را مانند امواج رادیویی منتشر کرد. با توجه به بلند بودن طول موج این امواج، آنها را کلاً به طور مستقیم انتشار می دهند، زیرا از موانعی مانند خانه ها و... چندان پراشیده نمی گردند. البته همان طور که در پرسش ۴-۴ مطرح شده است، طول موج سیگنال تلویزیون های دیجیتال کمتر است و این به پراشیدگی بیشتری می انجامد.

شکل ۳-۴: برهم کنش های موج

۳-۴ تداخل امواج

وقتی در تالاری به توی موسیقی گوش می دهید، امواج صوتی حاصل از سازهای مختلف به طور همدان به گوشتان می رسند. الکترون ها در آنتن گیرنده های رادیو و تلویزیون تحت تأثیر همدان امواج الکترومغناطیسی زیادی که از فرستنده های مختلف ارسال می شوند، به حرکت می افتند. آب یک دریاچه یا بندرگاه، ممکن است بر اثر تأثیر همدان موج هایی که به دنبال تعداد زیادی قایق در حال حرکت به راه می افتند، متلاطم شود. اینها همگی نمودهای از **اصل برهم کنش امواج** هستند که بیان می دارد وقتی چندین موج به طور همدان بر ناحیه ای از فضا تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برابر مجموع اثرهای مجزای هر یک از آنها است.

شکل ۲۸-۴، عکس های دو تب را که در جهت های مخالف هم در یک ریسمان کشیده شده حرکت می کنند در چند لحظه متوالی نشان می دهد. وقتی این تب ها به هم می رسند و با یکدیگر همپوشانی می کنند، تا بر اصل برهم کنش، تب برآیند با مجموع دو تب برابر است. توجه کنید چه برای تب ها و چه برای موج هایی که همپوشانی می کنند، آنها به هیچ وجه شکل و حرکت یکدیگر را تغییر نمی دهند، و بنابراین پس از همپوشانی، بدون هرگونه تغییر شکلی به حرکت خود ادامه می دهند. به ترکیب موج ها با یکدیگر، **تداخل** می گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که همدان از یک منطقه عبور می کنند. در شکل ۲۸-۴ الف، تب ها هنگام همپوشانی تب بزرگتری را ایجاد کرده اند که به آن **تداخل سازنده** می گویند، در حالی که در شکل ۲۸-۴ ب، تب ها هنگام همپوشانی اثر یکدیگر را حذف کرده اند که به آن **تداخل ویرانگر** می گویند. تداخل های سازنده و ویرانگر برای موج ها نیز همچون تداخل می دهد که آن را در قسمت های بعدی بررسی خواهیم کرد.



شکل ۲۸-۴ الف در تب پیوسته در جهت مخالف هم در طول یک ریسمان کشیده که با یکدیگر تداخل سازنده بین تداخل ویرانگر انجام می دهد.



تداخل امواج سطحی آب: برای مشاهده تداخل امواج سطحی بر سطح آب، دو گوی کوچک را با یکدیگر بکشان، به طور همدان بر سطح آب به نوسان درمی آوریم. دو دسته موج دارهای ایجاد می شود که با آنکه بر انتشار یکدیگر تأثیر بگذارند با یکدیگر همپوشانی می کنند و قشای مانند غش شکل ۲۹-۴ را بر سطح آب بوجود می آورند. امواج در برخی نقاط همدیگر را تقویت می کنند و تداخل سازنده انجام می دهند و در برخی نقاط همدیگر را تضعیف می کنند و تداخل ویرانگر انجام می دهند. به عبارتی، دامنه ها یا فرکانس های دو موج که در یک زمان در نقطه ای به همدیگر برسند، سطح آب را در آن نقطه به شدت بالا یا پایین می برند. در خروجی بزرگتر باید چنین قشای ایجاد می شود.

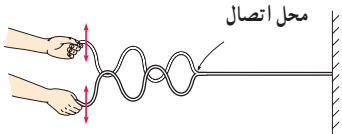
۱-۴

در اینجا نیز خوب است توجه دهید که تداخل در ریسمان برای تداخل در یک بُعد، تداخل امواج سطحی برای تداخل در دو بُعد، تداخل امواج صوتی، و تداخل امواج نوری به عنوان تداخل در سه بُعد بررسی می شوند.

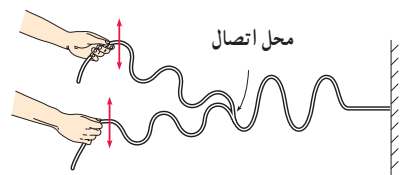
خوب است در اینجا این مفاهیم را برای امواج، با ایجاد دو موج سینوسی در دو ریسمان نیز بررسی کنید.

فرض کنید دو موج سینوسی با طول موج و دامنه یکسان را مطابق شکل الف در دو ریسمان که در نقطه ای به ریسمان سومی وصل شده اند، روانه کنیم. توجه کنید ریسمان ها از هر لحاظ مشابه یکدیگرند و جرم واحد طول آنها با هم برابر است. روش آزمایش به این ترتیب است که یکی از ریسمان ها را در دست چپ خود و دیگری را در دست راست خود بگیرید و آنها را مطابق شکل به طور همگام به نوسان درآورید؛ یعنی آنها را به شیوه یکسانی بالا و پایین ببرید، به طوری که امواج تولید شده در هر دو ریسمان کاملاً مشابه هم باشند.

وقتی این دو موج به محل اتصال ریسمان ها برسند، مشاهده خواهیم کرد که موجی با همان طول موج ولی با دامنه ای دو برابر بزرگتر در ریسمان سوم ایجاد می شود. در واقع آنچه رخ می دهد آن است که قله های دو موج اولیه و نیز دره های آنها در ریسمان سوم بر یکدیگر منطبق می شوند و اصطلاحاً می گوئیم این دو موج با یکدیگر هم فاز بوده اند. به این نوع تداخل، تداخل کاملاً سازنده می گویند. حال اگر دو ریسمان را مانند شکل ب طوری حرکت دهیم که در حالی که یکی روبه بالا می رود دیگری روبه پایین برود، اصطلاحاً می گوئیم موج هایی کاملاً ناهم فاز نسبت به یکدیگر ایجاد شده اند. و اگر این دو موج دامنه یکسانی داشته باشند، اصل برهم نهی بیش بینی می کند که وقتی این دو موج به محل اتصال برسند، اثر همدیگر را خنثی می کنند و جابه جایی خالص صفر می شود. در واقع آنچه رخ می دهد آن است که در ریسمان سوم قله های یک موج درست بر دره های موج دیگر منطبق می شود. به این نوع تداخل، تداخل کاملاً ویرانگر می گویند.



ب) دو موج که به طور کاملاً ناهم فاز در دو ریسمان مشابه ایجاد شده اند، هیچ جابه جایی در ریسمان مشابه دیگری که به آنها متصل شده است، ایجاد نمی کنند.



الف) دو موج که به طور هم فاز در دو ریسمان یکسان ایجاد شده اند، با رسیدن به ریسمان سومی با جرم واحد طول مشابه، موجی بزرگتر در این ریسمان ایجاد کرده اند.

توجه دهید تداخل امواج صوتی در یک بُعد نیز صورت می گیرد که آن را در مبحث لوله های صوتی بررسی خواهیم کرد.

فیلتر ۳۱

حالتی که اگر برآمدگی یک موج در یک زمان و در یک نقطه به فرورفتگی موج دیگر برسد، دو موج یکدیگر را تضعیف می کنند و بنابراین سطح آب در چنین نقطه ای نوسان چندانی نخواهد داشت. به این ترتیب، در برخی نواحی روی سطح آب دامنه موج برآیند بیشینه و در برخی ناحیه ها، کمینه است. چنین نقش متناوب یک درمیانی از بیشینه ها و کمینه ها را نقش تداخلی امواج سطحی آب می نامیم و آنها را به وضوح می توانیم در سبانه تشکیل شده و سطح ورقه کاغذ زیر نشت موج مشاهده کنیم (شکل ۳۱-۴).

تداخل امواج صوتی: امواج صوتی نیز می توانند تداخل کنند. به این منظور، آزمایش نشان داده شده در شکل ۳۱-۵ را در نظر بگیرید. در این آزمایش دو بلندگو که به یک مولد سیگنال الکتریکی متصل اند امواج سینوسی همبسته ای را در فضا منتشر می کنند. با حرکت دادن میکروفون در امتداد خط فرضی نشان داده شده در شکل که در فاصله مناسبی از بلندگوها قرار دارد درمی یابیم که بلندی صدا به طور متناوب کم و زیاد می شود. علت این پدیده را به سادگی می توان با رسم امواج تداخلی های سازنده و ویرانگر امواج صوتی توضیح داد (چگونه؟)

تداخل امواج توری: در سال ۱۸۰۱ میلادی توماس یانگ (۱۷۷۳-۱۸۲۹ م.) دانشمند انگلیسی به طور تجربی ثابت کرد که نور یک موج است که این برخلاف نظر بیشتر فیزیک دانان آن زمان بود. در واقع او نشان داد که نور نیز مانند موج های سطحی آب، موج های صوتی و همه انواع موج های دیگر تداخل می کند.

شکل ۳۱-۳: طرحی از چگونگی آزمایش اولیه یانگ برای تحقیق تداخل امواج توری را نشان می دهد. نور حاصل از یک چشمه تکفام (اینجا سبز رنگ) و تک شگافی می یابد. سپس نور خروجی بر اثر براس، گسترده می شود و دو شکاف S₁ و S₂ را در زمین می کند. موج های حاصل از پرتی نور توسط این دو شکاف با یکدیگر تداخل می کنند و نقش حاصل از این تداخل را می توان روی پرده ای که در ناحیه سمت راست دو شکاف قرار دارد مشاهده کرد. روی پرده، قطه های با تداخل سازنده، نوارها با فرکانس های راستی را تشکیل می دهند (شکل ۳۱-۴). و قطه های با تداخل ویرانگر نوارها با فرکانس های راستی را تشکیل می دهند (شکل ۳۱-۴ ب) که می توان آنها را بین نوارهای روشن مجاور شکل ۳۱-۴ مشاهده کرد. نقش

شکل ۳۱-۳: طرحی از آزمایش اولیه یانگ در تکفام، سبز توسط تک شگافی برآمده می شود. با بارانداز این نور از دو شکاف، امواج توری تداخل می کنند و نقش تداخلی نور را روی پرده در یک روی پرده و درجه می آید. توجه کنید پهنای نوارهای روشن و تاریک در این نقش یکسان فرض شده است.

شکل ۳۱-۴: (الف) امواج دو موج همبسته را از دو شکاف می گذرانند و در نتیجه تداخل آنها سازنده است. (ب) امواج دو موج همبسته را از دو شکاف می گذرانند و در نتیجه تداخل آنها ویرانگر است.

۱۰۴

فصل ۳۱: برهم کنش های موج

در اینجا خوب است دانش آموزان علاقه مند را به دانستنی «اختلاف طول مسیر و مکان نوارهای تداخلی» ارجاع دهید تا در صورت تمایل تحلیل ریاضی این موارد را دربند. همچنین دانستنی «رنگ های حاصل از تداخل: لایه های روغن و جانوران» که در مورد نقش های حاصل از فشردن یکی از صفحه های دو لایه نازک که بین شان هواست کاربرد دارد، می تواند برای دانش آموزان جالب باشد.

توزارهای روشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخلی های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می شود. طرحی از این نقش در سمت راست شکل ۳۱-۴، برای نور تکفام سبز نشان داده شده است. در این نقش پهنای هر نوار تاریک با روشن (که مساری فرض می شود) متناسب با طول موج نور به کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش یانگ می توان طول موج نور به کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی پردازیم.

فعالیت ۳۱-۲

مشاهده نقش تداخلی به کمک نور لیزر: اگر از نور لیزر استفاده کنیم، دیگر نیازی به استفاده از یک تک شگافی در آزمایش یانگ نیست. با استفاده از یک لیزر مدادی، صفحه دو شکاف آزمایش یانگ را مطابق شکل روشن کنید (البته لازم باشد از یک عدسی واگرا در برابر نور لیزر استفاده کنید تا هر دو شکاف روشن شود) و نقش تداخلی ایجاد شده را روی پرده مشاهده کنید. برای تهیه صفحه دو شکاف می توانید یک وجه تیزی شیشه ای (مانند لام میکروسکوپ) را با قرار دادن تیزه روی شعله شمع به خوبی دو داد و دو شکاف، سپس با تیغ تیزی دو خط نزدیک به هم (با فاصله چند دهم میلی متر از یکدیگر) روی تیزه شیشه ای 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 درمی آید. وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت (که در شکل ۳۱-۴ با رنگ آبی مشخص شده است) و به سمت چپ حرکت می کند (با موج تابیده (که در شکل ۳۱-۴ با رنگ سبز مشخص شده است) و به سمت راست حرکت می کند) ترکیب شوند موجی برآیند ایجاد می کنند که شکل آن از اصل برهم نهی حاصل می شود (این موج در شکل ۳۱-۴ با رنگ قرمز مشخص شده است).

مختصه بارز این موج برآیند آن است که مکان هایی در طول ریسمان، موسوم به گره، وجود دارد که در آنها ریسمان هرگز حرکت نمی کند. وسط گره های مجاور را شکم می گویند که دامنه موج برآیند در آنها بیشینه است. نقش موج برآیند را در این حالت، موج ایستاده می گویند. زوا نقش های این موج به چپ

شکل ۳۱-۳: چند مکان مشخص از تشکیل یک موج ایستاده در یک ریسمان کشیده شده در جهت یک دوره

۱۰۵

پاسخ فعالیت ۵-۴

در مورد این فعالیت موارد زیر را به دانش‌آموزان گوشزد کنید:

۱ از لحاظ ایمنی حتماً مواظب باشید باریکه نور لیزر یا بازتاب

آن وارد چشمتان نشود.

۲ پرده در حدود چند متر از صفحه شکاف باشد.

۳ خوب است بدانید با این آزمایش می‌توان طول موج نور لیزر

به کار رفته را نیز محاسبه کرد. این طول موج از رابطه $\lambda = sd/D$

به دست می‌آید که در آن s فاصله نقطه‌ها است و اگر بر فرض ۹

نقطه داشته باشیم فاصله دو انتهای نقطه‌ها $8s$ می‌شود که با یک متر

می‌توان این فاصله را اندازه گرفت و بر ۸ تقسیم کرد. همچنین d

فاصله شکاف‌ها و D فاصله صفحه شکاف‌ها تا پرده است.

در این فیلم آزمایش ینگ با نور لیزر را مشاهده می‌کنید.

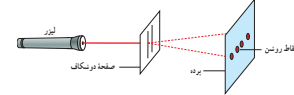


شکل ۳۳-۴: برهم‌کنش موج

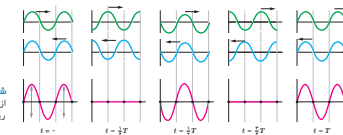
نوارهای روشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل‌های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می‌شود. طرحی از این نقش در سمت راست شکل ۳۳-۴. برای نور تک‌فام سبز نشان داده شده است. در این نقش پهنای هر نوار تاریک یا روشن (که مساوی فرض می‌شوند) متناسب با طول موج نور به کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش ینگ می‌توان طول موج نور به کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی‌پردازیم.

فعالیت ۵-۳

مشاهده نقش تداخلی به کمک نور لیزر: اگر از نور لیزر استفاده کنیم، دیگر نیازی به استفاده از یک تک‌شکاف در آزمایش ینگ نیست. با استفاده از یک لیزر مدادی، صفحه دو شکاف آزمایش ینگ را مطابق شکل روشن کنید (شاید لازم باشد از یک عدسی و اگر در برابر نور لیزر استفاده کنید تا هر دو شکاف روشن شود) و نقش تداخلی ایجادشده را روی پرده مشاهده کنید. برای تهیه صفحه دو شکاف می‌توانید یک وجه تیزه‌ای نیشه‌ای (مانند لام میکروسکوپ) را با قرار دادن تیزه روی شعله شمع به خوبی دودآلود کنید. سپس با تیغ تیزی در خط نزدیک به هم (با فاصله چند ده میلی‌متر از یکدیگر) روی تیزه نیشه‌ای بکشید.



موج ایستاده و تشدید در ریمان کشیده: رسانی 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 ۳۳-۴ با رنگ آبی مشخص شده است و به سمت چپ حرکت می‌کند) با موج تابیده (که در شکل ۳۳-۴ با رنگ سبز مشخص شده است و به سمت راست حرکت می‌کند) ترکیب شوند موجی برآیند ایجاد می‌کند که شکل آن از اصل برهم‌هی حاصل می‌شود (این موج در شکل ۳۳-۴ با رنگ قرمز مشخص شده است). مشخصه بارز این موج برآیند آن است که مکان‌هایی در طول ریمان، موسوم به گره، وجود دارد که در آنها ریمان هرگز حرکت نمی‌کند. وسط گره‌های مجاور را شکم می‌گویند که دامنه موج برآیند در آنجا بیشینه است. نقش موج برآیند را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند. زوا غش‌های این موج به چپ



شکل ۳۳-۴: چند عکس لحظاتی از تشکیل یک موج ایستاده در یک ریمان کشیده شده در مدت یک دوره

۱۰۵

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 ۷-۴ مثال‌هایی از تداخل امواج الکترومغناطیسی هستند. همچنین بررسی فعالیت پیشنهادی «تداخل برای امواج میکروموج» خالی از لطف نیست.

دانشتنی معلم

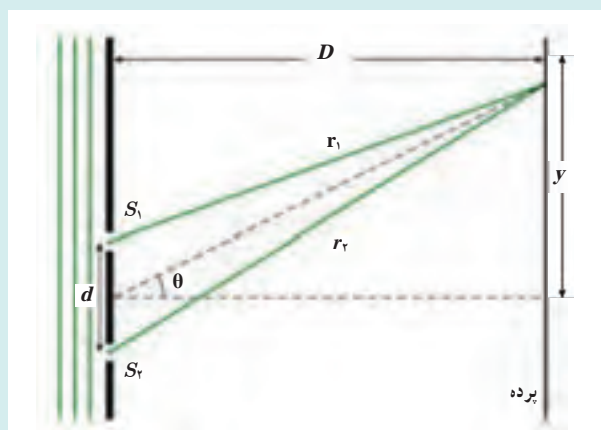
اختلاف طول مسیر و مکان نوارهای تداخلی

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 کرد. برای پاسخ به این سؤال از آرایش شکل ۳۳-۴ 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 نقطه وسط بین شکاف تا پرده به عنوان خط مرجع (خط چین افقی) رسم می‌کنیم. سپس برای بحث خود، نقطه 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 محل شکاف‌ها، آنها دقیقاً بخش‌هایی از یک جبهه موج هستند. ولی با عبور این موج‌ها از شکاف‌ها، آنها مسیرهای متفاوتی را تا رسیدن به نقطه P طی می‌کنند. اگر دو موج مسیریابی با طول‌های متفاوت را طی کنند، ممکن است دیگر فازهای آنها در نقطه P برابر نباشد. بنابراین بسته به اختلاف طول

مسیر پرتوها تا نقطه P (که به آن اختلاف راه نیز می گویند) ممکن است تداخلی سازنده یا ویرانگر در نقطه P ایجاد شود. همچنین نشان داده می شود 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 پیشینه ها می رسمیم، 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 کمینه ها می رسمیم. به عبارتی برای اختلاف راه ΔL داریم

$$\Delta L = m\lambda, m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی روشن)}$$

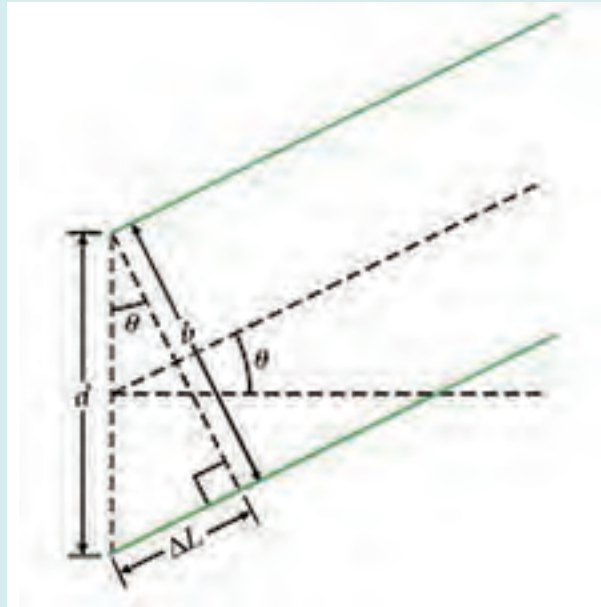
$$\Delta L = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی تاریک)}$$



شکل ۱- موج های حاصل از شکاف های S_1 و S_2 در نقطه دلخواه P روی پرده در فاصله y از محور مرکزی ترکیب شده اند. با زاویه θ می توان مکان P را تعیین کرد.

برای محاسبه ΔL در شکل ۱ (یعنی اختلاف بین طول مسیرهای S_1P و S_2P) کمانی به مرکز P و به شعاع PS_1 رسم می کنیم. این کمان خط S_2P را در نقطه ای قطع می کند. آنگاه فاصله S_2 تا این نقطه همان اختلاف طول مسیر پرتوها است. اما محاسبه این طول دشوار است و برای سادگی محاسبات معمولاً فرض می شود که فاصله D شکاف ها تا پرده بسیار بزرگ تر از فاصله d شکاف ها از همدیگر است به طوری که می توانیم تقریباً پرتوهای r_1 و r_2 را موازی در نظر بگیریم (شکل ۲). در این صورت اختلاف طول مسیر پرتوها با رسم عمودی از S_1 بر پرتوی r_2 که در شکل با b نشان داده شده است به دست می آید و در نتیجه از مثلث قائم الزویه شکل درمی یابیم $\Delta L = d \sin \theta$ است که در آن θ زاویه بین محور مرکزی و خطی است که از وسط شکاف ها به نقطه P رسم شده است.

بنابراین اکنون معادله هایی که برای Δx به دست آوردیم به رابطه های زیر می انجامد



شکل ۲- 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 زاویه θ در مثلث قائم‌الزاویه شکل عمود بر دو ضلع زاویه θ در شکل ۱ است، این دو زاویه با هم برابرند.

$$d \sin \theta = m\lambda, m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی روشن)}$$

$$d \sin \theta = (2m+1) \frac{\lambda}{2}, m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی تاریک)}$$

و با توجه به اینکه در شکل زاویه θ زاویه‌ای کوچک است $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{D}$ ، که در آن y فاصله نقطه P تا محور مرکزی است. در نتیجه رابطه‌های بالا چنین می‌شوند

$$y = \frac{m\lambda D}{d}, m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی روشن)}$$

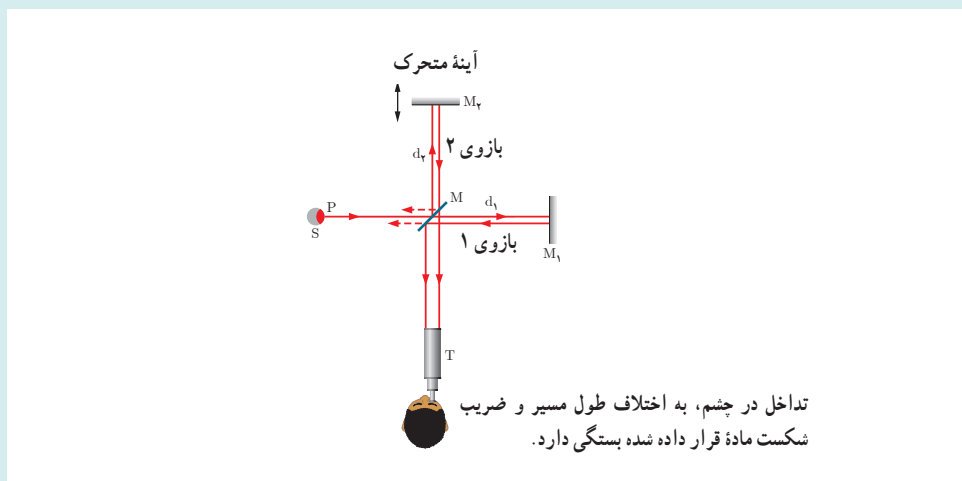
$$y = \frac{(m+\frac{1}{2})\lambda D}{d}, m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی تاریک)}$$

تداخل سنج مایکلسون

تداخل سنج^۱ وسیله ای است که به کمک فریزهای تداخلی می تواند برای اندازه گیری بسیار دقیق طول یا تغییر طول به کار رود. در اینجا شکل اولیه آن را که در سال ۱۸۸۱ توسط مایکلسون طراحی و ساخته شد، توضیح می دهیم.

نوری را در نظر بگیرید که نقطه P واقع بر چشمه گسترده S در شکل ۱ را ترک می کند و به شکافنده باریکه M می رسد. شکافنده باریکه، آینه ای است که نیمی از نور فرودی را عبور می دهد و نیمی دیگر را بازمی تاباند. در شکل، برای راحتی کار، فرض کرده ایم ضخامت آینه ناچیز است. بنابراین، در نقطه M نور به دو موج تقسیم می شود که یکی با عبور از شکافنده به طرف آینه M_1 در انتهای یکی از بازوها و دیگری با بازتاب از شکافنده به طرف آینه M_2 در انتهای بازوی دیگر پیش می رود. این موج ها از آینه ها کاملاً بازمی تابند و در امتداد جهت های فرودی خود بازمی گردند و سرانجام هر یک وارد دوربین T می شوند. آنچه ناظر می بیند 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 می شوند برابر با $2d_1 - 2d_2$ است، و هر چیزی که این اختلاف طول مسیر را تغییر دهد، موجب تغییر در اختلاف فاز بین این دو موج در چشم می شود. مثلاً اگر آینه M_2 به اندازه $\frac{1}{4}\lambda$ حرکت کند، اختلاف طول مسیر به اندازه λ تغییر می کند و نقش فریز به اندازه یک فریز جابه جا می شود (گویی هر نوار تاریک گورخر به محل نوار تاریک مجاور حرکت کرده است). به همین ترتیب، حرکت آینه M_1 به اندازه $\frac{1}{4}\lambda$ موجب جابه جایی به اندازه نیم فریز می شود (هر نوار تیره گورخر به محل نوار روشن مجاور جابه جا می شود).



شکل ۱- تداخل سنج مایکلسون که مسیر نوری را نشان می دهد که از نقطه P چشمه گسترده نشأت گرفته است. آینه M نور را به دو باریکه تقسیم می کند، که از آینه های M_1 و M_2 به سمت M و سپس به دوربین T بازمی تاباند. ناظر در دوربین فریزهای تداخلی را می بیند.

جالب است بدانید که وجود امواج گرانشی را به چنین روشی در «رصدخانه تداخل سنج 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 ۲- تصویری از رصدخانه‌های لایگو در لیونگستون و هانفورد

در این فیلم چگونگی آشکارسازی امواج گرانشی در لایگو را می‌بینید.

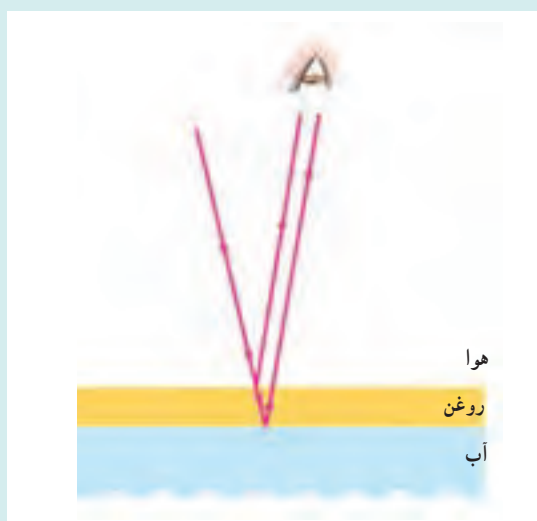


قرار دادن ماده شفاف. با قرار دادن یک ماده شفاف نازک در مسیر نوری یکی از آینه‌ها - مثلاً M_1 - نیز می‌توان باعث جابه‌جایی در نقش فریزها شد. اگر ضخامت ماده L و ضریب شکست آن n باشد، نشان داده می‌شود که تعداد فریزهای جابه‌جا شده از رابطه $\frac{2L}{\lambda}(n-1)$ به دست می‌آید. برای هر تغییر فاز، نقش نواری به اندازه 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، فاصله بین دو خراش ظریف روی یک میله فلزی معین بود که در جایی نزدیکی پاریس نگهداری می‌شد. مایکلسون با استفاده از تداخل سنج خود نشان داد که متر معیار معادل $1553163/5$ طول موج نور قرمز تک‌فامی است که از یک چشمه کادمیوم گسیل شده است. مایکلسون برای این اندازه‌گیری دقیق، جایزه نوبل سال ۱۹۰۷ را دریافت کرد. کار او زمینه را برای کنار گذاشتن میله متر به عنوان معیار طول مهیا کرد و به تعریف دوباره متر برحسب طول موج نور در سال ۱۹۶۱ انجامید. البته این معیار نیز برای برآوردن الزامات روبه پیشرفت علم و فناوری به حد کافی دقیق نبود و در سال ۱۹۸۳ معیار جدیدی مبتنی بر مقداری تعریف شده برای تندی نور، جایگزین آن شد.

^۱ - Laser Interferometer Gravitational wave Observatory

رنگ های حاصل از تداخل : لایه های روغن و جانوران

اگر به لایه ها و حباب های صابون یا لکه های روغن در خیابانی خیس نگاه کنید، تنوع رنگی چشم نوازی را در آنها مشاهده می کنید. این تنوع رنگی ناشی از پدیده تداخل نور است. در واقع، وقتی یک لایه شفاف که ضخامتی تقریباً برابر با طول موج نور مرئی دارد توسط نور سفیدی روشن شود، به دلیل تداخل نور می تواند رنگ هایی ایجاد کند. فرض کنید پرتویی تکفام بر چنین لایه ای بتابد. بخشی از این نور از سطح جلویی لایه باز می تابد، در حالی که بخشی از بقیه نور با عبور از لایه، از سطح عقبی آن باز می تابد، دوباره از لایه می گذرد، و سپس از آن خارج می شود. وقتی شما این دو موج خروجی از لایه را دریافت می کنید آنها با هم تداخل می کنند (شکل ۱). اگر آنها هم فاز باشند، به طور سازنده تداخل می کنند و شما رنگ روشنی را روی لایه می بینید و اگر آنها ناهم فاز باشند، به طور ویرانگر تداخل می کنند و شما روی لایه را سیاه می بینید. وقتی شما زاویه دید خود را تغییر دهید، مسافتی که نور در لایه می پیماید تغییر می کند که این می تواند تداخل دو پرتو را از سازنده به ویرانگر و بالعکس تبدیل می کند. نور سفید آمیزه ای از رنگ های مختلف است و بنابراین رنگ هایی را که می بینید با تغییر زاویه دید شما تغییر می کنند و نمایش های رنگارنگی را مشاهده خواهید کرد.



شکل ۱- نور بازتابیده از سطوح جلویی و عقبی لایه به چشم شما می رسد.

همچنین طبیعت دیرزمانی است از تداخل نوری برای ایجاد رنگ استفاده کرده است. رنگی که از برخی پروانه ها و حشرات می بینیم ناشی از تداخل نوری است. این پروانه ها و حشرات باله هایی دارند که رنگ آنها با تغییر زاویه دید شما تغییر می کند. یک نمونه جالب، پروانه مورفو^۱ است که گرچه رنگ بال آن قهوه ای است (و آن را می توانید از سطح پایینی بال آن ببینید)، ولی سطح بالایی بال آن بر اثر تداخل نور بازتابیده به رنگ آبی درخشانی دیده می شود (شکل ۲) و اگر زاویه دید خود را تغییر دهید، این رنگ



شکل ۲- تصویری از پروانه مورفو

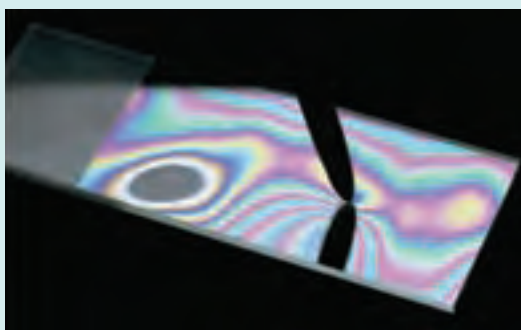
تغییر می‌کند. شاه‌ماهی^۱ نیز از همین ویژگی استفاده می‌کند و خود را به رنگ سفید نقره‌ای می‌نمایاند تا شکارچی‌ها کار سختی در یافتن آن داشته باشد. وقتی به برخی از سوسک‌های آبرزی/استوایی^۲ از زاویه خاصی نگاه شود، رنگ‌های زیبایی را نشان می‌دهند. برخی سوسک‌ها از این ویژگی جهت استتار خود استفاده می‌کنند.

ویژگی این پروانه‌ها و حشرات ناشی از لایه‌های پوسته‌مانند شفاف است که موجب تداخل نور می‌شوند. مثلاً در سطح بالایی بال یک پروانه مورفو، این پوسته‌ها ساختاری پله‌کانی دارند. ضخامت و فاصله این پوسته‌ها به گونه‌ای است که وقتی نور سفیدی از آنها می‌گذرد،

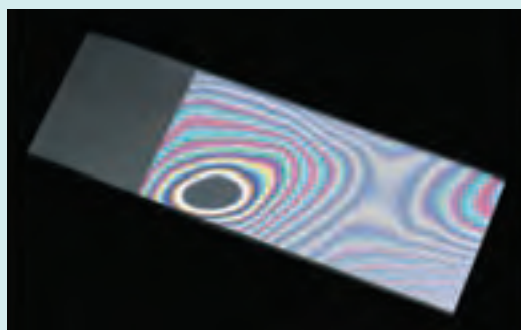
بازتاب‌های حاصل از پوسته‌های متوالی (مثلاً پوسته بالایی و پوسته پایین‌تر بعدی) به تداخل ویرانگر می‌انجامد و بنابراین شما رنگی آبی از این بال می‌بینید. با تغییر زاویه دید خود، مسیر نوری که به شما می‌رسد را تغییر می‌دهید و این موجب تغییر طول موجی می‌شود که به تداخل سازنده می‌انجامد.

از جابه‌جایی رنگی مشابهی در جوهرهای به کار 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 زاویه دید نسخه‌برداری کنند و بنابراین نمی‌توانند هر انتقال رنگی را که بر اثر تغییر زاویه دید ایجاد می‌شود، به وجود آورند.

همچنین تغییر فاصله لایه‌هایی که برهم نهاده شده‌اند می‌تواند به تغییر رنگ بیانجامد. شکل ۳. الف دو لایه شیشه با گاف هوای باریک را نشان می‌دهد که بر اثر تابش نور نقش‌هایی تداخلی بر آن ایجاد شده است. وقتی لایه بالایی را می‌فشاریم (شکل ۳. ب) نقش‌های تداخلی تغییر شکل می‌دهند که این ناشی از آن است که با اعمال فشار، فاصله هوای بین لایه‌ها تغییر کرده است.



شکل ۳. ب با اعمال فشار به فیلم نازک بالایی، نقش‌های تداخلی تغییر می‌کنند.

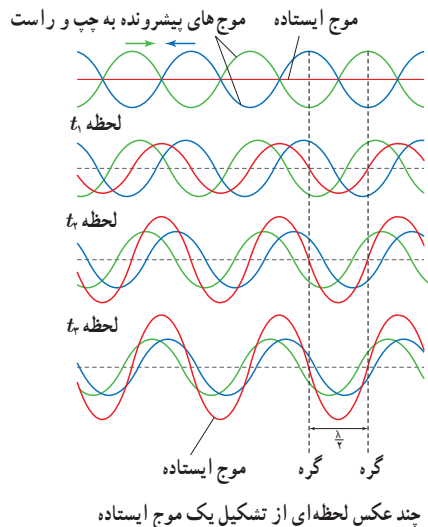


شکل ۳. الف دو فیلم نازک با گاف باریکی از هوا که به آن نور سفید تابانده شده است.

^۱—Herring

^۲—Eropical Gyrinid Beetle

اشاره کنید دو موج سینوسی با طول موج و دامنه یکسان را بررسی می کنید که در جهت های مخالف هم حرکت می کنند (یعنی برخلاف آنچه که در حاشیه دوم مربوط به صفحه ۱۰۳ کتاب درسی آمده است و در آنجا دو موج سینوسی با طول موج و دامنه یکسان در یک جهت حرکت می کنند). از این لحاظ می توان اشاره کرد که لزوماً نیازی به این نیست که ریسمانی را در نظر بگیرند. مثلاً شکل های زیر در حالت کلی این را برای دو موج، یک چپ رونده (سبز رنگ) و دیگری راست رونده (آبی) و تشکیل موج ایستاده برای چهار لحظه نشان می دهد.



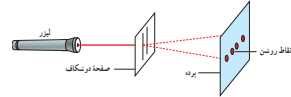
در شکل ۳۵-۴ دوباره تأکید شود فاصله مکان های حدی شکم، محدوده حرکت شکم است.

فصل ۳۴: برهم کنش های موج

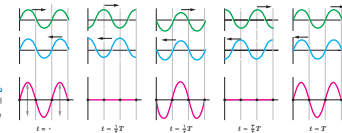
تواریخ روتن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل های سازنده و ویرانگرند، نقش داخلی خوانده می شود. طرحی از این نقش در سمت راست شکل ۳۴-۴، برای نور تکفام سبز نشان داده شده است. در این نقش پهنای هر نوار تاریک یا روشن (که مساوی فرض می شود) متناسب با طول موج نور به کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش بانگ می توان طول موج نور به کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی پردازیم.

فعالیت ۳۴-۱

مشاهده نقش تداخلی به کمک تور لیور: اگر از تور لیور استفاده کنیم، دیگر نیازی به استفاده از یک تکشکاف در آزمایش بانگ نیست. با استفاده از یک تور لیور مدادی، صفحه دو شکاف آزمایش بانگ را مطابق شکل روشن کنید (شاید لازم باشد از یک عدسی واگرا در برابر تور لیور استفاده کنید تا هر دو شکاف روشن شود) و نقش تداخلی ایجادشده را روی پرده مشاهده کنید. برای تهیه صفحه دو شکاف می توانید یک وجه تپه ای شیشه ای (مانند لام میکروسکوپ) را با قرار دادن تپه روی شعله شمع به خوبی دود نمود کنید. سپس با نیغ تزی در خط نزدیک به هم (با فاصله چند ده میلی متر از یکدیگر) روی تپه شیشه ای بکشید.



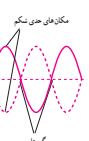
موج ایستاده و تشدید در ریسمان کشیده: ریسمانی را تصور کنید که در یک انتها ثابت شده است و انتهای دیگر آن به نوسان درمی آید. وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت (که در شکل ۳۴-۴ با رنگ آبی مشخص شده است) و به سمت چپ حرکت می کند با موج تابیده (که در شکل ۳۴-۴ با رنگ سبز مشخص شده است) و به سمت راست حرکت می کند ترکیب شوند موجی برآیند ایجاد می کنند که شکل آن از اصل برهم نهی حاصل می شود (این موج در شکل ۳۴-۴ با رنگ قرمز مشخص شده است). مشخصه بارز این موج برآیند آن است که مکان هایی در طول ریسمان، موسوم به گره، وجود دارد که در آنها ریسمان هرگز حرکت نمی کند. وسط گره های مجاور را شکم می گویند که دامنه موج برآیند در آنجا بیشینه است. نقش موج برآیند را در این حالت، موج ایستاده می گویند. ریز نقش های این موج به چپ



شکل ۳۴-۴ چند عکس لحظه ای از تشکیل یک موج ایستاده در یک ریسمان کشیده در مدت یک دوره

۱۰۵

شکل ۳۴-۴



شکل ۳۴-۴ شکل یک موج ایستاده که با گره ها و شکم ها در یک ریسمان تکان داده شده است. برهم ریز است دو ریز موج های ایستاده در مکان های شکم که تان داده شود.

با راست حرکت نمی کنند و محل شکم ها و گره ها تغییر نمی کند. شکل ۳۴-۴ چند عکس در لحظه های مختلف از موج های تابیده، بازتابیده، و موج برآیند آنها را نشان می دهد. از روی شکل در می یابیم که فاصله گره های مجاور از هم برابر با نصف طول موج ($\lambda/2$) و بنابراین فاصله گره ها از شکم های مجاور برابر با ربع طول موج ($\lambda/4$) است. شکل ۳۴-۴، طرحی از موج ایستاده در این ریسمان را نشان می دهد که در آن حالت های مختلف ریسمان در لحظات مختلف شکل ۳۴-۴ دیده می شود.

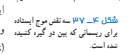
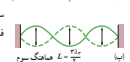
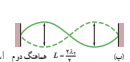
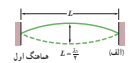
اگر در شکل ۳۴-۴ به موج های تابیده و بازتابیده در مکان گره ها و در لحظه های مختلف نگاه کنیم، می بینیم که در تمام لحظات وضعیت موج های تابیده و بازتابیده در هر یک از گره ها به گونه ای است که یکدیگر را حذف و از یکدیگر را خنثی می کنند (تداخل ویرانگر). در این حالت اصطلاحاً می گویم بسامدهای تشدید تار: شکل ۳۴-۴ تصویری واقعی از اسباب آزمایشی را نشان می دهد که در آن تار کشیده شده، از یک سر به یک مولد نوسان و از سر دیگر به گره ای متصل است. بازای بسامدهای معینی از مولد نوسان، تداخل موجب ایجاد موج ایستاده بارزی (یا اصطلاحاً یک کمر نوسان) در تار می شود. نکته می شود در این بسامدهای معین که بسامدهای تشدید خوانده می شوند به تشدید درآمده است. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدید نوسان کند موج ایستاده بارزی ایجاد نمی شود.



شکل ۳۴-۴ اسباب آزمایشی برای ایجاد موج ایستاده در تار کشیده. توجه کنید تری که به مولد نوسان متصل است، تقریباً در محل گره اول است.

توجه کنید که اگرچه در این آزمایش از یک نوسان ساز الکتریکی برای ایجاد ارتعاش در تار استفاده کردیم، اما در سازه های موسیقی، موج های ایستاده را می توان با ضربه زدن بر تارها (مانند سنتور، سه تار، پیانو) و پوسته ها (مانند طبل، دف، تنبک)، و با دمیون در ستون های هوا (مانند نی، فلوت، آرنج) ایجاد کرد.

در آزمایش نشان داده شده در شکل ۳۴-۴، و در بسامدهای تشدید تار، ساده ترین نقش موج ایستاده فقط یک شکم دارد که در مرکز ریسمان واقع است (شکل ۳۴-۴). نقش ساده بعدی وضعیتی است که سه گره و دو شکم داریم (شکل ۳۴-۴). نقش سوم، چهار گره و سه شکم درآمده (شکل ۳۴-۴) است. در حالت کلی اگر طول این تار را با L نشان دهیم برای هر نقش موج ایستاده ای با



۱۰۶

در این فیلم تشریح جامعی از انتشار امواج و برهم کنش های آنها را می بینید.

فیلم

شاید از لحاظ اطلاعات عمومی خوب باشد اشاره شود که به این آزمایش، آزمایش ملد (Meld's experiment) می گویند. به خصوص اگر دانش آموزان بخواهند آن را به عنوان واژه ای کلیدی در اینترنت جست و جو کنند مفید خواهد بود. در واقع این آزمایش را نخستین بار فیزیکدان آلمانی فرانتز ملد (۱۸۰۱-۱۸۳۲ م.) برای تشکیل موج های ایستاده در یک ریسمان انجام داد. در آزمایش های اولیه از یک دیپازن به عنوان چشمه نوسانی استفاده می شد. همچنین می توانید مانند فیلمی که در سایت گروه فیزیک بارگذاری شده است دانش آموزان را ترغیب به ایجاد موج های ایستاده بکنید.

فیلم ۳۳

با راست حرکت نمی کنند و محل شکم ها و گره ها تغییر نمی کند. شکل ۳۲-۲. چند عکس در لحظه های مختلف از موج های تابیده، بازتابیده، و موج برآید آنها را نشان می دهد. از روی شکل درمی یابیم که فاصله گره های مجاور از هم برابر با نصف طول موج ($\lambda/2$) و بنابراین فاصله گره ها از شکم های مجاور برابر با ربع طول موج ($\lambda/4$) است. شکل ۳۵-۴. طریقی از موج ایستاده در این ریسمان را نشان می دهد که در آن حالت های مختلف ریسمان در لحظات مختلف شکل ۳۴-۲ دیده می شود.

اگر در شکل ۳۴-۲ به موج های تابیده و بازتابیده در مکان گره ها و در لحظه های مختلف نگاه کنیم، می بینیم که در تمام لحظات وضعیت موج های تابیده و بازتابیده در هر یک از گره ها به گونه ای است که یکدیگر را حذف و اثر یکدیگر را خنثی می کنند (تداخل ویرانگر). در این حالت اصطلاحاً می گویم این دو موج در این نقطه ها (گره ها) کاملاً باهم فاز (در فاز مخالف) اند. اما در مکان هر یک از شکم ها وضعیت موج های تابیده و بازتابیده در تمام لحظات به گونه ای است که همدیگر را خنثی می کنند (تداخل سازنده). در این حالت اصطلاحاً می گویم این دو موج در این نقاط هم فاز اند.

پسامدهای تشدید تار: شکل ۳۶-۳. تصویری واقعی از اسباب آزمایشی را نشان می دهد که در آن تار کشیده نشده، از یک سر به یک مولد نوسان و از سر دیگر به گره ای متصل است. به ازای بسامدهای معینی از مولد نوسان، تداخل موجب ایجاد موج ایستاده بارزی (با اصطلاحاً یک-تیر نوسان) در تار می شود. گفته می شود تار در این بسامدهای معین که **پسامدهای تشدید** خوانده می شوند به تشدید درآمده است. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدید نوسان کند موج ایستاده بارزی ایجاد نمی شود.

شکل ۳۵-۴. شکل یک موج ایستاده که با گره ها و شکم ها بر یک ریسمان نشان داده شده است. برسم امواج ایستاده، هر مکان حتی شکم ها نشان داده شود.

شکل ۳۶-۳. بسامدهای تشدید تار: تصویر واقعی از اسباب آزمایشی را نشان می دهد که در آن تار کشیده نشده، از یک سر به یک مولد نوسان و از سر دیگر به گره ای متصل است. به ازای بسامدهای معینی از مولد نوسان، تداخل موجب ایجاد موج ایستاده بارزی (با اصطلاحاً یک-تیر نوسان) در تار می شود. گفته می شود تار در این بسامدهای معین که **پسامدهای تشدید** خوانده می شوند به تشدید درآمده است. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدید نوسان کند موج ایستاده بارزی ایجاد نمی شود.

شکل ۳۷-۴. سه نقش موج ایستاده برای ریسمانی که بین هر گره کشیده شده است.

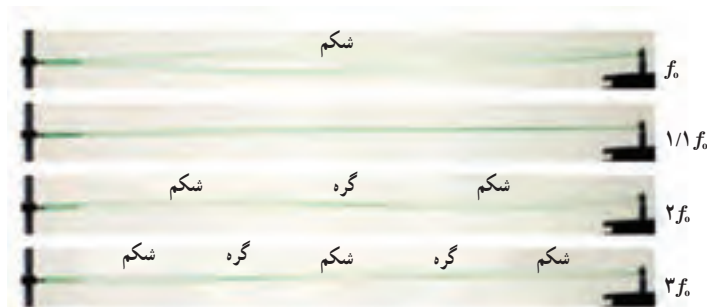
شکل ۳۸-۴. اسباب آزمایشی برای ایجاد موج ایستاده در تار کشیده. توجه کنید سری که به مولد نوسان متصل است تقریباً در محل گره واقع است.

توجه کنید که اگرچه در این آزمایش از یک نوسان ساز الکتریکی برای ایجاد ارتعاش در تار استفاده کردیم، اما در سازهای موسیقی، موج های ایستاده را می توان با ضربه زدن بر تارها (مانند سنتور، سه تار، پیانو) و پوسته ها (مانند طبل، دف، تنبک)، و یا دمیدن در ستون های هوا (مانند نی، فلوت، آوگه) ایجاد کرد.

در آزمایش نشان داده شده در شکل ۳۹-۲، و در بسامدهای تشدید تار، ساده ترین نقش موج ایستاده فقط یک شکم دارد که در مرکز ریسمان واقع است (شکل ۳۷-۴ الف). نقش ساده بعدی وضعیتی است که سه گره و دو شکم داریم (شکل ۳۷-۴ ب). نقش سوم، چهار گره و سه شکم دارد (شکل ۳۷-۴ ج). در حالت کلی اگر طول این تار را با L نشان دهیم برای نقش موج ایستاده ای با

۱۰۶

در اینجا خوب است تأکید شود که اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدید نوسان کند موج ایستاده بارزی تشکیل نمی شود. شکل زیر برای درک این موضوع بسیار آموزنده است.



در حالی که به ازای بسامدهای تشدید f_0 ، $1/1 f_0$ و $2/1 f_0$ موج های ایستاده بارزی در یک تار ایجاد شده اند، به ازای بسامد غیر تشدید $1/1 f_0$ موج ایستاده بارزی تشکیل نشده است.

در این فیلم می بینید که چگونه می توان موج های ایستاده را به سادگی ایجاد کرد.

فیلم

در این فیلم آزمایشی مشابه را برای تشکیل گره و شکم می بینید.

فیلم

در این فیلم ها ایجاد هماهنگی های دوم تا پنجم را می بینید.

فیلم

پاسخ تمرین ۵-۴

از رابطه ۵-۴ ($f_n = n v / 2L$) برای بسامدهای تشدید که در آن

$v = \sqrt{F/\mu}$ است استفاده می کنیم.

الف) با قرار دادن تندی v در رابطه f_n و حل آن برای L خواهیم

داشت :

$$L = \frac{n}{2f_n} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

که به ازای $n = 1$ چنین به دست می دهد

$$L = \frac{1}{2(164/8 \text{ Hz})} \sqrt{\frac{266 \text{ N}}{5/28 \times 10^{-3} \text{ kg/m}}}$$

$$= 0.6277 \text{ m} \approx 0.628 \text{ m}$$

ب) اکنون $F = 209 \text{ N}$ و $L = 0.628 \text{ m}$ را در رابطه بسامد

تشدید قرار می دهیم، و از آنجا بسامد اصلی را به دست می آوریم.

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$$= \frac{1}{2(0.6277 \text{ m})} \sqrt{\frac{209 \text{ N}}{5/28 \times 10^{-3} \text{ kg/m}}}$$

$$= 158/48 \text{ Hz} \approx 158 \text{ Hz}$$

فصل ۳۰ برهم کنش های موج

n شکل داریم :

و در نتیجه :

$$L = n \left(\frac{\lambda}{2} \right)$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4-2)$$

بنابراین بسامدهای تشدید متناسب با این طول موج ها چنین می شود :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5-4)$$

مدهای تونان را با بسامدهای تشدید مشخص می کنند. پایین ترین بسامد را که مربوط به $n = 1$ است، بسامد اصلی و مد مربوط به آن را مد اصلی یا هماهنگ اول می گویند. بسامد هماهنگ دوم به ازای $n = 2$ ، بسامد هماهنگ سوم به ازای $n = 3$ و ... بدست می آید. به n عدد هماهنگ گفته می شود.

مثال ۳-۴

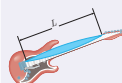
طول یکی از تارهای پیانو $1/10 \text{ m}$ و جرم آن $9/00 \text{ g}$ است. اگر بسامد اصلی این تار 132 Hz باشد، الف) تندی انتشار موج عرضی در تار چقدر است؟ ب) این تار تحت چه کششی قرار دارد؟ ب) بسامدهای چهار هماهنگ نخست این تار چقدر است؟ پاسخ : الف) با استفاده از رابطه ۵-۴ داریم :

$$f_n = \frac{nv}{2L} \Rightarrow (132 \text{ Hz}) = \frac{(1)v}{(2)(0.10 \text{ m})} \Rightarrow v = 26.4 \text{ m/s} = 264 \text{ cm/s}$$

$$\text{ب) از رابطه } v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \Rightarrow \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{F(0.10 \text{ m})}{(9/00 \times 10^{-3} \text{ kg})}} \Rightarrow F = 679/6 \text{ N} = 680 \text{ N}$$

ب) بهیچي است که بسامد هماهنگ اول همان بسامد اصلی است و بنابراین $f_1 = 132 \text{ Hz}$ - بسامد هماهنگ های بعدی طبق رابطه ۵-۴، به ازای $n = 2, 3, 4, \dots$ و $n = 2, 3, 4, \dots$ به دست می آید و بنابراین $f_2 = 264 \text{ Hz}$ ، $f_3 = 396 \text{ Hz}$ و $f_4 = 528 \text{ Hz}$.

تمرین ۵-۴



سنگین ترین تار یک گیتار الکتریک دارای چگالی خطی جرمی $5/28 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$ است و تحت کشش 226 N قرار دارد. این تار در هنگام ارتعاش، شش با بسامد $164/8 \text{ Hz}$ را ایجاد می کند که بسامد اصلی تار است. الف) طول تار را به دست آورید. ب) پس از مدتی که یک تار تازه، این گیتار را می نوازند، در نتیجه گرم شدن و شل شدن تارها، نیروی کشش تار مورد نظر کاهش می یابد و به 209 N می رسد. در این حالت بسامد اصلی این تار چقدر شده است؟

پرسش ۵-۴

الف) چرا با سفت کردن سیم گیتار، بسامدی که هنگام نواختن می شنوید زیاد می شود؟ ب) چرا نوازندگان گیتار بیش از نواختن روی صفحه نمایش، گیتار را به حد کافی می نوازند و سپس آن را مجدداً کوک می کنند؟

۱۰۷

در این فیلم ها چگونگی ایجاد صدا توسط گیتار و چگونگی تأثیر طول و کشش تارها بر آن را مشاهده می کنید.

فیلم

پاسخ پرسش ۵-۴

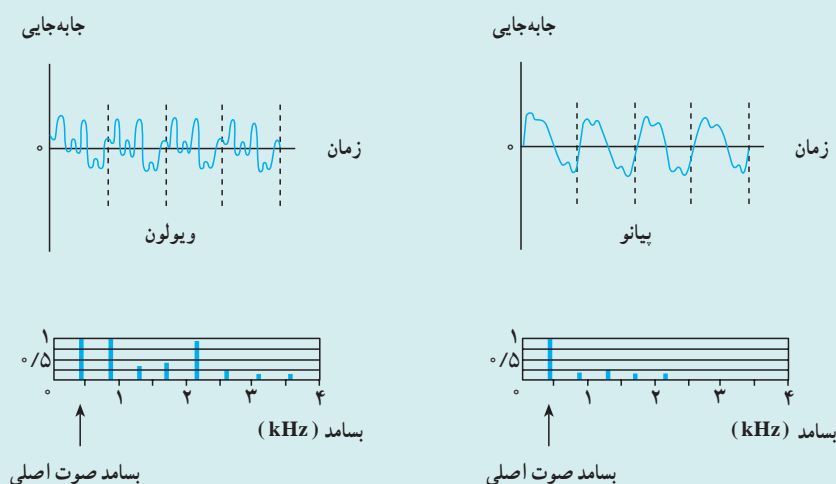
الف) اگر در رابطه $v = \sqrt{F/\mu}$ به جای چگالی خطی جرم، مقدار m/L را قرار دهیم به $v = \sqrt{FL/m}$ می رسم و از آنجا $f_n = n \sqrt{\frac{F}{4Lm}}$ می شود. چون با سفت کردن سیم گیتار جرم و طول آن تغییر چندانی نمی کند ولی کشش F آن زیاد می شود، در نتیجه امواجی سریع تر بر روی سیم روانه می شود و بسامد صدای بالاتری به گوش می رسد. ولی اگر کشی را در بین شست و انگشت خود بکشید، بسامدی که می شنویم تغییر محسوسی نمی کند. دلیل آن است که گرچه کشش افزایش می یابد، ولی همچنین طول آن نیز زیاد می شود و بنابراین بسامد گسیل یافته تغییر محسوسی نمی کند.

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 نوازنده 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. هنگامی که یک تار را مرتعش می‌کنیم، تنها هماهنگ اول آن ایجاد نمی‌شود، بلکه هماهنگ‌های دیگر آن نیز به وجود می‌آیند و از برهم نهی این هماهنگ‌ها یک موج مرکب ایجاد می‌شود. آنچه 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 440 هرتز است. ولی 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 صوت های موسیقی می پردازیم. برای این منظور لازم است چند مفهوم را تعریف کنیم.

۱ صوت موسیقی یا نت، صوتی است که مانند شکل از ارتعاش های منظم تشکیل شده است و اثر خوشایندی بر گوش انسان دارد.

۲ فاصله موسیقی، نسبت بسامد دوت را فاصله موسیقی می نامند. تجربه نشان می دهد که هر فاصله ای برای انسان خوشایند نیست.

۳ گام موسیقی، مجموعه ای از چند نت است که فاصله آنها برای گوش خوشایند است. گام های متفاوتی در موسیقی وجود

دارد. اکنون به توصیف گام طبیعی (زارلن) می پردازیم.

گام طبیعی از هشت نت $do_1, re, mi, fa, sol, la, si, do_2$ تشکیل شده است که فاصله آنها از یک نت مینا (do_1) که کمترین

بسامد را دارد، به صورت زیر است :

$$\frac{do_2}{do_1} = 2, \quad \frac{re}{do_1} = \frac{9}{8}, \quad \frac{mi}{do_1} = \frac{5}{4}, \quad \frac{fa}{do_1} = \frac{4}{3}, \quad \frac{sol}{do_1} = \frac{3}{2}, \quad \frac{la}{do_1} = \frac{5}{3}, \quad \frac{si}{do_1} = \frac{15}{8}$$

بسامد do_2 دو برابر بسامد do_1 است و اکتاو do_1 نامیده می شود. اگر do_2 را نت مینا بگیریم، با رعایت فاصله های فوق می توان

گام دوم را ساخت. به همین ترتیب می توان بر مبنای do_2 که اکتاو do_2 است گام سوم را ساخت و به همین ترتیب ادامه داد.

به عنوان مثال اگر بسامد نت مینا را $65/25$ هرتز اختیار کنیم، با استفاده از نسبت های بالا می توانیم بسامد نت های دیگر را

به دست آوریم. در این صورت داریم :

$$\frac{re_1}{do_1} = \frac{9}{8}$$

$$re_1 = \frac{9}{8} do_1 = 73/41 \text{ Hz}$$

به همین ترتیب بسامدهای $si_1, la_1, sol_1, fa_1, me_1$ برای $122/34$ و $108/75, 97/88, 87, 81/56$ هرتز به ترتیب برای

می آیند. برای do_2 که اکتاو do_1 است بسامد $130/5$ هرتز محاسبه می شود. اکنون می توانیم بر مبنای do_2 گام بعدی را بسازیم.

برای نت های این گام به ترتیب مقدارهای $146/81, 163/13, 174, 195/75, 217/5, 244/69$ هرتز به دست می آیند. هریک

از این نت ها اکتاو نت متناظر در گام اول است (چرا؟) به همین ترتیب برای گام سوم به ترتیب مقدارهای $261, 293/6, 326/25,$

$348, 391/5, 435, 489/38$ هرتز به دست می آیند. این مثال نت های گام طبیعی را بر مبنای قرارداد $435 \text{ Hz} = la_2$ به دست

می دهد. اکنون به عنوان تمرین تعیین کنید که بسامدهای 1044 و 870 هرتز بسامد چه نت هایی هستند و در کدام گام قرار دارند؟

«آیا می‌توانید شکل یک طبل را بشنوید؟»

مقاله‌ای با این عنوان وایده در سال ۱۹۶۶ توسط ریاضیدانی به نام مارک کاک^۱ 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 – 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 بالاتر بعدی مربوط به نقش پیچیده‌تر بعدی است، و الی آخر. همان‌طور که می‌دانیم به این بسامدها، بسامدهای هماهنگ تار و به شکل‌های متناظر آنها مدهای تشدید، 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 تشدید 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، اما 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 دست‌کم 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.

در این فیلم‌ها نمایش از نقش‌های نوسان (موسوم به نقش‌های چلادنی) را می‌بینید.



۱- این مقاله تحت عنوان «Can One Hear the Shape of a Drum» نوشته Mark Kac در اینترنت موجود است. تاکنون به این مقاله ۱۸۶ بار ارجاع داده شده است.

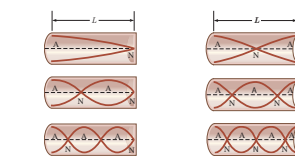
در اینجا خوب است اشاره شود غیر از آلات موسیقایی بادی (نظیر نی، فلوت و ارگ) که با دمیدن ستون های هوا نوای موسیقی ایجاد می کنند، اساس کار آلات موسیقایی زهی (مانند تار، گیتار، ویولن) که با ضربه زدن بر تارهای نوسان، و آلات موسیقایی کوبه ای (مانند طبل، دهل، تنبک) که با ضربه زدن بر پوسته های نوسان کننده، نوایی ایجاد می کنند نیز مبتنی بر دانشی است که در این مبحث ارائه شده است. همچنین توجه داده شود که تشدید در لوله صوتی مثالی از تداخل در یک بُعد امواج است.

در فیلم دمیدن در فلوت هایی با ابعاد مختلف برای ایجاد هماهنگ ها را می بینید.



فیلم

موج ایستاده و تشدید در لوله های صوتی : در مورد ریسمان کشیده دیدیم چگونه برهم نهی موج های پیش رونده در جهت های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می کند. به همین ترتیب می توان موج های صوتی ایستاده را در لوله ای پر شده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج های صوتی در هوای درون لوله حرکت می کنند، از هر انتها باز می تابد و به درون لوله بازمی گردد. حتی اگر آن انتها باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می دهد). درست مانند تار کشیده اگر طول لوله مضرب های مبتنی از طول موج موج صوتی باشد، برهم نهی موج های پیش رونده در جهت های مخالف، نقش موج ایستاده را بازی را در لوله ایجاد می کند. بسیاری از مشخصه های این موج ایستاده مشابه موج های ایستاده در ریسمان است؛ انتهای بسته لوله مانند انتهای ثابت شده ریسمان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد. همچنین فاصله گره های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصله گره ها از شکم های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۳۸-۴ نقش چنین موج ایستاده ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۳۹-۴ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است.^۱



شکل ۳۸-۴ سه مد نخستین یک لوله صوتی با دو انتهای باز (شکوها با A و گره ها با N مشخص شده اند.)

شکل ۳۹-۴ سه مد نخستین یک لوله صوتی با یک انتهای باز (شکوها با A و گره ها با N مشخص شده اند.)

تجربیه ۳۴-۲

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره های قائم مثل لیوان یا پارچ می ریزید، بسامد صدای که می شنوید افزایش می یابد، یعنی صدای زیرتر و زوتری را می شنوید؟ (از صدای صدای حاصل از پر شدن ظرف گستره وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین ترین بسامد تشدید می شود و درون ظرف - بسامد مد اول - منتقل است.)

۱- البته برای انتهای باز یک لوله صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت های تشدید، شکم انتقایی بودن از این انتها قرار دارد که در آن کتاب را در نظر می گیریم.

۲- محاسبات مربوط به لوله های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و باید مورد ازنمایی قرار گیرد.

آزمایش های جالبی برای تحقیق تجربی این موارد وجود دارد که جالب ترین آن معروف به لوله روبین (Rubin's Tube) است که اساس کار آن در شکل های زیر نشان داده شده است.

بلندگویی در فاصله کمی از صفحه دیافراگم لوله ای فلزی قرار دارد که روی آن حفره هایی تعبیه شده است. بلندگو به یک نوسان ساز الکتریکی متصل است که بسامد آن را می توان تغییر داد. با تغییر بسامد صوت به بسامدهایی می رسیم که در آنها دامنه موج های ایستاده زیاد می شود و می توان با افروختن گاز، آن نقاط را تشخیص داد و حتی فاصله بین قله ها را اندازه گرفت و از آنجا به راحتی تندی صوت در گاز را نیز محاسبه کرد.



در این فیلم‌ها اقسامی از آزمایش با لوله روبین را می‌بینید.

فیلم

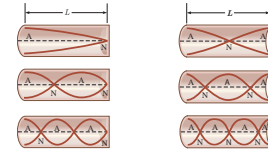
در این فیلم لوله روبین دو بعدی یا تختۀ پایرو را می‌بینید.

فیلم

خوب است با مثال‌هایی که جنبه 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 لوله صوتی یک سر باز است.



موج ایستاده و تشدید در لوله‌های صوتی: در مورد ریسمان کشیده دخیم چگونه برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می‌کند. به همین ترتیب می‌توان موج‌های صوتی ایستاده را در لوله‌ای پر شده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج‌های صوتی در هوای درون لوله حرکت می‌کنند، از هر انتها باز می‌تابند و به درون لوله باز می‌گردند، حتی اگر آن انتها باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته‌تر رخ می‌دهد). درست مانند تار کشیده اگر طول لوله مضرب‌های معینی از طول موج موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستاده پازری را در لوله ایجاد می‌کند. بسیاری از مشخصه‌های این موج ایستاده مشابه موج‌های ایستاده در ریسمان است؛ انتهای بسته لوله مانند انتهای ثابت شده ریسمان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد^۱. همچنین فاصله گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصله گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۳۸-۴ نقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۳۸-۲ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است^۲.



شکل ۳۸-۲ سه مد نخستین یک لوله صوتی با دو انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند).

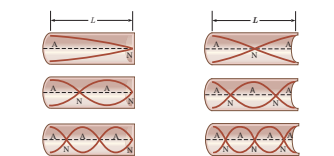
پرسش ۳۸-۴

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزید، بسامد صدای که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیرتر و زوئری را می‌شنوید؟ (اُلف‌هانس: صدای حاصل از برشیدن ظرف گستره وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین‌ترین بسامد تشدید می‌شود و درون ظرف به بسامد مد اول به تنهایی است.)

^۱ البته برای انتهای باز یک لوله صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدید، شکم‌های موج از این انتها فرار دارند که در این کتاب آن را در طرح می‌گیریم.
^۲ محاسبه‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

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 حد شکم امواج در نظر گرفته شود این ذره در راستای طولی لوله با بیشترین دامنه نوسان می‌کند، ولی برای نمایش دادن مطابق شکل‌های ۳۸-۴ و ۳۹-۴، دامنه نوسان‌ها را در قسمت عرضی لوله نشان می‌دهند و این مطلب نباید اشتباه شود که ارتعاشات در راستای عرضی صورت می‌گیرند.

موج ایستاده و تشدید در لوله های صوتی: در مورد ریسمان کشیده دیدیم چگونه برهم نهی موج های پیش رونده در جهت های مخالف قش یک موج ایستاده را ایجاد می کند. به همین ترتیب می توان موج های صوتی ایستاده را در لوله ای پر شده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج های صوتی در هوای درون لوله حرکت می کنند، از هر انتهای باز می تابد و به درون لوله باز می گردد، حتی اگر آن انتهای باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می دهد). درست مانند تار کشیده اگر طول لوله مضرب های معینی از طول موج صوتی باشد، برهم نهی موج های پیش رونده در جهت های مخالف، قش موج ایستاده یازری را در لوله ایجاد می کند. بسیاری از مشخصه های این موج ایستاده مشابه موج های ایستاده در ریسمان است: انتهای بسته لوله مانند انتهای ثابت شده ریسمان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد. همچنین فاصله گره های مجاور از هم برابر $\lambda/4$ و فاصله گره ها از شکم های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۳۸-۳ قش چنین موج ایستاده ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۳۸-۴ این قش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است.^۱



شکل ۳۸-۳ سه مد نخستین یک لوله صوتی با دو انتهای باز (شکم ها با N و گره ها با A مشخص شده اند).

شکل ۳۸-۴ سه مد نخستین یک لوله صوتی با دو انتهای باز (شکم ها با N و گره ها با A و گره ها با A و شکم ها با N مشخص شده اند).

پرسش ۳۸-۴

چرا وقتی آبی را به درون ظرفی با دیوارهای قائم مثل لیوان یا پارچ می ریزید، بسامد صدایی که می شنوید افزایش می یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می شنوید؟ (راهنمایی: صدای حاصل از برندن طرف گسترده وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین ترین بسامد تشدید می شود درون ظرف — بسامد مد اول — منطبق است.)

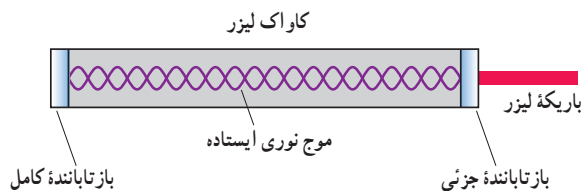
^۱ البته برای انتهای باز یک لوله صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت های تشدید، شکم آنتی نود است و گره نود است. این کتاب را در نظر می گیریم. قرار دارد که در این کتاب از این نظر می گویم. از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید مورد ازنمایی قرار گیرد.

خوب است در اینجا به یک تداخل در یک بُعد دیگر نیز که مربوط به امواج الکترومغناطیسی است و بعداً دانش آموزان به ترتیبی دیگر با آن نیز آشنا می شوند اشاره کرد. به عبارتی امواج الکترومغناطیسی ایستاده را می توان میان دو آینه موازی که نور را به جلو و عقب بازمی تابانند نیز ایجاد کرد. این آینه ها مشابه دو انتهای یک ریسمان کشیده هستند.

این دو آینه مقابل هم اصطلاحاً یک کاواک لیزر را تشکیل می دهند (شکل زیر). چون آینه ها مانند دو انتهای یک ریسمان کشیده عمل می کنند، موج ایستاده نوری باید در سطح هر آینه یک گره داشته باشد. البته یکی از آینه ها بازتابنده کامل نیست و همین سبب می شود که بخشی از نور از کاواک خارج شده و باریکه لیزر را تشکیل دهد. اما این تأثیری بر تشکیل گره روی این آینه نمی گذارد. بنابراین همان رابطه ای 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 ایستاده درون آن نیز برقرار است. یک کاواک نوعی لیزر طولی تقریباً برابر $L = 30 \text{ cm}$ دارد و مثلاً اگر طول موج نور مرئی این لیزر $\lambda = 600 \text{ nm}$ باشد تعداد حلقه های موج ایستاده تشکیل شده در کاواک تقریباً برابر می شود با

$$n = \frac{2L}{\lambda} = \frac{2 \times 30 \text{ m}}{600 \times 10^{-9} \text{ m}} = 10^6$$

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.



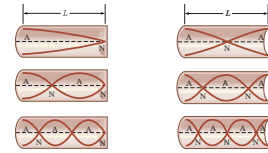
یک کاواک لیزر شامل یک موج نوری ایستاده بین دو آینه موازی است.

پاسخ پرسش ۴-۶

با ریختن آب، فضای هوای داخل ظرف کمتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲۹-۴ کتاب دیده می‌شود، هرچه فضای هوای داخل کمتر شود، طول موج‌های تشدید می‌شوند. به عبارتی، بسامدهای تشدید با طول ستون هوا رابطه معکوس دارند. صدای حاصل از پرشدن ظرف، گستره 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 دهانه لوله) می‌گویند که در دانستنی معلم مربوط، در این مورد توضیح بیشتری داده شده است. هلمهولتز به طور تقریبی نشان داده بود چنانچه شعاع لوله صوتی r باشد، مقدار تصحیح $c = 0.58r$ می‌شود که البته مقدار c به طول موج صوت نیز تا اندازه‌ای بستگی دارد.

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 پر شده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج‌های صوتی در هوای درون لوله حرکت می‌کنند، از هر انتها باز می‌تابند و به درون لوله باز می‌گردند. 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 طول موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستاده پارتی را در لوله ایجاد می‌کند. بسیاری از مشخصه‌های این موج ایستاده مشابه موج‌های ایستاده در ریسمان است؛ انتهای بسته لوله مانند انتهای ثابت شده ریسمان است که در آنجا پایه یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد^۱. همچنین فاصله گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصله گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۳۸-۴ نقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۳۹-۴ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است^۲.



شکل ۳۸-۴ سه مد نخستین یک لوله صوتی با دو انتهای باز (شکوها با $\lambda/4$ و گره‌ها با $\lambda/2$ مشخص شده‌اند).

پرسش ۴-۶
چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزیم، بسامد صدای که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنوید؟ (از فضای صدای حاصل از پرشدن ظرف گستره وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین‌ترین بسامد تشدید هوای درون ظرف — بسامد مد اول — منطبق است.)

۱- البته برای انتهای باز یک لوله صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدید، شکم‌های مدی در آن انتها قرار دارد که در این کتاب از آن به خط می‌گویم.

۲- محاسبه‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و باید مورد آزمایش قرار گیرد.

دانستنی برای معلم

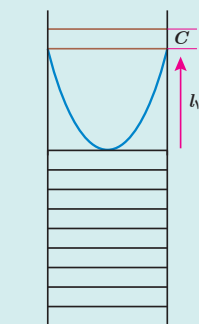
تصحیح دهانه لوله

همان‌طور که در پانویست کتاب نیز اشاره شده است، در واقع شکم دقیقاً در محل دهانه لوله ایجاد نمی‌شود و شکم اندکی از دهانه لوله بالاتر قرار می‌گیرد. بنابراین اگر فاصله یک گره و یک شکم در درون لوله اندازه‌گیری شود، این مقدار از فاصله شکم دهانه تا اولین گره نزدیک به دهانه کوچک‌تر است. یعنی امواج صوتی که از دهانه لوله 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 لوله یک سر باز می‌توانیم شرط تشدید را به صورت زیر نیز بنویسیم

$$l = (2n-1) \frac{\lambda}{4} \quad \text{و} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{به ازای}$$

حال اگر مقدار اضافی طول را به l بیافزاییم، برای دو نخستین مُد نوسان خواهیم داشت:

$$\frac{\lambda}{4} = (l_1 + c)$$



شکل مربوط به نخستین مُد نوسانی

$$\frac{3\lambda}{4} = (l_2 + c)$$

از دو رابطه بالا می توان c را چنین به دست آورد :

$$c = \frac{l_2 - 3l_1}{2}$$

در مورد لوله های با دو سر باز نیز می توانیم شرط تشدید را به صورت زیر بنویسیم :

$$l = 2n \frac{\lambda}{4} \quad \text{و} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

در اینجا نیز می توانیم با طول های تصحیح شده برای دو نخستین مُد نوسان، c را به دست آوریم :

$$\frac{2\lambda}{4} = l_1 + 2c$$

و

$$\frac{4\lambda}{4} = l_2 + 2c$$

$$c = \frac{l_2 - 2l_1}{2} \quad \text{و از آنجا}$$

دانستنی برای معلم

چین (پرده) و فرمت های صوتی

مجرای صوتی انسان در واقع لوله ای است که یک انتهای آن (در حنجره) بسته و انتهای دیگر آن (در دهان و سوراخ های بینی) باز است. اگر امواج صوتی بسامد مناسبی داشته باشند می توانند باعث تشدید هوای درون مجرای صوتی گردند. بسامدهای تشدید هوای درون مجرای صوتی را فرمت می نامند. صدا را عضلاتی موسوم به چین (پرده) صوتی تولید می کنند که در حنجره قرار دارند. وقتی صدا از چین های صوتی به مجرای صوتی وارد می شود، در صورتی که بسامد صوت تولید شده توسط چین های صوتی با بسامد یکی از این فرمت ها منطبق شود، آن صدا برای شنیدن به حد کافی بلند است. می توان با تغییر بسامد فرمت ها از طریق تغییر جای زبان، تغییر میزان باز بودن دهان، یا با گرفتن بینی و... صداهای متنوعی را ایجاد کرد. همچنین می توان با تغییر کشش چین های صوتی بسامد امواج صوتی را که به درون مجرای صوتی فرستاده می شود را تغییر داد. مثلاً خواننده های سوپرانو می توانند به چین های 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 فرمت ها 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 می شود این موجب افزایش بسامدهای فرمت ها می شود و بنابراین صدای با بسامد بیشتری تولید می شود که دیگر برای ما آشنا نیست، اما انجام این شیرین کاری خطرناک است و حتی می تواند کشنده باشد.

خوب است در کنار شکل ۴-۴، تصاویری مانند تصویر زیر را نیز نشان دهید تا دانش آموزان با دانش قبلی‌ای که دارند درک بهتری از مفاهیم این بحث پیدا کنند.



خوب است از جنبهٔ تاریخی اشاره شود که هلمهولتز به عنوان یک پزشک تشدیدگرهای خود را نخستین بار به این دلیل ساخت که با استفاده از آنها به طریقی ابتدایی نوعی آزمون شنوایی سنجی انجام دهد.

محض اطلاعات عمومی خوب است بدانید رابطهٔ بسامد f با قطر دهانه در تشدید گر هلمهولتز از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$f = \frac{nv}{\Upsilon(L + \circ / \wedge d)}$$

که در آن L طول لوله، v تندی صوت در هوا، و d قطر دهانه تشدیدگر است.

در این فیلم آزمایش تشدید در تشدیدگر هلمهولتز را با دیاپازن می بینید.



ياسخ فعالیت ۴-۶

همان طور که در متن درس نیز اشاره شده است یک تشدیدگر هلمهوتر بسامدهایی تشدید می‌دارد و اگر بسامد صوت ایجادشده توسط بلندگو با یکی از این بسامدهای تشدید منطبق شود موجب نوسانات هوای درون بطری (تشدیدگر) می‌شود که این به انحراف شعله شمع یا چرخاندن فرفره می‌انجامد. (در مورد این فعالیت، فیلمی نیز در سایت گروه گذاشته خواهد شد.) توجه کنید سوراخ انتهای تشدیدگر هلمهوتر گذرگاهی برای انتقال تلاطم ایجاد شده در درون تشدیدگر به فضای بیرون است.

● فعالیت ۴-۶

یک بلندگو را در برابر دهانه یک تنبدری گله‌هونز یا سامدهای
مدی معین قرار دهید و جلوی زائده خروجی آن یک سیم روتن
یک فرقه کوچک و کم‌اصطفاک بگذارید. سامده صوت ایجاد
وسط بلندگو را در ترکیبی سامد تنبدری تنبدری آن قدر کم
یاد کنید تا شعله تنبدری منصرف شود و با فرقه شروع به جرجیدن
درصورتی که منبع صوتی با سامد اقل تنظیم بخارید می‌توانید
چند دایره‌وار با سامدهای معلوم و متفاوت، که سامدهی یکی از آنها
بدل آن باشد، که می‌توانید آن را در گروه خود به بحث بگذارید

۱- می‌تواند از برنامه‌هایی با نام‌های Signal Generator, Function Generator, Audio Generator و Sound Generator که روی گوشی همراه نصب می‌شوند نیز به‌عنوان

1-9

در این فیلم آزمایش تشدید در تشدیدگر هلمهولتز را با دستگاه مولد نوسان می بینید.



دانشتني برای معلم

سی‌شی‌ها، یارادوکس بندرگاه و مشابهت آن با بطری هلمهولتز

وقتی یک ظرف دریا، 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 به‌صورت 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 کاملاً 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 نحوه 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 جوب 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 به دست آورید. از آن پس، چلپ و چلوپ آب چنان قوی می شود که حیرت خواهید کرد. مشابه همین چلپ و چلوپ ها در کامیون های حمل بنزین یا واگن های نفتکش نیز می تواند رخ دهد و اگر از کنترل خارج شوند می تواند موجب ناپایداری خود وسایل نقلیه نیز بشوند که این می تواند حتی به تصادف بیانجامد. از همین رو، در داخل این وسایل نقلیه ضربه گیرهایی نصب شده است تا موجب کاهش چلپ و چلوپ مایع گردند. در یک استخر شنا نیز اگر شناگرها به طور هماهنگ و پشت هم در آب ببرند می توانند مُد اصلی نوسان را ایجاد کنند و آب را به چلپ و چلوپ بارزی درآورند.

بندرگاه ها و آبگیرهای کشندی نیز اگر توسط جزر و مد یا آشفتگی هایی نظیر توفان بالا و پایین شوند می توانند سی سی ایجاد کنند که این می تواند خسارت بار باشد. به طور کلی میزان نوسان و در نتیجه احتمال تخریب برای بندرگاه هایی که دهانه رو به دریای باریک تری دارند بیشتر است. یک دلیل آن چیزی است که به آن پارادوکس بندرگاه می گویند. بنابه این پارادوکس، دهانه پهن به انرژی موج ورودی اجازه می دهد تا به عقب (یعنی درون دریا) بگریزد، در حالی که یک دهانه باریک عملاً انرژی موج ورودی را به دام می اندازد. این کاملاً مشابه امواج صوتی است. اگر در دهانه باریک یک بطری نیمه پر نوشابه فوت کنید، می توانید یک صوت بلند را در قسمت خالی بطری ایجاد کنید (مانند بطری هلمهولتز) اما اگر در یک بطری با دهانه پهن فوت کنید، تولید این صوت بسیار سخت و حتی غیر ممکن است.

پاسخ پرسش ۷-۴

هریک از این بطری ها با سطوح مایع متفاوت تشدیدگر هلمهولتز هستند و مانند لوله های صوتی بسامدهای تشدید می دارند. چون سطح مایع در بطری ها متفاوت است، بسامد تشدید متفاوتی نیز دارند (هرچه سطح مایع درون ظرف ها بالاتر و حجم فضای بالای آنها کمتر باشد بسامد تشدید بیشتر است و بالعکس). بنابراین وقتی در دهانه این بطری های یک شکل می دمیم، با ایجاد گستره وسیعی از بسامدها، یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدید بطری ها منطبق می شود و هر بطری با بسامد متفاوتی به صدا درمی آید. بنابراین می توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد.

در این فیلم بسیار زیبا نواختن را با چندین لیوان با سطوح مختلف آب را می بینید.

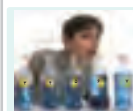


فیلم

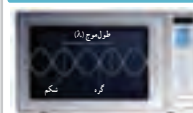
فیلم ۳۸

پرسش ۷-۴

با دمیدن در بطری های یکسان با سطوح مایع مختلف می توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد. دلیل آن چیست؟



فناوری و کاربردهای امواج ایستاده در اجاق های میکروموج



تصویری یک نمایی از اجاق امواج ایستاده در داخل یک اجاق میکروموج

اجاق های میکروموج (مایکروفر) بر اساس تداخل امواج الکترومغناطیسی و تشکیل امواج ایستاده کار می کنند. بسامد امواج ایستاده ایجاد شده در این اجاق ها ۲۴۵۰ GHz و طول موج آنها حدود ۱۲ cm است. میکروموج های بازتابیده از دیوارهای فلزی اجاق با پرمیتهای با موج های تابیده، موج های ایستاده ای را در داخل محفظه اجاق ایجاد می کنند که از گره ها و شکوها تشکیل شده اند. در محل شکوها دامنه نوسان میدان الکتریکی بیشینه است. مولکول های آب موجود در مواد غذایی در این نقاط پهنند.

به ارتفاعی درمی آید و بیشترین افزایش دما ایجاد می شود. در حالی که در محل گره ها، دامنه نوسان میدان الکتریکی صفر است و هیچ نوسان میدان الکتریکی ای نداریم که موجب پختن یا گرم شدن مواد غذایی نشود و در گره ها اصطلاحاً نقاط سرد داریم. بنابراین غذا بطور یکنواخت پخته یا گرم نمی شود. به همین دلیل اجاق های میکروموج صفحه های گردانی دارند تا با گرداندن غذا در اجاق، هیچ بخشی از غذا در گره (نقطه سردی) باقی نماند.

تفاوت ۷-۴

تداخل در امواج الکترومغناطیسی (آزمایش هرتز): اگرچه ماکسول بیش از ۱۰۰ سال قبل از این آزمایش وجود امواج الکترومغناطیسی را پیش بینی کرده بود، این هرتز بود که با آزمایش های تداخلی خود که به تولید موج های الکترومغناطیسی ایستاده انجامید، وجود موج های الکترومغناطیسی را در گستره بسامد رادیویی اثبات کرد. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با وسایلی ابتدایی آن زمان این آزمایش را به انجام رسانید. در مورد چگونگی آزمایش هرتز تحقیق کنید.

پاسخ فعالیت ۷-۴

نوسانگر هرتز در شکل الف نشان داده شده است. مبدل T ، صفحه های فلزی C و C' را باردار می کند. این صفحه ها از طریق شکاف P تخلیه می شوند و بدین ترتیب یک موج الکترومغناطیسی ایجاد می شود. در امتداد خط Px راستای میدان الکتریکی موازی محور y و راستای میدان مغناطیسی موازی با محور z است. هرتز برای مشاهده این موج ها از سیمی که آن را به شکل حلقه درآورده بود و دوسر آن فاصله کمی از هم داشت، استفاده کرد. اگر صفحه این حلقه عمود بر میدان مغناطیسی موج می بود، میدان مغناطیسی متغیر بنا بر قانون القاء فاراده نیروی محرکه الکتریکی القایی در حلقه ایجاد می کرد و این موجب جرقه زدن دو سر باز حلقه می شد. ولی اگر صفحه حلقه با میدان مغناطیسی موازی می بود، هیچ نیروی محرکه الکتریکی ای القا نمی شد و در نتیجه جرقه ای نیز مشاهده نمی شد، هرتز برای ایجاد امواج الکترومغناطیسی استفاده از سطحی فلزی به عنوان بازتابنده استفاده کرد که این در شکل الف در نقطه Q نشان داده شده است. بنابراین موج الکترومغناطیسی پس از

بازتاب از سطح بازتابنده با برهم نهی با موج تابیده، موج های ایستاده مغناطیسی و الکتریکی ایجاد می کند. نشان داده می شود درحالی که موج های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در مسیر رفت هم فازند، در مسیر برگشت کاملاً ناهم فازند و بنابراین همان طور که در شکل ب با وضوح بیشتری نشان داده شده است شکم های موج ایستاده میدان مغناطیسی بر گره های موج ایستاده میدان الکتریکی منطبق می شود و بالعکس. حال اگر حلقه آشکارساز در گره موج ایستاده میدان مغناطیسی قرار گیرد، هیچ نیروی محرکه القایی در آن ایجاد نمی شود و در نتیجه جرقه ای مشاهده نمی گردد. ولی اگر حلقه ای آشکارساز را در محل شکم های موج ایستاده مغناطیسی قرار دهیم، شدیدترین جرقه ها را خواهیم داشت. هرتز با حرکت دادن حلقه آشکارساز در امتداد خط PQ محل های گره ها و شکم های موج ایستاده میدان مغناطیسی را پیدا کرد. او با اندازه گیری فاصله بین دو گره متوالی توانست طول موج λ را حساب کند و چون بسامد f نوسان را می دانست، با استفاده از رابطه $v = \lambda f$ ، تندی موج الکترومغناطیسی را که برابر با تندی نور می شود، به دست آورد. این نخستین مقدار تجربی برای تندی انتشار موج های الکترومغناطیسی بود.

فیروز، ک. ۳۲

پوشش ۷-۴

با دیدن در طری های یکسان با سطوح مایع مختلف می توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد. دلیل آن چیست؟



فناوری و کاربردهای امواج ایستاده در اجای های میکروموج

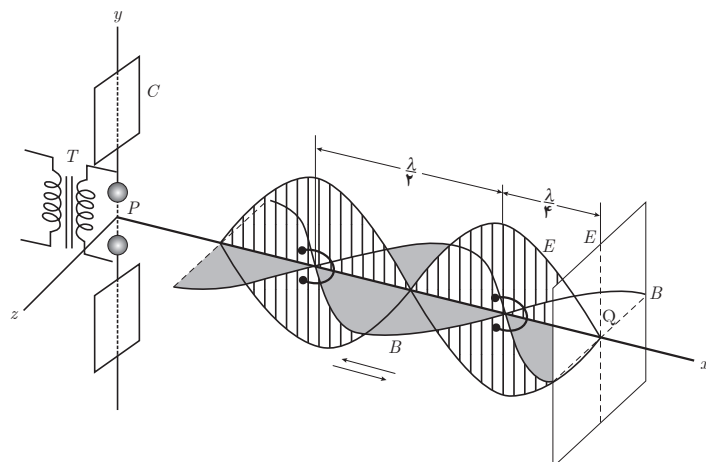


تصویری یک نوعی از ایجاد امواج ایستاده در داخل یک اجای میکروموج

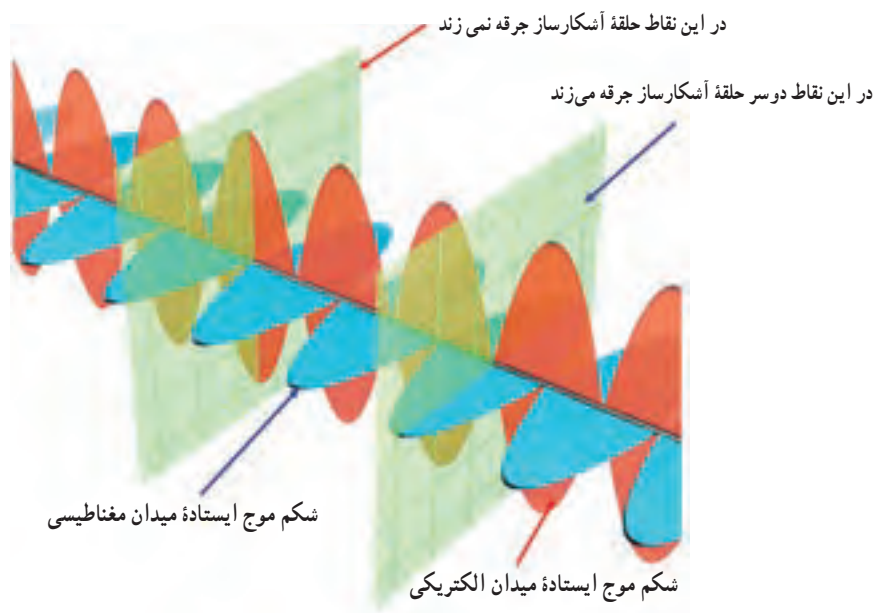
اجای های میکروموج (مایکروفر) بر اساس تداخل امواج الکترومغناطیسی و تشکیل امواج ایستاده کار می کنند. بسامد امواج ایستاده ایجاد شده در این اجای ها ۲۴۵۰ GHz و طول موج آنها حدود ۱۲ cm است. میکروموج های بازتابیده از دیوارهای فلزی اجای با پره نهی با موج های تابیده، موج های ایستاده ای را در داخل محفظه اجای ایجاد می کند که از گره ها و شکم ها تشکیل شده اند. در محل شکم ها دامنه نوسان میدان الکتریکی بیشینه است. مولکول های آب موجود در مواد غذایی در این نقاط پهنند به ارتعاش درمی آیند و بیشترین افزایش دما ایجاد می شود. در حالی که در محل گره ها، دامنه نوسان میدان الکتریکی صفر است و هیچ نوسان میدان الکتریکی ای نداریم که موجب پختن یا گرم شدن مواد غذایی شود و در گره ها اصطلاحاً نقاط سرد داریم. بنابراین غذا به طور یکنواخت پخته یا گرم نمی شود. به همین دلیل اجای های میکروموج صفحه های گردانی دارند تا با گردانن غذا در اجای، هیچ بخشی از غذا در گره (نقطه سردی) باقی نماند.

فعالیت ۷-۴

تداخل در امواج الکترومغناطیسی (آزمایش هرتز) : اگرچه ماکسول پیش از پایان قرن نوزدهم وجود امواج الکترومغناطیسی را پیش بینی کرده بود، این هرتز بود که با آزمایش های تداخلی خود که به تولید موج های الکترومغناطیسی ایستاده انجامید، وجود موج های الکترومغناطیسی را در گستره بسامد رادیویی اثبات کرد. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با وسایل ابتدایی آن زمان این آزمایش را به انجام رسانید. در مورد چگونگی آزمایش هرتز تحقیق کنید.



الف) طرحی از آزمایش هرتز و تشکیل امواج ایستاده الکترومغناطیسی در آن



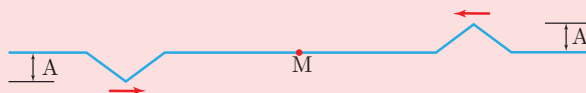
ب) طرحی از امواج ایستاده میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی توجه کنید شکم های یکی بر گره های دیگری منطبق است.

در این فیلم رفتار یک لامپ در اجاق میکروموج (مایکروفر) را می بینید.



پرسش های پیشنهادی

۱ دو تپ مثلی یکسان با دامنه A در امتداد یک تار به سمت یکدیگر حرکت می کنند. در لحظه نشان داده شده در شکل زیر، نقطه M بین دو تپ قرار دارد. وقتی تپ ها از نقطه M بگذرند، دامنه اعوجاج حاصل چقدر می شود؟



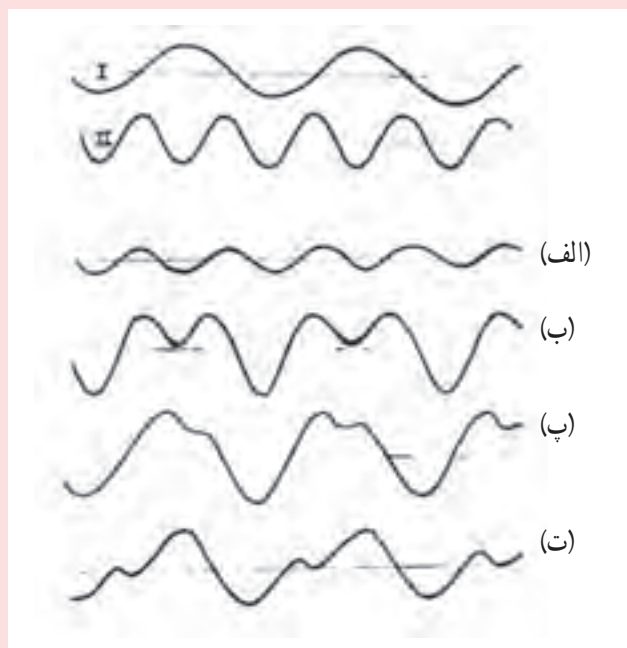
پاسخ : صفر

۲ دیپازنی با بسامد طبیعی مشخص را در بالای یک لوله استوانه ای بلندی با ارتفاع مشخص به ارتعاش در می آوریم و در همان حال آب را به آرامی درون لوله می ریزیم. چه اتفاقی می افتد؟

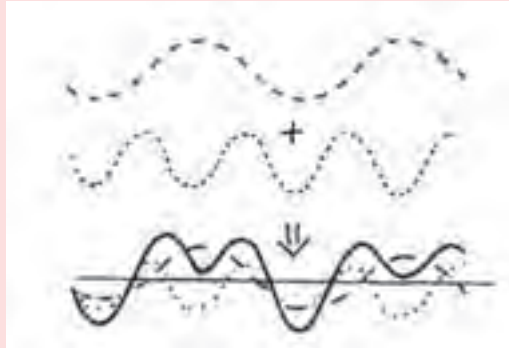
پاسخ : در ارتفاع خاصی از آب، صدای دیپازن به طور قابل ملاحظه ای شدید خواهد شد. زیرا بسامد نوسان طبیعی ستون هوا در لوله با بسامد دیپازن یکی می گردد.

۳ اگر بر فرض آزمایش یانگ در آب انجام شود، پهنای نوارها افزایش می یابد یا کاهش؟
پاسخ : پهنای نوارها متناسب با طول موج به کار رفته است. چون در داخل آب طول موج λ/n می شود، بنابراین کوچک تر از طول موج نور به کار رفته در خلأ است و بنابراین پهنای نوارها کاهش می یابد.

۴ دو موج سینوس I و II برهم نهاده می شوند. به گمان شما کدام یک از شکل های الف تا ت ممکن است حاصل شود؟

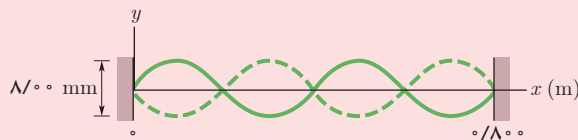


پاسخ: شکل ب. زیرا تقریباً از برهم نهی چنین چیزی حاصل می‌شود.



تمرین پیشنهادی

۱ الف) شکل زیر نقشی از نوسان‌های تشدید تار به طول $L = ۰/۸۰۰ \text{ m}$ و جرم $m = ۲/۵۰۰ \text{ g}$ را نشان می‌دهد که تحت کشش $۳۲۵/۰ \text{ N}$ قرار دارد. الف) طول موج موج عرضی ای 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 $L = ۰/۸۰۰ \text{ m}$ تار نشان می‌دهد. بنابراین داریم:

$$۲\lambda = L$$

و یا

$$\lambda = \frac{L}{۲} = \frac{۰/۸۰۰ \text{ m}}{۲} = ۰/۴۰۰ \text{ m}$$

با شمردن تعداد حلقه‌ها (یا نیم - طول موج‌ها) در شکل درمی‌یابیم که عدد هماهنگ $n=۴$ است. ب) بسامد را از رابطه $f=v/\lambda$ به دست می‌آوریم که در آن

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{FL}{m}} = \sqrt{\frac{(325\text{ N})(0.800\text{ m})}{2.50 \times 10^{-3}\text{ kg}}} = 322/49\text{ m/s}$$

آنگاه برای بسامد f خواهید داشت :

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{322/49\text{ m/s}}{0.400\text{ m}} = 806/2\text{ Hz} \approx 806\text{ Hz}$$

روش دیگر آن بود که مستقیماً از معادله ۴-۵ استفاده کنیم :

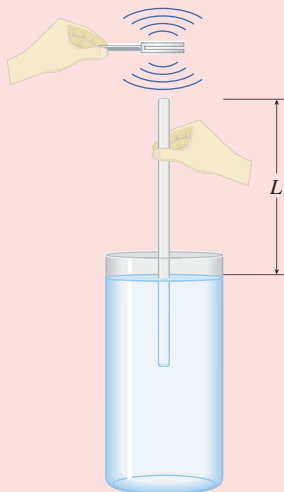
$$f = n \frac{v}{2L} = 4 \frac{322/49\text{ m/s}}{2(0.800\text{ m})} \approx 806\text{ Hz}$$

فعالیت های پیشنهادی

۱ بررسی پدیده تشدید در لوله های صوتی بسته

وسایل مورد نیاز : پنج عدد دیپازن با بسامدهای متفاوت، جعبه دیپازن، کوبه پلاستیکی دیپازن، لوله شیشه ای به قطر ۲ یا ۳ سانتی متر، ظرف استوانه ای

روش آزمایش : ظرف استوانه ای را پر از آب کنید و لوله شیشه ای را در آن قرار دهید. بدیهی است سطح آب در لوله و ظرف یکی خواهد شد. با بالا و پایین بردن لوله می توانید طول ستون هوای درون لوله را به مقدار دلخواهی تنظیم کنید. اکنون اگر شاخه های یک دیپازن 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 دیپازن شده است. با در نظر گرفتن اینکه همیشه در سر باز لوله یک شکم پدید می آید و قسمت انتهای لوله نیز جای گره موج است و با دانستن این مطلب که فاصله دو گره و یا دو شکم متوالی برابر نصف طول موج است می توان طول های ستون هوایی که به تشدید می انجامد را تعیین کرد.



۲ بررسی پدیده تشدید در لوله‌های صوتی باز

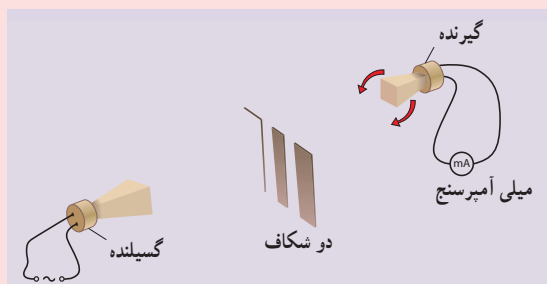
دو لوله دوسر باز را انتخاب کنید که یکی بتواند در داخل دیگری بالا و پایین برود. در این صورت می‌توان طول لوله را به دلخواه تغییر داد و آن را طوری تنظیم کرد که هوای درون لوله بر اثر ارتعاشات شاخه دیاپازن به تشدید درآید. در این صورت با توجه به اینکه همیشه دو سر لوله باز محل تشکیل شکم نوسان‌ها است، طول لوله را برای ایجاد تشدید می‌توان به سادگی محاسبه کرد.

۳ تداخل برای امواج میکروموج

آزمایش تداخل دو شکافی یانگ را می‌توان برای امواج الکترومغناطیسی میکروموج نیز انجام داد. روش کار به این ترتیب است که گسیلنده امواج میکروموج را مطابق شکل الف در برابر یک صفحه دو شکافی قرار می‌دهند. توجه کنید هم گسیلنده و هم گیرنده امواج در فاصله مناسبی از صفحه 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

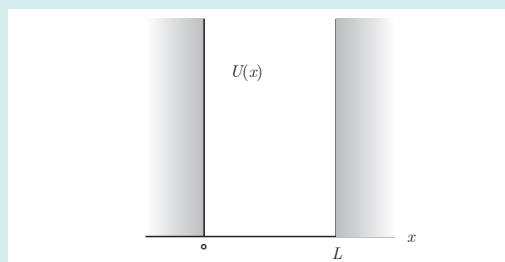
۴ لوله روبین

با کمک دبیر خود بکوشید با وسایل ساده آزمایشگاه یک لوله روبین را که توضیح آن در صفحه ۲۴۹ درست کنید و حد شکم‌ها و محل گره‌های موج را تعیین کنید.

موج های ایستاده رهیافتی مناسب به مبحث فیزیک کوانتومی

با توجه به اینکه فصل ۵ به مقدمات فیزیک کوانتومی می پردازد، بد ندانستم پایان مباحث فصل ۴ را به رهیافتی اختصاص بدهم که برخی کتاب ها از آن طریق وارد مبحث فیزیک کوانتومی می شوند. اگر طول تار مرتعش نامحدود باشد، می توانیم 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 می توانیم روی آن موج های ایستاده ایجاد کنیم که این موج های ایستاده فقط می توانند بسامدهای گسسته ای داشته باشند. به عبارت دیگر، محدود کردن موج به ناحیه محدودی از فضا به کوانتیده کردن حرکت و وجود حالت های گسسته موج می انجامد که در هر حالت بسامد کاملاً مشخصی دارد و به این اصطلاحاً اصل محدودیت می گویند. در سال ۱۹۲۴ فیزیکدان فرانسوی لویی دوبروی بیان کرد همان طور که یک باریکه نور موج است، ولی انرژی و تکانه را از طریق فوتون ها منتقل می کند، یک الکترون متحرک (یا هر ذره دیگر را) را هم می توان به صورت یک موج ماده در نظر گرفت که انرژی و تکانه را به ماده ای دیگر منتقل می کند. بخصوص دوبروی پیشنهاد کرد که رابطه $\lambda = h/p$ را که در آن h ثابت پلانک و p تکانه است، برای طول موج آنها به کار برد. پیش بینی دوبروی در سال ۱۹۲۷ توسط داویسون و جرمر به طور تجربی ثابت شد. بنابراین اصل محدودیت را برای موج های ماده نیز می توان به کار برد. موج ماده یک الکترون متحرک که تحت تأثیر هیچ نیروی خالصی نیست (اصطلاحاً ذره آزاد) می تواند هر مقداری از انرژی داشته باشد که این شبیه تار با طول نامتناهی است که می تواند هر بسامدی داشته باشد. ولی اگر الکترونی را بررسی کنیم که تحت تأثیر نیروی جاذبه کولنی بین خود و هسته باردار مثبت است، انرژی الکترون فقط می تواند در حالت های خاصی باشد که هر یک انرژی گسسته ای مربوط به خود را دارند که این شبیه یک تار کشیده با طول محدود است. در یک تار با طول محدود، نقش های گسسته موج ایستاده آنها هستند که برای آنها طول L تار مضرب صحیحی از نصف طول موج ($L = n\lambda/2$) است که به زبان فیزیک کوانتومی، اصطلاحاً به n عدد کوانتومی گفته می شود.

آنگاه هر جابه جایی عرضی تار در هر مکان x از رابطه $y_n(x) = A \sin(n\pi x/L)$ به دست می آید. در مورد یک موج ماده نیز می توان آن را اصطلاحاً در تله ای محصور کرد، طوری که در حالت یک بعدی به ازای $0 < x < L$ ، $U = 0$ و به ازای $x < 0$ و $x > L$ میل کند که این همان چیزی است که به آن چاه پتانسیل نامتناهی می گوئیم (شکل زیر).



انرژی پتانسیل الکترونی $U(x)$ الکترون محصور در یک تله آرمانی.
می بینیم که به ازای $0 < x < L$ ، $U = 0$ و به ازای $x < 0$ و $x > L$ ، $U \rightarrow \infty$.

دیدیم طول موج دوبروی $\lambda = h/p$ تعریف می شود و چون الکترون غیرنسبیتی است، p را می توان به صورت $p = \sqrt{2mK}$ نوشت که m جرم الکترون و K انرژی جنبشی آن است. در $0 < x < L$ ، $U = 0$ است و بنابراین $K = E$ می شود و داریم

$\lambda = h / \sqrt{2mE}$ و پیش‌تر دیدیم که $L = n\lambda/2$ است. بنابراین خواهیم داشت

$$E_n = \left(\frac{h^2}{8mL^2}\right)n^2, n = 1, 2, 3, \dots$$

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 به راحتی می‌توان به چاه‌های دو و سه بُعدی نیز تعمیم داد. جالب است اگر اگر معادله شرودینگر را برای الکترونی که در چاه پتانسیل نامتناهی یک – بُعدی به پهنای L گیر افتاده است حل کنیم، برای توابع موج الکترون به رابطه زیر می‌رسیم:

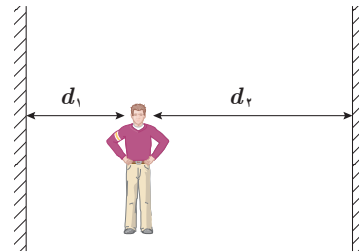
$$y_n = A \sin(n\pi x / L), n = 1, 2, 3, \dots$$

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 ماده ساکن در نظر گرفت. توجه کنید که با همین شبیه‌سازی ساده می‌توانیم بسیاری دیگر از مفاهیم مکانیک کوانتومی ظاهراً خارج از محدوده کتاب‌های درسی، مانند احتمال آشکارسازی که با چگالی احتمال $\Psi_n^2(x)$ داده می‌شود و اصل بهنجارش را به دانش‌آموزان تفهیم کنیم. جالب است که حتی می‌توان انرژی نقطه صفر را بیان کرد، و با توجه به اینکه به ازای $n=0$ ، $E_n=0$ و $\Psi_n^2(x)=0$ 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 $n=0$ قابل قبول نیست و انرژی نقطه صفر که کمترین انرژی مجاز الکترون است مربوط به $n=1$ 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 معادله شرودینگر را به کار برد.

راهنمای پاسخ یابی پرسش ها و مسئله های فصل ۴

۱ در واقع شکلی مانند شکل زیر داریم، به طوری که d_1 فاصله شخص از صخره نزدیک تر و d_2 فاصله شخص از صخره دورتر است.



بدیهی است که پژواک صدای اول مربوط به صخره نزدیک تر و زمان دریافت آن $1/5^{\circ}s$ پس از فریاد زدن و پژواک صدای دوم مربوط به صخره دورتر و زمان دریافت آن $2/5^{\circ}s = 1/5^{\circ}s + 1/5^{\circ}s$ پس از فریاد زدن است. چون مسافت پیموده شده در هر پژواک $2d$ است، به ترتیب داریم:

$$2d_1 = vt_1, \quad 2d_2 = vt_2$$

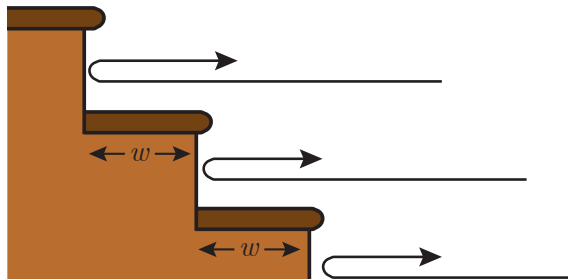
(الف) تندی صوت را از رابطه اول به دست می آوریم

(ب) اکنون با دانستن تندی v می توانیم با استفاده از رابطه دوم، d_2 را محاسبه کنیم:

$$d_2 = \frac{vt_2}{2} = \frac{(320 \text{ m/s})(2/5^{\circ}s)}{2} = 40^{\circ}\text{m}$$

پس فاصله بین دو صخره $d = d_1 + d_2 = 64^{\circ}\text{m}$ است.

۲ اگر فاصله شما از پلکان به حد کافی زیاد باشد، به طوری که بتوان مانند شکل زیر مسیر تپ های متوالی را تقریباً موازی در نظر گرفت، شما بسامد ثابتی برای رشته تپ های متوالی درک می کنید.



مثلاً اگر پهنای هر پله $w = 75^{\circ}\text{cm}$ باشد، بسامد ادراکی

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v}{2w} = \frac{340 \text{ m/s}}{2(0.75 \text{ m})} = 227 \text{ Hz} \approx 2.3 \times 10^2 \text{ Hz}$$

پرسش ها و مسئله های فصل ۴

۳-۴ بازتاب موج

۱. دانش آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیک تر ۲۲-m است. دانش آموز فریاد می زند و اولین پژواک صدای خود را پس از $1/5^{\circ}s$ و صدای پژواک دوم را

پس از $2/5^{\circ}s$ می شنود.

(الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟

(ب) فاصله بین دو صخره را بیابید.

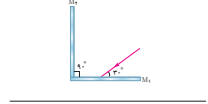
۲. اگر در فاصله مناسبی از یک رشته پلکان بنشینید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای بوم زدن دست می شنوید. نمونه جالبی از این پدیده در پارک وینسنت بعد می شنوید. کوکرتکان در مرکز یک رخ می دهد. این بعد از $1/2$ به سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معدن کوکرتکان

۳. وقتی یک بالونک افقی را به دیوار کلاس می نایم، جد دانش آموزان نقطه رنگی ایجاد شده روی دیوار را می بینند. دلیل آن چیست؟

۴. در شکل زیر برتوهای بلاییده از آینه های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.

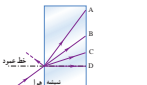


۲-۴ شکست موج

۱. با رسم شکلی از جبهه های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه های موج با رسیدن به یک ساحل ناهموار، تغییر می کند.

۲. شکل زیر برتویی را نشان می دهد که از هوا وارد نیشته شده است.

کدام گزیده های A تا D، می تواند برتوی داخل نیشته را نشان دهد؟



۳. ضرب شکست آب $1/3$ و ضرب شکست نیشته $1/5$ است.

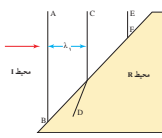
اگر توری به طور مایل از آب به مرز نیشته با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه های موج را در دو محیط نشان دهید.

۴. شکل زیر جبهه های موجی را نشان می دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده اند.

(الف) ادامه جبهه موج EF را در محیط R رسم کنید.

(ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.

۵. آیا با استفاده از این نمودار می توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟



برش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

۳-۲ شکست موج

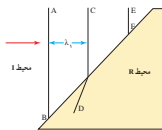
۱. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیب‌دار، تغییر می‌کند.

۲. شکل زیر بر روی آن نشان می‌دهد که از هر دو طرف شیشه شده است. کدام گزیده‌های A، B، C، D می‌تواند بر روی داخل شیشه را نشان دهد؟



۳. ضربت شکست آب ۱/۳ و ضربت شکست شیشه ۱/۵ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.

۴. شکل زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط A و محیط B فرود آمده‌اند. (الف) ادا جبهه‌های موج EF را در محیط B 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؟



۳-۳ بازتاب موج

۱. دانش‌آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیکتر ۲۴۰ m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از ۱/۵ s و صدای پژواک دوم را پس از ۱/۷ s بعد از پژواک اول می‌شنود.

۲. (الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟ (ب) فاصله بین دو صخره را بیابید.

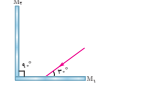
۳. اگر در فاصله تناسلی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای رهم زدن دست می‌شنوید. نمونه‌هایی از این پدیده در برابر رشته به‌های معبد قدیمی کوکرنگان در مکزیک رخ می‌دهد. این پدیده از ۱۲ پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کوکرنگان

۴. وقتی یک پارکله نور را به دیوار کلاسی می‌تابانید، همه دانش‌آموزان فقط رنگی ایجاد شده روی دیوار را می‌بینند. دلیل آن چیست؟

۵. در شکل زیر بر روی پرتوهای بازتابیده از آبهای تخت M₁ و M₂ را رسم کنید.



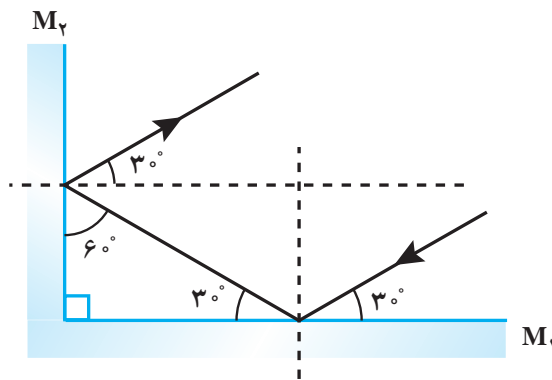
K. Kulkarni Temple

یا به عبارتی 23° Hz می‌شود. این صدا به‌صورت رشته‌ای دوره‌ای از تپ‌ها باز می‌گردد و مانند یک نُت نواخته شده درک می‌شود. بدیهی است اگر پهنای پله‌ها کوچک‌تر باشد، با توجه به اینکه $f \propto \frac{1}{w}$ است، بسامد ادراک شده بیشتر می‌شود.

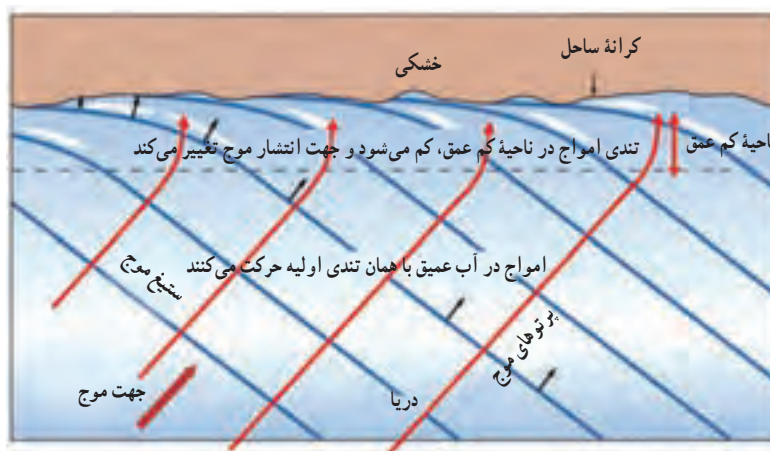
البته در واقع امر، مسیر تپ‌های متوالی که هر کدام از یک پله نشأت گرفته‌اند، موازی نیست و بسامد ثابتی را برای رشته تپ‌های متوالی درک نمی‌کنید؛ بلکه گستره‌ای از بسامدها را درک می‌کنید که به تدریج کم می‌شوند. به‌طوری که بسامد دریافتی از پله‌های پایینی (که تپ‌های بازتابیده از آنها را زودتر می‌شنویم) بیشتر 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.



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 ناحیه عمیق به ناحیه کم عمق، تندی آنها کم می‌شود.



برش ها و مسئله های فصل ۴

۳-۲ بارتاب موج

۱. دانش آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیکتر ۲۴۰m است. دانش آموز فریاد می زند و اولین پژواک صدای خود را پس از ۱.۵s و صدای پژواک دوم را ۱.۷۰s بعد از پژواک اول می شنود.

الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟
ب) فاصله بین دو صخره را بیابید.

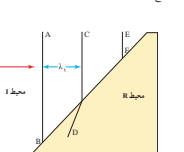
۲. اگر در فاصله تناسلی از یک رشته یکنان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می شنود. نمونه جالبی از این پدیده در برابر رشته بهای معبد قدیمی کوکرنگان در مکزیک رخ می دهد. این معبد از ۹۲ پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کوکرنگان

۳. ضربت گنکست آب ۱.۳ و ضربت گنکست نیشینه ۱.۵ است. اگر توری به طور مایل از آب به مرز نیشینه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه های موج را در دو محیط نشان دهید.

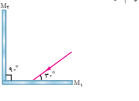
۴. شکل زیر جبهه های موجی را نشان می دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده اند.



۱۱۱

۵. وقتی یک پارکة لیزر را به دیوار کلاس می تابانیم، همه دانش آموزان نقطه رنگی ایجاد شده روی دیوار را می بینند. دلیل آن چیست؟

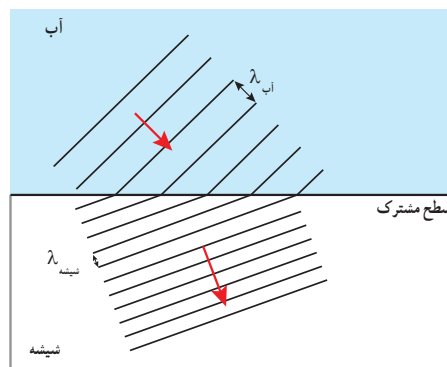
۶. در شکل زیر برتوهای پرتابیده از آبهای تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.



۱. Kukulkan Temple

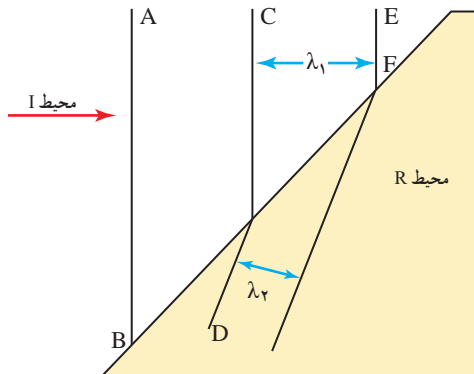
۶ شیشه ضریب شکست بزرگ تری نسبت به هوا دارد. بنابراین انتظار می رود که پرتوی شکسته شده در شیشه به خط عمود نزدیک شود. بنابراین پرتوی A نمی تواند درست باشد، زیرا از خط عمود دور شده است. اگر نور از شیشه وارد هوا می شد، این گزینه درست بود. پرتوی B نیز پاسخ درستی نیست، زیرا این پرتو خم نشده است و در امتداد پرتوی فرودی است. پرتوی C پاسخ درست است زیرا به سمت خط عمود کج شده است. ولی چرا پرتوی D نادرست است. توجه کنید که برای این پرتو، زاویه شکست $\theta_r = 0^\circ$ است و بنابراین $\sin \theta_r = 0$ خواهد که این قانون اسنل را نقض می کند که در اینجا بیان می دارد $n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$.

۷ شکلی مطابق شکل زیر خواهیم داشت (البته در این شکل فاصله بین جبهه های موج در دو محیط به مقیاس نیست، ولی در هر حال، $\lambda < \lambda'$ شیشه است).



۸ الف) ادامه 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 نمی کند. بنابراین نسبت $\frac{v}{\lambda}$ ثابت می ماند و داریم

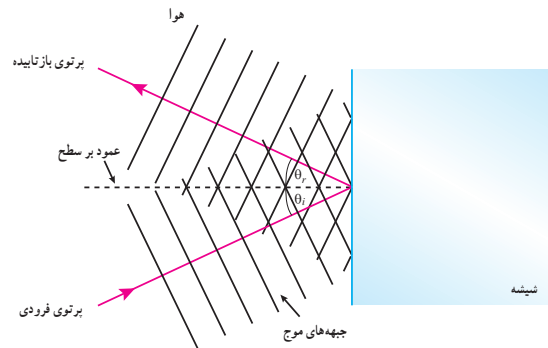
$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$



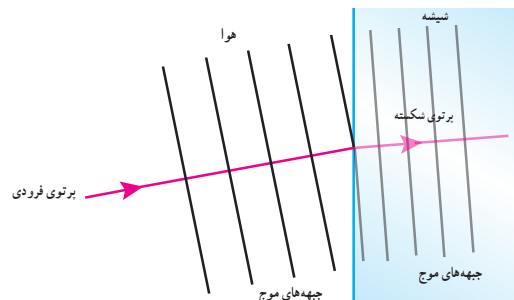
از روی شکل درمی یابیم که $\lambda_2 < \lambda_1$ و بنابراین $v_1 > v_2$ است. به عبارتی با دانستن فاصله بین جبهه های موج در دو محیط می توان درباره نسبت تندی موج در دو محیط اظهار نظر کرد. مثلاً برای شکل داده شده در این مسئله نسبت λ_2 به λ_1 تقریباً $1/6$ می شود که همان نسبت v_1 به v_2 نیز هست.

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 خط عمود نزدیک شود. در حل چنین مسائلی نخست پرتوی موج را رسم کنید و سپس جبهه‌های موج را به گونه‌ای رسم کنیم که این پرتو عمود بر آنها باشد. در مورد جبهه‌های موج بازتابیده، چون در خود محیط بازتابیده می‌شوند، فاصله 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 فاصله جبهه‌های موج در شیشه، کوتاه‌تر است.



۱۰ الف) بسامد را از رابطه $f = v/\lambda$ محاسبه می‌کنیم که در آن $v=c$ تندی نور است :

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{633 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4.74 \times 10^{14} \text{ Hz} \approx 4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

(ب)

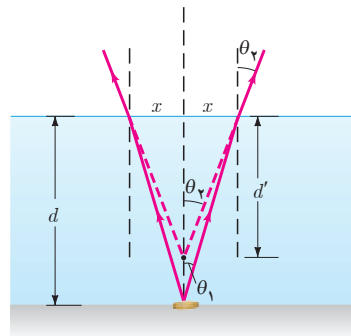
$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{633 \times 10^{-9} \text{ m}}{474 \times 10^{-9} \text{ m}} = 1.335 \approx 1.34$$



$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.335} = 2.247 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$$

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 زاویه کوچکی از خط 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 خط 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.



به طور محاسبه‌ای هم می‌توانیم رابطه‌ای به دست آوریم. چون در این وضعیت زاویه‌ها 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

$$\tan \theta_2 \approx n_1 \tan \theta_1 \Rightarrow \frac{x}{d'} \approx n_1 \frac{x}{d}$$

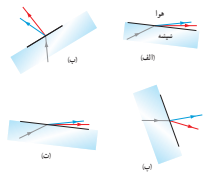
و در نتیجه — $d' \approx \frac{d}{n}$.

بنابراین برای شخصی که تقریباً به طور عمود نگاه می‌کند، عمق ظاهری $\frac{1}{n}$ عمق واقعی می‌شود ولی توجه کنید که در این حالت جابه‌جایی افقی ناچیز است. ولی اگر کسی به طور مایل نگاه کند، افزون بر جابه‌جایی قائم، یک جابه‌جایی افقی نیز وجود دارد و همان طور 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 زاویه حد به سطح جدایی می‌تابند.

۱۲ از قانون اسنل استفاده می‌کنیم :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

۱۱۳. در شکل زیر موج زری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است، از شیشه وارد هوا رفیق شده است. کدام شکل، شکست نور را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



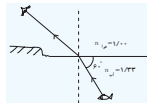
ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست یافته را رسم کنید.

۱۱۴. طول موج نور قرمز لیزر هلیوم - نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجیه جنس Teflon 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.

۱۱۵. سکه‌ای را در گوشه‌ای خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار بگیرید که توانید سکه را ببینید. سپس یک آینه عمود را حرکت دهید تا سکه را در همان آب ببینید. به طوری که آب رختن شما موجب چاهجانی سکه نشود. با پرسیدن فضا، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.



۱۱۶. مطابق شکل، پرتو نوری که از مایه به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویه 40° به مرز آب - هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

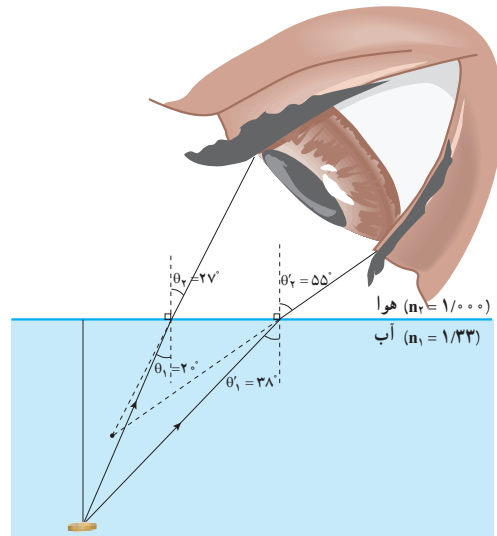


۱۱۷. گونی‌های هزاره با امواج رادیویی با بسامد حدود ۱GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع برتابیده می‌شوند و به منطقه سایه‌ای مانع می‌رسند.

۱۱۸. در یک تست موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با پارک کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.

۱۱۹. در یک تست موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با پارک کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.

۱۲۰. در یک تست موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با پارک کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.



که در اینجا n_1 و n_2 به ترتیب ضریب شکست آب و هوا، و θ_1 و θ_2 به ترتیب زاویه پرتوی نور نسبت به امتداد قائم در محیط‌های آب و هوا است. بنابراین داریم

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} = \frac{(1/33) \sin 3^\circ}{1/00} = 0/665$$

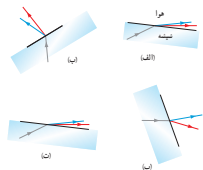
و از آنجا $\theta_2 = 41/7^\circ \approx 42^\circ$ می‌شود.

۱۲۱ نخست توجه کنید عددهای داده شده برای ضریب شکست‌ها صرفاً برای مقایسه 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 درست» از خط عمود دور شوند و دیگر اینکه به پاشندگی نور توجه کنیم و ترتیب و توالی شکست پرتوها درست باشد. بنابراین نخست باید خط عمود را رسم کنیم. از آنجا درمی‌یابیم که شکل (ب) اصلاً از لحاظ منطقی نادرست است. پرتوی قرمز تقریباً در امتداد خط عمود و پرتوی آبی در سمت نادرست (سمت چپ خط عمود) شکسته شده است. شکل (پ) این مشکل را ندارد و پرتوها در سمتی درست شکسته شده‌اند، ولی اگر توجه کنیم درمی‌یابیم که پرتوی آبی به خط عمود نزدیک شده است و بنابراین کلیت 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 خط 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.

۱۲۲ 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 کل مجموعه 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 به کار 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 نتیجه کار از برهم نهی امواج تداخلی

۱۱. در شکل های زیر، بر روی فرودی که شامل فرودهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



۱۲. دو دانش آموز به نور زرد نگاه می کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می داند. به نظر شما با چه تجربه ای می توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۱۳. توضیح دهید با باریک کردن شکاف ها چه شکلی برای جبهه های موج خروجی از آنها حاصل می شود.

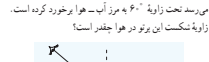


۱۴. گونی های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراکنده می شوند و به منطقه سایه مانع می رسند.

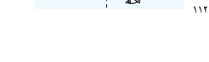
۱۵. در یک تست موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک کردن شکاف ها چه شکلی برای جبهه های موج خروجی از آنها حاصل می شود.



۱۶. مطابق شکل، بر روی قوری که از مایه به چشمان مشخص می رسد تحت زاویه 60° به مرز آب - هوا برخورد کرده است. زاویه شکستی این نور در هوا چقدر است؟

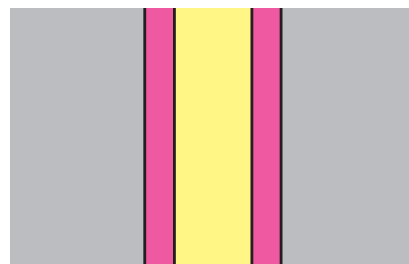
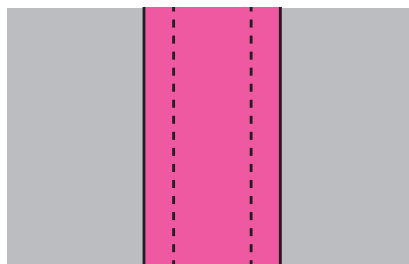
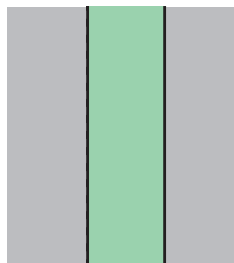


۱۷. طول موج نور قرمز نور طیف - تون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجیه چشم ۲۷۲nm است. بسامد این نور چقدر است؟ (با فرض شکست زجاجیه برای این نور سکالر را در گوشه فضای خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که توانید سکه را ببینید. سپس ی آنکه موثران را حرکت دهید تا زمانی در فضا آب می بینید، به طوری که آب ریختن شما موجب چاه جایی سکه شود. با برداشتن فضا، سکه را خواهید دید. با رسم برتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.



قرمز و سبز حاصل می شود. به عبارتی، توجه کنید که اگر نور سبز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک در میان از قرمز و تیره حاصل می شد، و اگر نور قرمز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک در میانی از سبز و تیره حاصل می شد. حال در حضور این دو نور، نوارهای داخلی آنها روی هم می افتد. ولی توجه کنید که این برهم افتادن به طوری نیست که نوارها کاملاً برهم منطبق شوند. در واقع چون طول نوارهای تداخلی به طول موج به کاررفته مربوط است و هر چه طول موج بزرگ تر باشد، آنها نیز طویل ترند، بنابراین در همپوشانی، نوارها کاملاً بر هم منطبق نمی شوند.

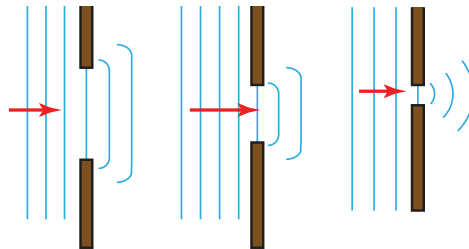
برای مثال، نوار روشن مرکزی را در نظر بگیرید. وقتی نوارهای تداخلی حاصل از نور سبز و حاصل از نور قرمز را بر هم بنهیم، گل نوار سبز به نوار زرد تبدیل می شود، ولی اطراف آن تا سر نوارهای تاریک حاشیه های قرمز خواهند داشت. بنابراین نتیجه می گیریم که نور زرد ترکیبی باعث نوار مرکزی زرد رنگی می شود که کوتاه تر از نوار زرد مرکزی حاصل از یک نور زرد تکفام است؛ ضمن آنکه اطراف آن نیز ته رنگ قرمزی می گیرد.



(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 میانه نوار مرکزی هم نواری کاملاً سفید خواهیم داشت که از همپوشانی همه 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).



۱۵ با باریک کردن پهنای شکاف، پدیده پراش به طور 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 به صورت امواج نیم‌دایره‌ای گسترده می‌شوند.



۱۶ نخست طول موج این امواج را محاسبه می‌کنیم:

$$\lambda = v / f = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 10^9 \text{ s}^{-1}} = 0.15 \text{ m} \approx 15 \text{ cm}$$

این امواج از اجسامی به قطری حدود ۱۵cm یا کوچک‌تر، به خوبی پراشیده می‌شوند.

فصل ۱۷ : برهم کنش های موج

۲۰. در آزمایش تداخل صوتی (شکل ۲۰-۱ کتاب)، فاصله بین هر نقطه با صدای بالا (A) تا نقطه با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول موج صوتی به کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش به سادگی انجام پذیر باشد باید فاصله نقطه های S و A مجاور به خیلی زیاد، و نه خیلی کم باشد. (الف) بسامد صوت گسیل شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا فاصله های S و A مجاور به هم نزدیک شوند؟
(ب) بسامد صوت گسیل شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا فاصله های S و A مجاور از هم دور شوند؟

۲۱. در آزمایش یانگ، (الف) اگر آزمایش را به جای نور تکفام سبز با نور تکفام قرمز انجام دهیم پهنای هر تار تاریک یا روشن چه تغییری می کند؟
(ب) اگر آزمایش را به جای آنکه در هوا انجام دهیم، در آب انجام دهیم، پهنای هر تار تاریک یا روشن چه تغییری می کند؟

۲۲. تاری که بین دو نیکه گاه معکوم شده است در هاشک اول خود با بسامد f به نوسان درمی آید. شکل زیر جابه جایی تار در $t=0$ را نشان می دهد.



(الف) جابه جایی تار را در $t = \frac{1}{4}T$ و $t = \frac{1}{2}T$ رسم کنید.

(ب) فاصله بین نیکه گاه ها 10 cm است. اگر تندی موج عرضی در تار 22 m/s باشد، نوسان تار چقدر می شود؟

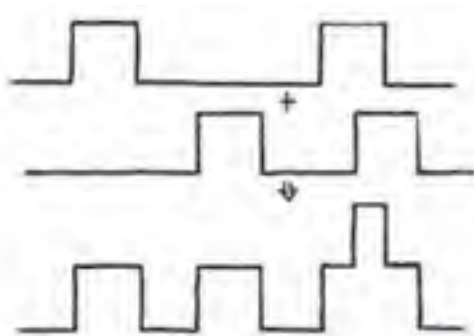
۲۳. اگر دوقلوی که طول آن 150 cm است در دو انتها بسته شده است، در شک خود نوسان می کند. تندی موج عرضی در این تار 25 m/s و تندی صوت در هوا 340 m/s است. (الف) بسامد و به طول موج صوتی گسیل شده از تار چقدر است؟

(ب) اگر بسامد اصلی یک تار بویون به جرم 80 mg و طول 22 cm و تار 92 Hz باشد،

(الف) تندی موج عرضی در این تار را به دست آورید.

(ب) کشش تار چقدر است؟

۱۷ از برهم نهی این دو موج، شکلی مانند زیر حاصل می شود :



۱۸ جابه جایی کل، جمع برداری هر جابه جایی مجزا است. چون جابه جایی های نقطه M در جهت های مخالف هم هستند، جمع برداری آنها برابر $y_1 - y_2$ می شود که چون $y_1 > y_2$ است، مقداری مثبت است.

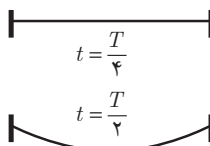
۱۹ در نقطه P قله (ستیف) موج ها همدیگر را قطع کرده اند و برهم نهاده شده اند و بنابراین تداخل کاملاً سازنده و دامنه موج برآیند بیشینه است. اما در نقطه Q قله (ستیف) یک موج با دره (پاستیف) موج دیگر تلاقی کرده است (توجه کنید که Q بر یک منحنی آبی و در میان دو منحنی قرمز است) و بنابراین همدیگر را تضعیف می کنند و دامنه کمینه است.

۲۰ الف) چون فاصله نقطه های S و A متناسب با طول موج به کار رفته است، بنابراین برای آنکه نقطه های S و A به هم نزدیک باشند باید طول موج به کار رفته کوچک باشد. با توجه به اینکه $f = v/\lambda$ است نتیجه می گیریم که این معادل با افزایش بسامد صوت است.
ب) برای آنکه نقطه های S و A از هم دور شوند باید طول موج به کار رفته بزرگ باشد. با توجه به اینکه $f = v/\lambda$ است نتیجه می گیریم که این معادل با کاهش بسامد صوت است.

۲۱ الف) پهنای نوارهای تداخلی در آزمایش یانگ متناسب با طول موج به کار رفته است. بنابراین با افزایش طول موج، پهنای نوارها زیاد می شود. پس پهنای نوارها با استفاده از نور تکفام قرمز به جای نور تکفام سبز، افزایش می یابد.

ب) چون پهنای نوارهای تداخلی با طول موج به کار رفته متناسب است، با توجه به اینکه در حضور آب طول موج به λ/n تغییر پیدا می کند و کم می شود، بنابراین طول موج به کار رفته کاهش می یابد که این به معنای کاهش پهنای نوارها است. (توجه! در متن درس فقط به رابطه پهنای نوارها با طول موج پرداخته شده است. خوب است بدانید دو راه دیگر تغییر پهنای نوار، یکی تغییر دادن فاصله شکاف ها تا پرده، و دیگری تغییر فاصله شکاف ها از هم است.)

۲۲ الف) چون دوره تناوب برابر با عکس بسامد است ($T = 1/f$)، بنابراین $t = \frac{1}{4f}$ معادل با $\frac{1}{4}T$ و $t = \frac{1}{4f}$ معادل با $\frac{1}{4}T$ است. به عبارتی در زمان $\frac{1}{4}$ دوره گذشته است و در زمان $t = \frac{1}{4f}$ ، نصف دوره. پس شکل ها (در مشابهت با شکل های ۴-۳۴ کتاب) چنین می شوند :



(ب) از $v=f\lambda$ استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه $\frac{\lambda}{\lambda} = 1/m$ است، خواهیم داشت:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{240 \text{ m/s}}{2/m} = 1/2 \times 10^2 \text{ s}^{-1} = 1/2 \times 10^2 \text{ Hz}$$

و یا به عبارتی 120 Hz می‌شود.

۲۳ الف) باید از رابطه $5-4$ استفاده کنیم

که در اینجا $n=1$ است:

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{(1)(250 \text{ m/s})}{2(0.150 \text{ m})} = 833 / 3 \text{ Hz} \approx 833 \text{ Hz}$$

توجه کنید که بسامد موج روی تار همان بسامد موج صوتی است که تولید می‌شود. (ب) همان‌طور که گفتیم f بسامد موج صوتی است و بنابراین برای طول موج موج صوتی گسیل‌شده داریم

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{348 \text{ m/s}}{833 / 3 \text{ s}^{-1}} = 0.4176 \text{ m} \approx 0.418 \text{ m}$$

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 رابطه $4-4$ کتاب نیز می‌توانید ببینید). بسامد برابر $f = v/\lambda = v/2L$ است که در آن v تندی موج روی تار ویولن است. بنابراین

$$v = 2Lf = 2(0.220 \text{ m})(920 \text{ Hz}) = 404 \text{ m/s} \approx 405 \text{ m/s}$$

که البته می‌توانستیم آن را به‌طور مستقیم با استفاده از رابطه $5-4$ 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:

$$F = \mu v^2 = \left(\frac{m}{L}\right) v^2 = \left(\frac{80 \times 10^{-6} \text{ kg}}{22 \times 10^{-2} \text{ m}}\right) (404 \text{ m/s})^2$$

$$= 0.9595 \text{ N} \approx 0.960 \text{ N}$$

(پ) برای بسامد اصلی، طول موج موج عرضی در تار $\lambda = 2L$ است و بنابراین

$$\lambda = 2L = 2(0.220 \text{ m}) = 0.440 \text{ m}$$

بسامد صوت در هوا همان بسامد نوسان سیم است. ولی به‌خاطر تندی متفاوت صوت، طول موج متفاوت می‌شود. اگر هوا را با شاخص پایین a نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\lambda_a = \frac{v_a}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{920 \text{ s}^{-1}} = 0.3696 \text{ m} \approx 0.370 \text{ m} = 37.0 \text{ cm}$$

شکل ۱۴-۲: برهم‌کنش موج

۴-۲ در آزمایش‌های صوتی (شکل ۱۴-۲ کتاب)، فاصله بین هر نقطه با صدای بالا (A) تا نقطه با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول موج موج صوتی به‌کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش بسادگی انجام‌پذیر باشد باید فاصله نقطه‌های S و A مجاور به‌خوبی زیاد، و نه خیلی کم باشد. الف) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و A مجاور به‌هم نزدیک شوند؟

ب) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و A مجاور از هم دور شوند؟

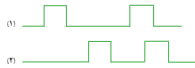
۴-۲ در آزمایش‌های الکتریکی (الف) اگر آزمایش را به‌جای تار تک‌م‌ساز با تار تک‌م‌ساز انجام دهیم، بهای هر تار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟

۴-۲ در آزمایش‌های الکتریکی (الف) اگر آزمایش را به‌جای تار تک‌م‌ساز با تار تک‌م‌ساز انجام دهیم، بهای هر تار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟

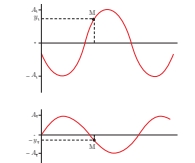
۴-۲ در آزمایش‌های الکتریکی (الف) اگر آزمایش را به‌جای تار تک‌م‌ساز با تار تک‌م‌ساز انجام دهیم، بهای هر تار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟

۱۱۳

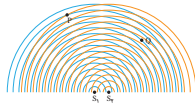
۴-۲ در آزمایش‌های صوتی (شکل ۱۴-۲ کتاب)، فاصله بین هر نقطه با صدای بالا (A) تا نقطه با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول موج موج صوتی به‌کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش بسادگی انجام‌پذیر باشد باید فاصله نقطه‌های S و A مجاور به‌خوبی زیاد، و نه خیلی کم باشد. الف) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و A مجاور به‌هم نزدیک شوند؟



۴-۲ در آزمایش‌های صوتی (شکل ۱۴-۲ کتاب)، فاصله بین هر نقطه با صدای بالا (A) تا نقطه با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول موج موج صوتی به‌کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش بسادگی انجام‌پذیر باشد باید فاصله نقطه‌های S و A مجاور به‌خوبی زیاد، و نه خیلی کم باشد. الف) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و A مجاور به‌هم نزدیک شوند؟



۴-۲ در آزمایش‌های صوتی (شکل ۱۴-۲ کتاب)، فاصله بین هر نقطه با صدای بالا (A) تا نقطه با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول موج موج صوتی به‌کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش بسادگی انجام‌پذیر باشد باید فاصله نقطه‌های S و A مجاور به‌خوبی زیاد، و نه خیلی کم باشد. الف) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و A مجاور به‌هم نزدیک شوند؟



A diagram of a beam balance. A horizontal beam is supported by a central pivot. On the left side, there are two weights hanging from the beam at points A and B. On the right side, there are three weights hanging from the beam at points D, E, and F. The beam is labeled with points A, B, C, D, E, F, and G from left to right. Point C is the pivot point. The beam is shown in a horizontal position, indicating it is balanced.

در گذشته برای آگاه کردن کشتی‌ها از خطر صخره‌ها، در صدف‌های حلزونی می‌دمیدند. امروزه بیشتر برای جشن‌ها و مادی‌ها در آنها می‌دمند. چگونه این صدف‌ها می‌توانند چنین سباج ایجاد کنند؟



در بسامد تشدید ی یکسانی نوسان کنند؟

112

همان بسامد اصلی (پایه) است. پس بسامد هماهنگ بعدی پس از 195Hz برابر با $195\text{Hz} + 65\text{Hz} = 260\text{Hz}$ است. اگر بررسی کنیم عدد هماهنگ این بسامد تشدید 4 است.

۲۸ الف) اگر بررسی کنید درمی یابید تفاوت بسامدهای تشدید برای 75Hz است و چون بسامد کمتر از 40°Hz خواسته شده است، پس بسامد مورد نظر همان 75Hz است.

ب) بسامد پنج هماهنگ اول به ترتیب برابر با 75Hz ، 150Hz ، 225Hz ، 300Hz ، و 375Hz شده است که به ترتیب هماهنگ‌های اول تا پنجم هستند. بنابراین بسامد هماهنگ هفتم برابر است با: $f_7 = 7(75\text{Hz}) = 525\text{Hz}$.

۲۹ توجه کنید آنچه در توصیف چگونگی انجام این آزمایش آمده است، صرفاً برای آن است. که مسئله از جنبه انتزاعی خارج شده و عملاً انجام پذیر باشد. اگر تار در نقطه C محکم گرفته شود، نوسان‌های تار به سمت راست منتقل نمی‌شوند. بنابراین در انجام این تجربه، چگونگی گرفتن تار در نقطه C مهم است و تا آنجا که ممکن است باید به آرامی گرفته شود. در این صورت، موج ایستاده‌ای مانند شکل زیر بر تار ایجاد می‌شود به طوری که نقطه‌های A ، C ، E ، G و گره‌ها و نقطه‌های B ، D ، 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 ۴-۶ 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، اندازه بسامدهای تشدید کمتر می‌شوند (این بسامدها با طول ستون هوا نسبت معکوس دارند). صدای حاصل از خالی شدن ظرف، گستره وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با بسامد تشدید 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 دهانه 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 $332/5\text{Hz}$ بود و بنابراین نوسان‌های لب در آن بسامد باعث تشدید در درون صدف در همان بسامد می‌شد.

فصل پنجم

آشنایی با فیزیک اتمی

۵-۱- اثر فوتوالکتریک و فوتون

۵-۲- طیف خطی

۵-۳- مدل اتمی رادرفورد - بور

۵-۴- لیزر

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۵

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵

- 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 محدوده 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 بازه زمانی بوده است.
 - اثر فوتوالکتریک براساس دو فرضی که اینشتین کرد به درستی تبیین شد.
 - تابش الکترومغناطیسی (نور) به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی است که انرژی هر بسته با بسامد موج متناسب است.
 - هر بسته 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 اختراعات 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 در نظر گرفته شود؟

- آیا نظریه‌ها و قانون‌های فیزیک کلاسیک قادر به تبیین همه 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 باریکه لیزر چیست؟

در پایان این واحد یادگیری دانش آموزان 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 شناسه 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 دهه ابتدایی قرن) توضیح دهند.
- نحوه کار لیزر را به کمک مفاهیمی که آموخته است شرح دهد.

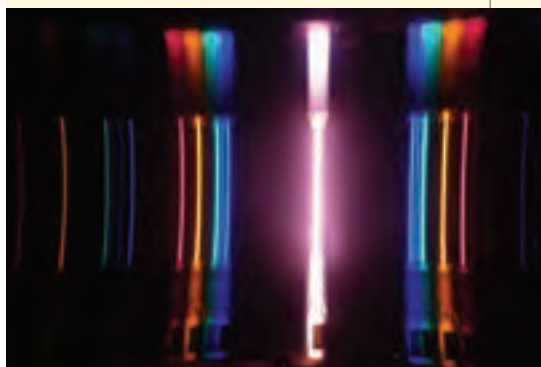
بودجه‌بندی پیشنهادی

- جلسه اول و دوم : نگاهی به تصویر شروع فصل و مقدمه فصل + بخش ۵-۱
 - جلسه سوم و چهارم : بخش ۵-۲
 - جلسه پنجم و ششم : بخش ۵-۳
 - جلسه هفتم : بخش ۵-۴ و تمرین‌های مربوطه
 - جلسه هشتم : آزمون تشریحی فصل ۵
- بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل را در جلسه‌های مختلف توزیع کنید.



فصل

آشنایی با فیزیک اتمی

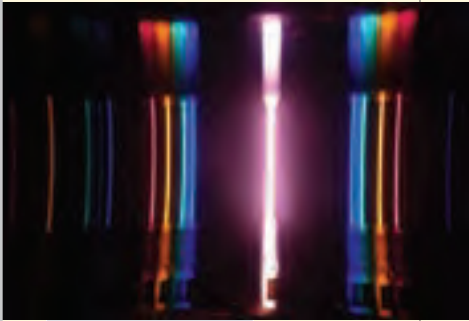


چرا وقتی به الکترودهای دو سر لامپ‌های جاری گاز رقیق و کم‌فشار عناصری مانند هیدروژن، هلیوم، جیوه یا نئون، ولتاژ بالایی را اعمال می‌کنیم تیرج به گسیل نور به رنگ‌های مختلف می‌کنند؟

پیش‌نیازها

- ۱-۵ اثر فوتوالکتریک و فوتون
- ۲-۵ طیف خطی
- ۳-۵ مدل اتم رادرفورد-بور
- ۴-۵ لیزر

راهنمای تدریس



 فصل

آشنایی با فیزیک اتمی

چرا وقتی به الکترودهای دو سر لامپ‌های جاری گاز رقیق و کم فشار عناصری مانند هیدروژن، هلیوم، جیوه یا نئون، ولتاژ بالایی را اعمال می‌کنیم شروع به گسیل نور به رنگ‌های مختلف می‌کنند؟

پیش‌ها

- ۱- اثر فوتوالکتریک و فوتون
- ۲- طیف خطی
- ۳- مدل اتم رابرت بورد-بور
- ۴- لیزر

پس از توجه دادن دانش‌آموزان به تصویر شروع فصل و مقدمه 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 به صورت یک بحث تاریخی) را با دانش‌آموزان در میان بگذارید.

ادامه راهنمای تدریس

۱-۵ اثر فوتوالکتریک و فوتون

اثر فوتوالکتریک ابتدا از منظر پدیده‌شناسی مورد بررسی قرار گرفته است. چنانچه لامپ فرانکفیش در اختیار داشتید، به کمک یک چشمه لامپ رشته‌ای معمولی و لامپ فرانکفیش 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 گستره طول موج فرانکفیش بین 10 nm تا 400 nm است، بنابراین در حالتی که برق‌نما دارای بار منفی است، با لامپ‌های فرانکفیش معمولی که به سادگی 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 فرانکفیش با طول موج کم استفاده کرد که معمولاً در دسترس نیستند. ضمن اینکه در این حالت نیز ممکن است افزایش فاصله صفحه‌های برق‌نما از یکدیگر چندان مشهود نباشد. همچنین اگر برق‌نما از ابتدا خنثی باشد، جدا کردن الکترون از کلاهیک آن نیاز به لامپ‌های فرانکفیش (UV) با طول موج کم دارد.

لازم است توجه شود که نظریه 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 به صورت $E = nhf$ 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 به صورت موج الکترومغناطیسی در نظر می‌گرفت. کوانتیده گرفتن تابش و ارائه نظریه ذره‌ای نور به صورت بسته‌های انرژی بنابه فرضی بود که اینشتین نخستین بار در سال ۱۹۰۵ میلادی برای تبیین اثر فوتوالکتریک به کار برد.

پرسش ۱-۵

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.

فیزیک ۳۰

جدول ۵-۱ تابع کار چند فلز

فلز	W_0 (eV)
طلا	۵.۱۰
کاتد	۵.۰۱
نیکل	۴.۷۰
مس	۴.۶۴
قرص	۴.۵۲
تنگستن	۴.۵۰
آهن	۴.۳۱
روی	۴.۳۱

این نظر اشتباهی را می‌توان به کمک قانون باسنکی انرژی به صورت زیر نوشت:

(۲-۵) (قانون باسنکی انرژی در اثر فوتوالکتریک)

$$hf = W_0 + K$$

که در آن W_0 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 می‌مانند، 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 برخی از فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از آن فلز خواهد بود:

(۳-۵) (معادله فوتوالکتریک)

$$K_{\text{max}} = hf - W_0$$

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 ۵-۱ تابع کار چند فلز داده شده است. اگر نمودار K_{max} را به رسم f یا به رسم λ رسم کنیم، به صورت خط راستی خواهد بود که محور افقی را در $f = f_0$ قطع می‌کند (شکل ۳-۵). در این بسامد، که معمولاً **بسامد آستانه** نامیده می‌شود، الکترون بدون هیچ انرژی جنبشی‌ای در آستانه کار فلز است. در این صورت با توجه به معادله ۳-۵، انرژی فوتون فردی مساوی تابع کار فلز است و بسامد آستانه از رابطه زیر بدست می‌آید:

(۴-۵) (بسامد آستانه فوتوالکتریک‌ها)

$$f_0 = \frac{W_0}{h}$$

توجه: نمودار ۳-۵ به خطی انرژی جنبشی فوتوالکتریک‌ها به رسم بسامد نور فردی و رنگ نور f با مسای با آن باشد فوتون‌ها می‌توانند الکترون‌ها را از فلز خارج کنند.

پرسش ۱-۵

تأیسی با بسامد معین باعث می‌شود تا فوتوالکتریک‌های سطح فلز ۱ را ترک کنند، ولی از سطح فلز ۲ خارج نشوند. انرژی فوتون‌های فردی 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 یکای به نام الکترون‌ولت (eV) استفاده می‌کنیم. برای آشنایی با این یکای غیر SI، فرض کنید الکترونی با بار $e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل ۱V حرکت کند. در این صورت با رابطه $\Delta U = q\Delta V$ که در فیزیک ۲ با آن آشنا شدید، انرژی تغییر در انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون برابر است با:

$$|\Delta U| = |q\Delta V| = |(-1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V})| = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

این مقدار انرژی را بنا به تعریف، یک الکترون‌ولت (eV) می‌نامند. ضربه‌های دیگری از این یکا به صورت keV (کیلو الکترون‌ولت) و MeV (مگا الکترون‌ولت) اغلب به کار می‌روند.

به این ترتیب یکای ثابت پلانک را به جای h می‌توان به رسم یکای h نیز بیان کرد:

$$h = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

مثال ۵-۱

یک چشمه نور مرئی با توان $W = 1.0 \text{ W}$ فوتون‌هایی با طول موج $\lambda = 550 \text{ nm}$ گسیل می‌کند. (الف) انرژی هر فوتون را بر حسب الکترون‌ولت محاسبه کنید. (ب) چه تعداد فوتون در هر ثانیه از این چشمه نور گسیل می‌نماید؟ (پاسخ: الف) از رابطه ۵-۱ انرژی هر فوتون برابر است با:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

ابتدا مقدار hc را حساب می‌کنیم:

$$hc = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1.99 \times 10^{-25} \text{ J}\cdot\text{m}$$

اگر λ را بر حسب eV و m را بر حسب nm بنویسیم، خواهیم داشت:

$$hc = (1.99 \times 10^{-25} \text{ J}\cdot\text{m}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) \left(\frac{1 \text{ nm}}{10^{-9} \text{ m}} \right) = 1.24 \times 10^{-6} \text{ eV}\cdot\text{nm}$$

بنابراین در حل مسائل می‌توانیم مقدار hc را برابر $1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$ 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:

$$E = \frac{1.24 \times 10^{-6} \text{ eV}\cdot\text{nm}}{550 \text{ nm}} = 2.25 \text{ eV}$$

ب) ابتدا انرژی تابش‌شده توسط لامپ را در هر ثانیه به دست می‌آوریم:

$$E = pt = (1.0 \text{ W})(1 \text{ s}) = 1.0 \text{ J} = (1.0 \text{ J}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 6.25 \times 10^{18} \text{ eV}$$

نسبت این انرژی به انرژی هر فوتون که در قسمت الف پیدا کردیم، شمار فوتون‌های گسیل‌شده از این چشمه را در هر ثانیه به دست می‌دهد، به این ترتیب داریم:

$$n = \frac{6.25 \times 10^{18} \text{ eV}}{2.25 \text{ eV}} = 2.78 \times 10^{18}$$

این شمار زیاد فوتون، که در هر ثانیه از یک چشمه 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 ۵-۲

الف) تابع کار طلا برابر 5.2 eV است. بسامد کمینه نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح این فلز را پیدا کنید. (ب) طول موج آستانه (طول موج متناظر با بسامد آستانه f_0) را به دست آورید. (پاسخ: الف) بسامد کمینه نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا برابر بسامد آستانه است. بنابراین از رابطه ۴-۵ داریم:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{5.2 \text{ eV}}{4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}} = 1.26 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

فوتون‌های توری که بسامد آنها بیشتر از $f_0 = 1.26 \times 10^{15} \text{ Hz}$ است، انرژی کافی برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا را دارند.

ب) از رابطه $\lambda = c/f$ ، طول موج متناظر با این بسامد تقریباً 234 nm بدست می‌آید که در ناحیه فرابنفش طیف الکترومغناطیسی قرار دارد.

تمرین ۱-۵

حل مورد انتظار

الف) $W_0 = ?$, $\lambda_0 = 254 \text{ nm}$

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow W_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}}{254 \text{ nm}} \approx 4.88 \text{ eV}$$

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 ۲-۵

حل مورد انتظار :

الف) با توجه به جدول ۱-۵، تابع کار روی $4/31\text{eV}$ است. به این ترتیب بلندترین طول موج (که در واقع همان طول موج آستانه است) برای گسیل فوتو الکترون‌ها برابر است با

$$f_s = \frac{W_s}{h} \Rightarrow \lambda_s = \frac{hc}{W_s} = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{4/31\text{eV}} \approx 287\text{nm}$$

ب) از رابطه ۳-۵ داریم :

$$K_{\max} = hf - W_s = \frac{hc}{\lambda} - W_s = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{287\text{nm}} - 4/31\text{eV} = 0/01\text{eV} = (0/01\text{eV})\left(\frac{1/6 \times 10^{-19}\text{J}}{1\text{eV}}\right) = 1/6 \times 10^{-21}\text{J}$$

به این ترتیب داریم :

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = 1/6 \times 10^{-21}\text{J}$$

$$\frac{1}{2}(9/11 \times 10^{-31}\text{kg})v_{\max}^2 = 1/6 \times 10^{-21}\text{J} \Rightarrow$$

$$v_{\max} = \sqrt{3/51 \times 10^{-9}(\text{J/kg})} = 5/92 \times 10^4\text{m/s}$$

راهنمای تدریس

۲-۵ 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. به عبارت دیگر فیزیک دانان آن زمان، با توجه به نظریات فیزیک کلاسیک قادر نبودند که توضیح دهند که چرا طیف گسیل شده از گازها به صورت طیف خطی است در حالی که طیف گسیل شده از اجسام جامد به صورت طیف پیوسته است که شامل تمامی طول موج‌ها است.

به این ترتیب باید در ابتدا این موضوع به عنوان یکی دیگر از چالش‌های فیزیک دانان کلاسیک برای دانش آموزان به خوبی شرح داده شود و سپس مطابق آنچه در کتاب درسی آمده است فرایند آموزش را دنبال کنید.

توجه

در شکل ۶-۵، طیف گسیلی از رشته تنگستن یک لامپ روشن نشان داده شده است. از آنجا که رشته تنگستن جسمی جامد است، طیف آن پیوسته است. در این شکل تنها ناحیه مرئی طیف گسیل شده نشان داده شده است. در شکل ۷-۵ طیف گسیلی خطی برای گازهای نئون و جیوه نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، طیف این گاز تنها شامل تعدادی خط‌های رنگی است (در این

شکل‌ها فقط خط‌های ناحیه مرئی نشان داده شده است). تعداد این خط‌ها و مکان آنها برای هر گاز، منحصر به فرد است و از گازی به گاز دیگر متفاوت است. به عبارت دیگر، طیف خطی هر گاز، به مثابه اثر انگشت آن گاز محسوب می‌شود.

ادامه راهنمای تدریس

یکی از دانشمندانی که در نیمه دوم قرن نوزدهم به اندازه‌گیری طول موج طیف گسیلی گازهای اتمی در ناحیه مرئی پرداخت، اندرس انگستروم (۱۸۷۴ – ۱۸۱۴ م.) دانشمند سوئدی بود. اندازه‌گیری طول موج‌های مرئی طیف گسیلی توسط انگستروم برای گاز اتمی هیدروژن مبنای معادله‌ای شد که بالمر (۱۸۹۸ – 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 معادله ۵-۵ کتاب درسی بیان شده است.

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیوم، سدیم و تون معمولاً از یک لایب پارک و بلند کننده‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم‌فشار است استفاده می‌شود. دو الکترود به تارهای آهن و کاتد در دو طرف این لایب قرار دارد که به ترتیب به پائنه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. این ولتاژ بالا، سبب تخلیه الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لایب شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجادشده و همچنین رنگ نور گسیل‌شده، به نوع گاز درون لایب بستگی دارد. در میان طیف گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی هم از جنبه تاریخی و هم از جنبه نظری اهمیت خاصی دارد. طیف خطی این گاز در ناحیه مرئی، شامل یک رشته منظم از خط‌هایی است که محل آنها در شکل ۸-۵-۵ 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:

$$\lambda = \frac{(364.506 \text{ nm})}{n^2 - 4} \quad (\text{معادله بالمر}) \quad (5-5)$$

که در آن $n \geq 3$ و همواره عددی صحیح است. با قرار دادن $n = 3, 4, 5, 6$ در معادله بالمر، طول موج خط‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن در ناحیه مرئی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

(خط قرمز) $n = 3 \rightarrow \lambda_3 = 656.3 \text{ nm}$
 (خط آبی) $n = 4 \rightarrow \lambda_4 = 486.1 \text{ nm}$
 (خط نیلی) $n = 5 \rightarrow \lambda_5 = 434.0 \text{ nm}$
 (خط بنفش) $n = 6 \rightarrow \lambda_6 = 410.1 \text{ nm}$

شکل ۸-۵-۵ الف) به کمک دستور، طول موج‌های گسیلی از گاز، از یکدیگر جدا و طیف خطی آن تشکیل شده است. ب) اسباب آزمایش تشکیل و مشاهده طیف گسیلی گازها

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 ۸-۵ ب کتاب درسی این آزمایش را انجام دهید تا دانش‌آموزان طیف گسیلی خطی گاز اتمی هیدروژن را به‌طور مستقیم مشاهده کنند.

ادامه راهنمای تدریس

یکی از پیش‌بینی‌های بالمر پس از به‌دست آوردن رابطه ۵-۵ 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 نتیجه پیش‌بینی علمی خود را ببیند (به تاریخ‌های مندرج در جدول ۲-۵ توجه شود)، ولی براساس همین پیش‌بینی، ریدبرگ دانشمند سوئدی به بازنویسی معادله بالمر پرداخت و رابطه‌ای کلی‌تر برای به‌دست آوردن طول موج‌های طیف گسیلی گاز اتمی هیدروژن به‌دست آورد. این رابطه به‌صورت معادله ۶-۵ در کتاب درسی آمده است که به‌ازای $n' = 2$ به معادله ۵-۵ بالمر می‌رسیم که مربوط به طول موج‌های طیف هیدروژن اتمی در ناحیه مرئی است.

توجه

همان‌طور که در جدول ۲-۵ 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 ناحیه 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.

فصل ۵، آشنایی با فیزیک اتمی



جوان بآلمر (۱۸۲۵-۱۸۹۸) ریاضیات و فیزیکدان و متخصص طیف‌سنجی، در سوئیس زاده شد. همگامی که مشاهده کرد، بخشی از دنیا یافت و علل آن را می‌توانست با فرمول‌های ریاضی خود توضیح دهد. در سال ۱۸۶۳، در مورد خطوط طیفی که در طیف ستاره‌ها و در طیف‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شد، به این نتیجه رسید که این خطوط می‌توانند به‌وسیله یک فرمول ریاضی بیان شوند. او در سال ۱۸۶۸، در کتاب «در مورد خطوط طیفی ستاره‌ها» این فرمول را ارائه داد. این فرمول به‌وسیله بآلمر و دیگران به‌کار گرفته شد و به‌عنوان «فرمول بآلمر» شناخته شد.

بالمر با تأمل بیشتر روی رابطه ۵-۵، پیشنهاد کرد که ممکن است رشته‌های دیگری از خط‌های که تا آن زمان در طیف هیدروژن دیده نشده‌اند وجود داشته باشند. ریدبرگ، فیزیک‌دان سوئی، در راستای همین موضوع تلاش فراوانی برای کامل‌تر کردن طیف گسیلی خطی هیدروژن انجام داد و در سال ۱۸۸۸ میلادی معادله بالمر را به‌صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad n > n' \quad (۶-۵) \quad (\text{معادله ریدبرگ})$$

که در آن R ثابت ریدبرگ و مقدار آن برابر $1.097373 \times 10^7 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$ است و برای سادگی در محاسبات، مقدار آن را می‌توان $1.1 \times 10^7 \text{ (mm}^{-1}\text{)}$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح مثبتی است که به‌ازای $n' = 2$ رابطه ۵-۵ مربوط به رشته بالمر به‌دست می‌آید که در ناحیه مرئی طیف قرار دارد. چندین سال پس از درگشت بالمر و با اصلاح ابزارها و روش‌های طیف‌سنجی، امکان کشف گستره طول‌موج‌های دیگری در طیف گسیلی گاز هیدروژن به‌وجود آمد و مشخص شد که به‌جز رشته بالمر رشته‌های دیگری در طیف گاز هیدروژن اتمی وجود دارد. در جدول ۲-۵ نام این رشته‌ها، که به‌ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۲-۵ رشته خطی طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	n'	رابطه ریدبرگ مربوط به رشته	مقادیر n	ناحیه طیف
لیمان	۱۹۰۶-۱۹۱۴	۱	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$	۲، ۳، ۴، ...	فرابنفش
بالمر	۱۸۸۵	۲	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$	۳، ۴، ۵، ...	مرئی
پاشن	۱۹۰۸	۳	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$	۴، ۵، ۶، ...	فروسرخ
براکت	۱۹۱۴	۴	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$	۵، ۶، ۷، ...	فروسرخ
پنفر	۱۹۱۴	۵	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$	۶، ۷، ۸، ...	فروسرخ

۱- زمانی که مدل اتمی بور در سال ۱۹۱۳ میلادی مطرح شد، خط‌های گسیلی برای گاز هیدروژن اتمی فقط در رشته بالمر، رشته پاشن و معادله از خط‌های رشته لیمان به‌طور قطعی معلوم شده بودند. این مدل که با پیش‌بینی بالمر توافق خوبی داشت منجر به درک‌های برای باطن آن رشته‌ها شد. به طوری که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و پنفر و همچنین خط‌های یابی‌مانده رشته لیمان به‌درج کشف شدند.

تمرین ۳-۵

حل مورد انتظار:

همان‌طور که در متن تمرین نیز اشاره شده است رشته پاشن
متناظر با $n' = 3$ در رابطه ۳-۵ خواهد بود. به این ترتیب داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی به ترتیب به ازای
 $n = 4$ و $n = 5$ به دست می‌آید. در این صورت داریم:

$$\frac{1}{\lambda_1} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{9R}{16} \Rightarrow \lambda_1 = 1875 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda_2} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{9R}{25} \Rightarrow \lambda_2 = 1274 \text{ nm}$$

با توجه به شکل ۳-۲۲ یا مراجعه به جدول ۳-۵، این طول
موج‌ها در ناحیه فروسرخ طیف امواج الکترومغناطیسی قرار دارند.

فیزیک ۳۳

مثال ۳-۵

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشته پراکت ($n' = 2$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها
در کدام گستره طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند.

پاسخ: در رشته پراکت ($n' = 2$) برای اولین و دومین خط طیفی به ترتیب $n = 3$ و $n = 4$ است. در این صورت با استفاده
از رابطه ۳-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = R \left(\frac{5}{36} \right) \Rightarrow \lambda = 4.10 \times 10^{-7} \text{ m} = 410 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right) = R \left(\frac{3}{16} \right) \Rightarrow \lambda = 1.64 \times 10^{-6} \text{ m} = 1640 \text{ nm}$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۳، مشاهده می‌کنیم که این خط‌های طیفی در ناحیه فروسرخ قرار دارند.

مثال ۳-۵

کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج در رشته پراکت ($n' = 2$) هیدروژن اتمی را به دست آورید.
پاسخ: کوتاه‌ترین طول موج، با $n = 3$ متناظر است. در این صورت با استفاده از رابطه ۳-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{R}{5} \Rightarrow \lambda = 410 \text{ nm}$$

همچنین بلندترین طول موج این رشته، متناظر با $n = 4$ است. در این صورت داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{9R}{20} \Rightarrow \lambda = 1.64 \times 10^{-6} \text{ m} = 1640 \text{ nm}$$

تمرین ۳-۵

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشته پاشن ($n' = 3$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها
در کدام گستره طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند.

معادله ریبرگ که برگرفته از داده‌های تجربی است، طول موج‌هایی را به دست می‌دهد که هیدروژن
اتمی در طیف الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. ولی مثل‌های اتمی رایج آن زمان در خصوص اینکه
چرا تنها طول موج‌های معینی توسط هیدروژن اتمی تابش می‌شود، پاسخی نداشتند. نیاز بود،
فیزیکدان دانتارکی (۱۹۶۱-۱۸۸۵ م.) با اصلاح مدل اتمی رادرفورد، برای نخستین بار توانست
توضیح مناسبی برای طول موج‌های گسیل‌شده توسط گاز هیدروژن اتمی ارائه دهد. در واقع
بل بور، آغاز راهی برای درک این موضوع بود که چگونه ساختار اتم، طول موج‌های تابش‌شده را
به مقدارهای معینی محدود می‌کند.

۱- شباهت این مدل و مدل‌های دیگر، باید مقدار h مربوط به هر رشته همگام از زمانیه داده شود و لازم نیست دانتارکی از بور
به رشته‌های مختلف را حفظ کند.

۱۲۲

راهنمای تدریس

۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور

تا پیش از ارائه مدل اتمی تامسون در سال ۱۹۰۴ میلادی، مدل
اتمی رایج مدل دالتون بوده است که اتم‌ها را به صورت ذرات بسیار
ریز کروی شکل بدون بار الکتریکی در نظر می‌گرفت که اندازه این ذرات
بسیار ریز و اندازه و جرم آنها برای عناصر مختلف با هم تفاوت دارد.
این مدل به مدل توپ بیلارد 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. به همین 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 به صورت ذره کروی شکل بسیار ریزی
است که به‌طور همگن دارای بار مثبت است و الکترون‌ها که ذره‌های
بسیار ریزتری هستند در جاهای مختلف این ذره باردار مثبت پخش
شده‌اند (معروف به مدل کیک کشمش).

مدل تامسون شامل بسیاری از خواص شناخته شده اتم‌ها تا آن زمان

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور

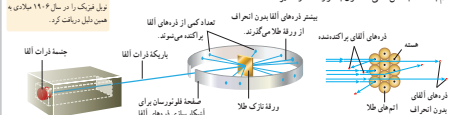
جوزف تامسون فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری
نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را تشویق کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد.
این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنا بر مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که
بار مثبت به‌طور همگن در سراسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم
دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمش می‌گویند، زیرا
الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن پخش شده‌اند (شکل ۳-۵).

در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با پسماندهای معینی حول موضع عادلشان نوسان می‌کنند
این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از تاکی‌های مدل تامسون این
بود که پسماندهای تابش گسیل‌شده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود.

وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌های 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 هسته اتم هلیوم که به آن ذره آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای
نازک از جنس طلا فرو تابانده (شکل ۳-۵). رادرفورد با برآورد مدل تامسون انتظار داشت که تمامی
ذره‌های آلفا، با انحراف بسیار اندکی از ورقه طلا بگذرند. در عمل نیز بیشتر این ذره‌ها بدون انحراف

با یا با انحراف اندکی از ورقه طلا می‌گشتند و در برخورد با صفحه فلز نوسان، در پشت آن، جرقه‌های
نورانی تولید می‌کردند. با وجود این، برخی از ذره‌های آلفا در هنگام خروج از ورقه 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 برآورد مدل تامسون و شناختی که از باریکه ذرات آلفا داشت، گفت:
«مثل آن بود که گلوله توپی را به ورقه نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از
برخورد گلوله توپ با سطح کاغذ، گلوله بازگردد.» این ذره‌ها باید با چیزی برخورد کرده باشند!

اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از ورقه‌های نازک گشتند
باشند که نهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهای بسیار چگال و دارای بار
مثبت متصرف شده‌اند. وی سرانجام نتیجه گرفت باید هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت در مرکز هر
اتم باشند که با مدل اتمی تامسون به‌طور آشکار مغایرت داشت.



شکل ۳-۵ آزمایش رادرفورد که در آن ذرات آلفا به یک ورقه نازک طلا برخورد کردند و در جهت‌های مختلف پراکنده شدند. این آزمایش نشان داد که اتم دارای هسته‌ای کوچک و چگال است.

۱۲۵

بود؛ که از جمله 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.

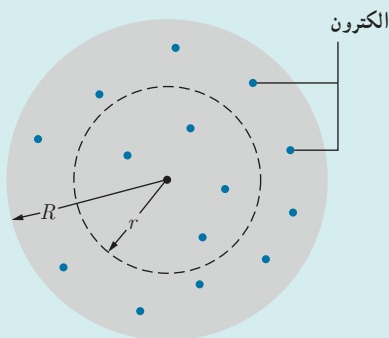
دانستنی برای معلم

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 فاصله r از مرکز یک کره توزیع بار یکنواخت و شعاع R را می‌توان با بهره‌گیری از قانون گاوس محاسبه کرد:

$$F = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R^2} \cdot r = kx$$

این نیروی بازگرداننده خطی باعث می‌شود که الکترون‌ها حول وضع تعادلشان نوسان کنند، درست مانند جرم متصل به فنری که نیروی بازگرداننده $F = kx$ بر آن وارد می‌شود. بنابراین انتظار داریم که در اتم تامسون الکترون‌ها حول وضع تعادلشان با بسامد $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$ نوسان کنند، که k ثابتی است که در معادله 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.



ادامه راهنمای تدریس

پس از مدل تامسون و اشاره به ناکامی های آن (که به برخی از آنها در زندگی تامسون اشاره شده است)، به بررسی مدل رادفورد بپردازید. هرچند رادفورد از سال های پایانی قرن نوزدهم، فعالیت های علمی خود را با تمرکز روی پرتوایی طبیعی عناصر پرتوزا شروع کرد و به نوعی فیزیک هسته ای را بنیان نهاد، ولی به تدریج با آزمایش هایی که روی پراکندگی ذرات آلفا توسط ایشان و گروهی که در دانشگاه منچستر با ایشان همکاری می کردند، درگیر بررسی ساختار اتم و ارائه مدلی برای آن شد. آزمایش پراکندگی ذرات آلفا روی ورقه ای نازک از طلا در شکل ۵-۱۰ بررسی شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود بیشتر ذره های آلفا بدون انحراف از ورقه طلا می گذرند (خط ضخیم آبی رنگ).

در ادامه به موفقیت ها و ناکامی های مدل اتم هسته ای رادفورد اشاره کنید. تقریباً دو سال بعد از ارائه مدل اتم - هسته ای رادفورد، بور که در آزمایشگاه رادفورد مشغول به کار بود، توانست با ارائه پیش فرض هایی (اصول موضوعه) مدل اتمی خود را برای هیدروژن اتمی و اتم های هیدروژن گونه ارائه دهد. این مدل موفقیت های فراوانی به همراه داشت و ضمن اینکه با معرفی مدارهای مانا، پایداری اتم را می توانست توضیح دهد جذب و گسیل تابش را نیز می توانست با تغییر موقعیت الکترون از یک مدار مانا به مدار مانای دیگر توضیح دهد؛ به طوری که با نتایج تجربی نیز سازگار باشد.

فصل ۱۱: آشنایی با فیزیک اتمی

در سال ۱۹۱۳ میلادی، بور مدلی را برای اتم هیدروژن ارائه کرد. این مدل الکترون بر آنکه مسافت تاب پایداری اتم را در مدل رادفورد حل می کرد معادله ریمرگ برای طیف خطی اتم هیدروژن را نیز نتیجه می داد. نظریه بور با مدل اتم هسته ای رادفورد، شروع می شد. بور با این پیشنهاد که در مفیاس اتمی، قوانین مکانیک کلاسیک و الکترومغناطیس باید توسط قوانین دیگری جایگزین با تکمیل شود گامی بزرگ و جسورانه برای رفع مشکل مدل رادفورد برداشت. در ادامه با برخی از اصول و مفروضات مدل بور آشنا می شویم.

۱- مدارهای الکترونی الکترون ها در هر اتم گوناگونند؛ یعنی فقط مدارها و انرژی های گسسته معینی مجاز هستند.

بور پس از محاسبات نسبتاً ساده ای نشان داد که شعاع این مدارها و انرژی الکترون برای اتم هیدروژن از رابطه های زیر به دست می آید:

(۷-۵) $r_n = a_0 n^2$ (شعاع مدارهای الکترون برای اتم هیدروژن)

(۸-۵) $E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$ (انرژی الکترونی الکترون در اتم هیدروژن)

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می شود. ($n = 1, 2, 3, \dots$) که مدار الکترون را دور هسته مشخص می شود. همچنین a_0 شعاع کوچکترین مدار در اتم هیدروژن (به ازای $n = 1$) و مقدار آن برابر $a_0 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ می باشد. این مقدار خاص **شعاع بور** برای اتم هیدروژن نامیده می شود. همچنین انرژی الکترون در $n = 1$ برابر $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ است که اندازه آن را معمولاً **یک ریمرگ** می نامند و با نماد E_H نشان می دهند ($E_H = 13.6 \text{ eV}$). شکل ۵-۱۰ به مدار اولی بور را برای اتم هیدروژن نشان می دهد.

۲- وقتی یک الکترون در یکی از مدارهای مجاز است، هیچ نوع تابش الکترومغناطیسی گسیل نمی شود. از این رو گفته می شود الکترون در **مدار مانا** یا **حالت مانا** قرار دارد.

۳- الکترون می تواند از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_i به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_f ، یک فوتون تابش می شود (شکل ۵-۱۳). در این صورت انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین دو مدار اولیه و مدار نهایی است، یعنی:

(۹-۵) $E_i - E_f = hf$ (معادله گسیل فوتون از اتم)

۱۰- نور طیف ۱۱ از سرسبز و ۱۲ از سرسبز و ۱۳ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ از سرسبز و ۱۴ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ و ۶۱ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ و ۶۱ و ۶۲ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ و ۶۱ و ۶۲ و ۶۳ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ و ۶۱ و ۶۲ و ۶۳ و ۶۴ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ و ۶۱ و ۶۲ و ۶۳ و ۶۴ و ۶۵ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ و ۶۱ و ۶۲ و ۶۳ و ۶۴ و ۶۵ و ۶۶ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ و ۶۱ و ۶۲ و ۶۳ و ۶۴ و ۶۵ و ۶۶ و ۶۷ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ و ۶۱ و ۶۲ و ۶۳ و ۶۴ و ۶۵ و ۶۶ و ۶۷ و ۶۸ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۶ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱ و ۳۲ و ۳۳ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ و ۴۰ و ۴۱ و ۴۲ و ۴۳ و ۴۴ و ۴۵ و ۴۶ و ۴۷ و ۴۸ و ۴۹ و ۵۰ و ۵۱ و ۵۲ و ۵۳ و ۵۴ و ۵۵ و ۵۶ و ۵۷ و ۵۸ و ۵۹ و ۶۰ و ۶۱ و ۶۲ و ۶۳ و ۶۴ و ۶۵ و ۶۶ و ۶۷ و ۶۸ و ۶۹ به معنای ۱۱ و ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴ و ۲۵ و

بنابراین الکترون از دومین حالت برانگیخته به اولین حالت برانگیخته گذاری کند. طول موج فوتون گسیل شده تقریباً متناظر با 66° nm است.

در ادامه به استخراج معادله 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 معادله ریدبرگ صرفاً مبتنی بر نتایج اندازه‌گیری طول موج‌های گسیل شده از گاز هیدروژن اتمی در ناحیه مرئی طیف به دست آمده است که پیش از ریدبرگ توسط بالمر به دست آمده بود. در حالی که مدل بود، براساس پیش‌فرض‌هایی (اصول موضوعه) به دست 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.

فیزیک ۳۳

شکل ۱۶-۵: اسباب آزمایشی را به صورت طرح‌ار نشان می‌دهد که در آن پرتکه تور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کمتشارهیدروژن می‌گذرد. با انجام این آزمایش بی‌میر یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین‌کمان) با خط‌های تارک درون آن مشاهده می‌شود که در آن بعضی از طول‌موج‌ها از نور سفید جذب شده‌اند.

شکل ۱۶-۵ روشی برای مشاهده طیف‌های جذب، یک چسبه نور سفید که گذریابی پیوسته از طول‌موج‌ها را تولید می‌کند، از طریق حالی گاز کمتشارهیدروژن اتمی می‌گذرد و توسط منشور پراکنده می‌شود و طیف آن روی پرده تشکیل می‌شود. خط‌های تارک روی طیف، به طول‌موج‌هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم‌های گاز جذب شده‌اند.

در اواسط 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 ۱۶-۵، طیف گسیلی و طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد. مطالعه و مقایسه این دو طیف و همچنین طیف‌های گسیلی و جذبی عناصرهای مختلف نشان می‌دهد که:

- همه 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 گاز بی‌همانند یکدیگر نیست.
- اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول‌موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازه کافی بالا رود و با به هر صورت دیگر را بگنجاند، آنها را تابش می‌کنند.

شکل ۱۶-۵ طیف گسیلی و حتی گاز هیدروژن اتمی. اتم‌های درون طیف گسیلی معروف طول‌موج‌های گسیل‌دهنده و (ب) خط‌های تاریک در زمینه طیف، معروف طول‌موج‌های جذب‌دهنده توسط اتم‌های گاز هستند.

۱۳۰

فصل ۱۵: آشنایی با فیزیک اتمی

استخراج معادله ریدبرگ برای اتم هیدروژن از مدل بود؛ همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بود نتیجه‌گیری معادله ریدبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های راکنجسته باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار n_1 به مدار n_2 می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط ۵-۵ و ۵-۹، بسامد فوتون گسیل شده برابر است با:

$$f = \frac{E_{n_1} - E_{n_2}}{h} = \frac{E_1}{h} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

با استفاده از رابطه $f = c/\lambda$ طول موج فوتون گسیل شده را پیدا می‌کنیم.

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_1}{h} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{E_1}{hc} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

از سوی دیگر داریم:

$$\frac{E_1}{hc} = \frac{13.6 \text{ eV}}{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}} = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1}$$

که این مقدار، با تقریب بسیار خوبی همان ثابت ریدبرگ R است که پیش از این با آن آشنا شدیم. به این ترتیب داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

این رابطه همان معادله ۶-۵ است که با اصلاح و بازنویسی معادله بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریدبرگ به دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بود می‌توانیم رابطه تجربی ریدبرگ را به دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. فرضی الکترون برای مثال از مدار $n_1 = 3$ به مدار $n_2 = 2$ می‌رود. طول موج فوتون گسیل شده برابر است با:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \Rightarrow \lambda = 656 \text{ nm}$$

مقدار به دست آمده به نحو چشمگیری به طول موج خط قرمز در رشته بالمر که از تجربه حاصل شده، نزدیک است.

طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و مدل بود: در سال ۱۸۱۲ میلادی فرانیهوفر، با مشاهده دقیق طیف خورشید، خط‌های تاریک تاریکی را در آن کشف کرد (شکل ۱۵-۵). 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 فرانیهوفر 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 ۱۵-۵ خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، به اندازه‌ای کشف‌کننده آن خط‌های تاریک تاریک نام می‌برد. دلی جزوف فرانیهوفر بود که این خط‌ها را به نصب مورد مطالعه قرار داد.

۱۳۱

٥-٤ ليزر

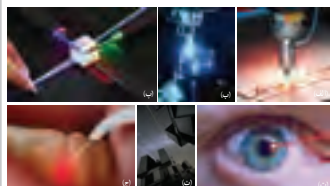
ابتدا نگاهی داشته باشید به تاریخچه لیزر، کاربردها و زندگی‌نامه دانشمندانی که در ساخت نخستین لیزرها تأثیر داشتند. افزون بر کاربردهای که در کتاب درسی اشاره شده است می‌توانید از دانش‌آموزان علاقه‌مند بخواهید تا در خصوص کاربردهای دیگر لیزر با جزئیات بیشتری تحقیق کنند و نتیجه را در جلسه‌های بعدی به کلاس ارائه دهند.

در ادامه دانش‌آموزان را با ویژگی‌های گسیل القایی آشنا کنید در شکل ۵-۲۰ گسیل القایی با گسیل خود به خود فوتون‌ها مقایسه شده است. در کتاب‌های تخصصی به فوتون‌های هم‌بسامد، هم جهت و هم فاز، فوتون‌های همدوس نیز گفته می‌شود. در واقع واژه همدوسی، دربرگیرنده هر سه ویژگی یاد شده است.

مفهوم وارونی جمعیت و ترازهای شبه پایدار که شرط لازم ایجاد وارونی جمعیت است در ادامه مورد توجه قرار گرفته است. توجه دانش آموزان را به اهمیت وجود ترازهای شبه پایدار برای ایجاد وارونی جمعیت جلب کنید. به این منظور به تفاوت زمانی باقی ماندن الکترون ها در ترازهای شبه پایدار (10^{-9} s) نسبت به باقی ماندن الکترون ها در ترازهای پراگینخته معمولی (10^{-8} s) اشاره کنید. این تفاوت زمانی قابل توجه، سبب ایجاد وارونی جمعیت می شود که در فرایند تشکیل باریکه لیزر اهمیت کلیدی دارد.

٤-٥ ليون

لیزر یکی از مفیدترین اختراعات قرن بیستم است که کاربرد زیادی در زندگی، فناوری و صنعت دارد. لیزر امروزه در جابجاری، در نگاشت اطلاعات روی CD و DVD ها و خواندن آنها، شبکه‌های کابلی نوری، اندازه‌گیری دقیق طول، دستگاه‌های جوشکاری و پرت فشارات، پژوهش‌های علمی، سرگرمی و ... به کار می‌رود. همچنین در حفره پزشکی برای جراحی، برداشتن لکه‌های پوستی، اصلاح دید چشم و دندان‌پزشکی و ... از لیزر استفاده می‌شود (شکل ۱۹-۵).



شکل ۵-۱۹ برخی از کاربردهای لیزر:

- (الف) در بوشکاری، (ب) در جوشکاری،
- (پ) در آزمایش‌های لیزیک و پژوهش‌های
- علمی، (ت) در چشم پزشکی، (ث) در نجوم،
- (ج) در دندانپزشکی

نخستین لیزر، موسوم به لیزر یاقوتی، را تنودور مایمن (۲۰۰۷-۱۹۲۷ م.) در سال ۱۹۶۰ میلادی ساخت. مدتی پس از آن و در همان سال، علی جوان و همکارانش موفق به ساخت نخستین لیزر گازی هم بودند.

مطابق مدل امی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین تر جهش می کند، فوتون گسیل می شود. فرانسه این مدل را توسعه داد و به صورت گسیل خود بخود و با گسیل القا شده، در گسیل خود بخود (مثل شکل ۲-۴) و تحت تابش نور به جهش القای می نمود. در گسیل القای (مثل شکل ۲-۵) در دو فوتون در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط آیزنشتاین مطرح شد، یک فوتون ورودی، الکترون را از تحریک (یا القا) می کند تا تراز انرژی خود را تغییر دهد و به تراز انرژی پدور، از گسیل القای، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی $E_2 - E_1$ یکسان باشد.

گسیل الفابی سه ویژگی عمده دارد. اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می شود (اشکل ۵-۲). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون ها را افزایش می دهد و نور را تقویت می کند. دوم اینکه فوتون گسیل شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می کند. سوم اینکه فوتون گسیل شده

لـaser گرفته از سروازهای عبارت (light amplification by the stimulated emission of radiation) به معنای تقویت نور توسط گسیل القای تابش است.

152

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

با فوتون ورودی همگام با دارای همان فاز است. به این ترتیب فوتون‌هایی که باریکه لیزری را ایجاد می‌کنند هم‌ساز، هم‌جهت و هم‌فاز هستند.

در گسیل الکافی یک جسمه انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا پند تا الکترونها را به E_1 (الف)

ترازهای انرژی بالاتر را بگینخته کند. این انرژی می تواند به روش های متعددی از جمله درخش های E_2

سندید تور معمولی و ناخپلهای ولتاژ بالا فراهم شود. اگر انرژی کافی به آنها داده دود، E_3

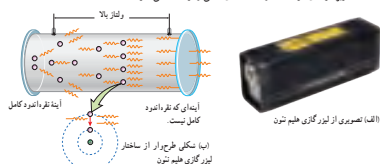
ترازهای بیشتری به تراز انرژی بالاتر را بگینخته خواهند شد، شرطی که به **آرادی حمیمت** معروف E_4

است (شکل ۵-۱۵).

اولین جنبش الکترودها در یک محیط لایزی، مربوط به وضعیتی است که تعداد الکترودها در ترازهای موسوم به **ترازهای نیمهپار** نسبت به تراز پایین تر بسیار بیشتر باشند. در تراز این الکترودها مدت زمان بسیار طولانی $(10^{-6} - 10^{-5})$ نسبت به حالت استاندارد معمولی $(10^{-8} - 10^{-9})$ باقی می ماند. این زمان طولانی، فرصت بیشتری برای افزایش انرژی جنبش و در نتیجه تقویت نور تابانده شده را فراهم می کند.

199

لیزر گازی هلیوم نئون (He — Ne)

[illegible] γ_{ms} Metastable

155

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۵

۱ الف) پدیده فوتوالکتریک را تعریف کنید.

ب) شکلی برای نشان دادن این پدیده رسم کنید.

پ) توضیح دهید نظریه فوتون چگونه به توجیه پدیده فوتوالکتریک کمک می‌کند.

۲ در نمودار شکل ۱ مسیر ذره آلفا در برخورد با ورقه نازک فلزی

نشان داده شده است. مسیر ذره‌ها به نیروی بستگی دارد که در فلز بر آنها وارد می‌شود.

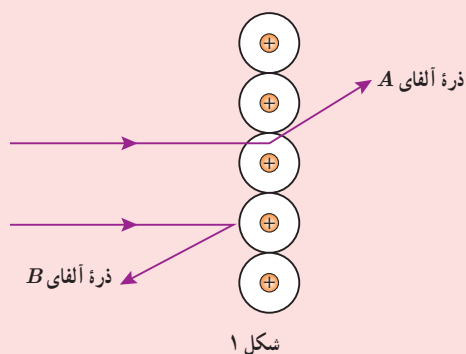
الف) یک مدل اتمی را شرح دهید که مسیر ذره‌های آلفا در برخورد با صفحه نازک فلزی را توضیح می‌دهد.

ب) تامسون معتقد بود که اتم از بارهای منفی مستقر در نوعی «خمیر» مثبت تشکیل می‌شود. این مدل را مدل کیک کشمش می‌خوانند.

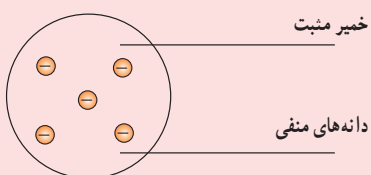
نمودار شکل ۲ مدلی از این نوع اتم را نشان می‌دهد.

a) توضیح دهید چگونه مدل کیک کشمش می‌تواند توضیح دهد چرا ذره آلفا A با زاویه کوچک منحرف شده است.

b) چرا این مدل نمی‌تواند انحراف شدید پرتو B را توضیح دهد؟



شکل ۱



شکل ۲

۳ باریکه‌ای از الکترون با اختلاف پتانسیل ۱۲kV شتاب می‌گیرد و به سوی هدفی در لوله 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 شعله اجاق یا شمع مقداری نمک طعام را گرما می‌دهیم و طیف سدیم را با طیف‌نما می‌بینیم. دستگاه دوخط روشن زردرنگ به طول موج‌های 589.0 nm و 589.6 nm 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 رابطه $E_n = -13.6\text{ eV}/n^2$ ، ترازهای انرژی مربوط به طول موج‌های 656 nm و 1026 nm در طیف هیدروژن

را مشخص کنید.

الف) شکل زیر ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد،

$n = \infty$	← 0°
$n = 5$	← $-8/8 \times 10^{-18} \text{ J}$
$n = 4$	← $-1/4 \times 10^{-18} \text{ J}$
$n = 3$	← $-2/4 \times 10^{-18} \text{ J}$
$n = 2$	← $-5/4 \times 10^{-18} \text{ J}$
$n = 1$	← $-2/2 \times 10^{-18} \text{ J}$

a معنای حالت پایه چیست؟

b چگونه تخلیه الکتریکی در هیدروژن باعث ایجاد خط‌های مرئی در طیف می‌شود؟

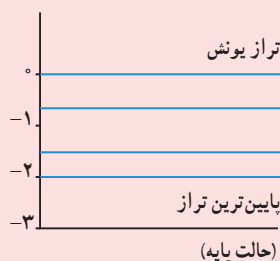
c نشان دهید که کمترین طول موج تابش الکترومغناطیسی گسیل شده از هیدروژن تقریباً 90 nm است.

ب) پرتو الکترومغناطیسی به طول موج 90 nm بر سطح یک ورقه آلومینیومی می‌تابد و الکترونی با بیشینه انرژی $1/5 \times 10^{-18} \text{ J}$ از سطح ورقه گسیل می‌شود.

d نام پدیده گسیل الکترون از سطح فلز بر اثر تابش الکترومغناطیسی چیست؟

e تابع کار آلومینیوم را به دست 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 گسیل شده 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) اندازه تقریبی گستره طول موج بخش مرئی طیف موج‌های الکترومغناطیسی را به دست آورید.

ب) لامپ بخار جیوه با فشار کم چه نوع طیفی گسیل می‌کند؟

پ) طیف نور خورشید را تشریح کنید.

ت) در نمودار ترازهای انرژی اتم هیدروژن شکل زیر،

۱ هنگامی که الکترون از تراز $n = 4$ به تراز $n = 2$ می‌رود بسامد نور تابش شده چقدر است؟

۲ پیامدهای جذب یک فوتون انرژی به وسیله اتم نایترانگیخته را توضیح دهید.

$n = \infty$ °
۵	_____ $-۰/۹۰ \times ۱۰^{-۱۹} \text{J}$
۴	_____ $-۱/۴۵ \times ۱۰^{-۱۹} \text{J}$
۳	_____ $-۲/۴۰ \times ۱۰^{-۱۹} \text{J}$
۲	_____ $-۵/۴۰ \times ۱۰^{-۱۹} \text{J}$
۱	_____ $-۲۱/۸ \times ۱۰^{-۱۹} \text{J}$

۹ به مجموعه‌ای از اتم‌های هیدروژن در حالت پایه، نور فرابنفش به طول موج $۵۹/۵ \text{ nm}$ می‌تابانیم. انرژی جنبشی الکترون‌های گسیل شده را حساب کنید.

۱۰ بیشینه تندی فوتوالکترون‌های گسیل شده از سطح فلزی با تابع کار $۳/۲ \text{ eV}$ را بر اثر تابش باریکه نوری با طول موج ۳۱۰ nm به دست آورید (جرم الکترون را $۹/۱۰ \times ۱۰^{-۳۱} \text{ kg}$ بگیرید).

راهنمای پاسخ‌یابی پرسشی‌ها و مسئله‌های فصل ۵

۵-۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

۱ الف

$$\lambda = 589 \text{ nm}, f, E = ?$$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{589 \text{ nm}} = 2.10 \text{ eV}$$

$$E = (2.10 \text{ eV}) \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 3.36 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{589 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5.09 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

ب) انرژی گسیل شده توسط لامپ در هر دقیقه برابر است با:

$$E_t = Pt = \left(\frac{J}{s} \right) (60 \text{ s}) = 300 \text{ J}$$

تعداد فوتون گسیل شده در هر دقیقه برابر است با:

$$n = \frac{E_t}{E} = \frac{300 \text{ J}}{3.36 \times 10^{-19} \text{ J}} = 8.9 \times 10^{20}$$

۲ الف $R_a = \frac{\text{توان خروجی}}{\text{توان ورودی}} = \frac{50 \times 10^{-3} \text{ W}}{500 \text{ W}} = 10^{-4}$

که برابر ۰.۰۱ درصد است.

ب) ابتدا انرژی هر فوتون خروجی را پیدا می‌کنیم.

انرژی کل فوتون‌های خروجی در هر ثانیه برابر است با:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{633 \text{ nm}} = 1.96 \text{ eV}$$

$$= (1.96 \text{ eV}) \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 3.13 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_t = Pt = \left(\frac{J}{s} \right) (1 \text{ s}) = 5 \times 10^{-3} \text{ J}$$

$$n = \frac{E_t}{E} = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ J}}{3.13 \times 10^{-19} \text{ J}} = 1.59 \times 10^{16}$$

تعداد فوتون‌های خروجی در هر ثانیه برابر است با:

۳ چشمه نور را در مرکز کره‌ای به شعاع ۱ km در نظر می‌گیریم.

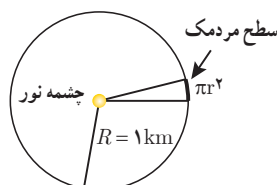
ابتدا تعداد فوتون‌هایی را که با طول موج ۵۵۰ nm لامپ در هر ثانیه گسیل می‌شود مشابه قسمت (ب) مسئله قبل به دست می‌آوریم.

انرژی کل فوتون‌های خروجی با طول موج ۵۵۰ nm در هر ثانیه برابر است با:

$$E_t = \frac{1}{100} \left(\frac{J}{s} \right) (1 \text{ s}) = \frac{5}{100} \text{ J}$$

انرژی هر فوتون با طول موج ۵۵۰ nm برابر است با:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{550 \text{ nm}} = 2.25 \text{ eV}$$



فوتون ۳۱

پرسشی‌ها و مسئله‌های فصل ۵

۱. توضیح دهید برای یک فلز معین، تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در نتیجه 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
۲. توان باریکه تور خروجی یک فلز گازی هلیوم ۵۰۰ mW است. اگر توان ورودی این فلز ۵۰۰ W باشد.
- الف) بازده نور را حساب کنید.
- ب) اگر طول موج باریکه تور خروجی ۶۳۳ nm باشد، شمار فوتون‌های را پیدا کنید که در هر ثانیه از این فلز گسیل می‌شود.
۳. یک لامپ رشته‌ای با توان ۱۰۰ W از فاصله یک کیلومتری دیده می‌شود. فرض کنید نور لامپ به طور یکواخت در فضای اطراف آن منتشر می‌شود و بازده لامپ ۵ درصد است (یعنی ۵ W تابش می‌کند). و فقط ۱ درصد این تابش دارای طول موجی در حدود ۵۵۰ nm است. در هر ثانیه چه تعداد فوتون با این طول موج دارد مردمک‌های چشم ناظر می‌شود که در این فاصله قرار دارد؟ (قطر مردمک را ۲۰ mm در نظر بگیرید.)
۴. شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود ۱۲۶۰ W/m² است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر ۱ m² مقدار انرژی ۱۲۶۰ J 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 بازمی‌تابد هر متر مربع حدود ۴۰۰ W/m² باشد. در هر ثانیه چند فوتون به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد؟ طول موج متوسط فوتون‌ها را ۵۷۰ nm فرض کنید.
۵. الف) منظور از اثر فوتوالکتریک چیست؟
- ب) توضیح دهید نظریه کوانتومی تابش که توسط اینشتین مطرح شد و در آن نور به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفته شد چگونه به تبیین اثر فوتوالکتریک کمک کرد؟
- ب) معادله مربوط به اثر فوتوالکتریک به صورت $K_{\text{max}} = hf - W$ بیان می‌شود. سه بخش این معادله را به طور جداگانه توضیح دهید.

۱۲۲

- ۵-۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون**
۱. یک لامپ جوی گاز گواشدار سدیم، فوتون‌هایی با طول موج 589nm گسیل می‌کند. (الف) بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون‌ولت بیان کنید. (ب) فرض کنید توان تابشی طیف لامپ 50W است. در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟
۲. توان بارنگه تور خروچی یک لیزر گازی هلیوم-نئون 50mW است. حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر 2.28eV است. (الف) طول موج آستانه برای گسیل فوتوالکتریک از سطح فلز سدیم چقدر است و با مراجعه به شکل ۵-۴ معلوم کنید این طول موج مربوط به چه رنگی است؟ (ب) آیا فوتون‌هایی با طول موج 640nm قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟
۳. تابش فرافشی با طول موج 2.0nm به سطح نغزهای از جنس نیکل با تابع کار 7.8eV تابده می‌شود. بیشینه انرژی فوتوالکتریک‌های جدا شده از سطح نیکل را حساب کنید. (ب) هرگاه به سطح فلزی توری با طول موج 22nm تابده بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکتریک‌های گسیل‌شده حدود 0.5eV است. بسامد آستانه برای گسیل فوتوالکتریک‌ها از سطح این فلز چقدر است؟
- ۵-۲ و ۵-۳ طیف خطی و مدل اتم رابرت بور**
۴. (الف) طیف گسیلی یک جسم در چه مواردی پیوسته و در چه مواردی گسسته با خطی است؟ منشأ فیزیکی این تفاوت را توضیح دهید. (ب) توضیح دهید چگونه می‌توان طیف‌های گسیلی پیوسته و خطی را ایجاد کرد.
۵. شکل صفحه بعد سه رشته طیف گسیلی گاز هیدروژن امی را روی نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد که بر اساس مدل امی بور رسم شده است.

$$= (2/25\text{eV}) \left(\frac{1/6 \times 10^{-19}\text{J}}{1\text{eV}} \right) = 3/60 \times 10^{-19}\text{J}$$

تعداد فوتون‌هایی که در هر ثانیه با طول موج 550nm از این لامپ گسیل می‌شود برابر است با:

$$n = \frac{E_t}{E} = \frac{0.5\text{J}}{3/60 \times 10^{-19}\text{J}} = 1/38 \times 10^{17}$$

به این ترتیب تعداد فوتون‌هایی که با این طول موج وارد چشم ناظر می‌شوند برابر است با:

$$n' = \left(\frac{\pi r^2}{4\pi R^2} \right) n = \left(\frac{10^{-6}\text{m}^2}{4 \times 10^6\text{m}^2} \right) (1/38 \times 10^{17})$$

$$\Rightarrow n' = \left(\frac{1/38}{4} \right) \times 10^5 = 3/45 \times 10^4$$

۴ ابتدا انرژی متوسط هر فوتون را پیدا می‌کنیم.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\text{eV} \cdot \text{nm}}{570\text{nm}} = 2/17\text{eV}$$

$$= (2/17\text{eV}) \left(\frac{1/6 \times 10^{-19}\text{J}}{1\text{eV}} \right) = 3/48 \times 10^{-19}\text{J}$$

انرژی کل فوتون‌های رسیده به سطحی برابر 1m^2 در هر ثانیه برابر است با:

$$E_t = \left(300 \cdot \frac{\text{J}}{\text{sm}} \right) (1\text{m}^2) (\text{s}) = 300\text{J}$$

به این ترتیب تعداد فوتون‌هایی که در هر ثانیه به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد برابر است با:

$$n = \frac{E_t}{E} = \frac{300\text{J}}{3/48 \times 10^{-19}\text{J}} = 8/62 \times 10^{20}$$

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 1000J است. به همین دلیل است که سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی در ایران (به جز نوار شمالی) به مراتب از بسیاری از کشورهای دیگر جهان بازدهی بالاتری دارد.

۵ الف لازم است دانش‌آموزان فهم درستی از پاراگراف اول بخش ۵-۱ ارائه دهند.

ب) اینشتین افزون بر اینکه نور را به صورت 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 در حالی که با افزایش بسامد نور فرودی نسبت به بسامد آستانه، انرژی فوتون‌های تابش شده به سطح فلز افزایش می‌یابد و در نتیجه فوتوالکتریک‌ها 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

۵-۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون
 الف) یک لامپ جوی گاز کوئنسد سیم، فوتون‌هایی با طول موج 589nm گسیل می‌کند.
 ب) با فرض اینکه توان تابشی عبور از لامپ 50W است، در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟
 ج) توان بارنگه نور خرومی یک لیزر گازی هلیوم نئون 50mW است. اگر توان ورودی این لیزر 50W باشد، الف) بازده لیزر را حساب کنید. ب) اگر طول موج بارنگه نور خروجی 633nm باشد، شمار فوتون‌های را بداند که در هر ثانیه از این لیزر گسیل می‌شود. ج) یک لامپ رشته‌ای با توان 100W از فاصله یک کیلومتری دیده می‌شود. فرض کنید نور لامپ به‌طور یکنواخت در فضای اطراف آن منتشر می‌شود و بازده لامپ ۵ درصد است (یعنی 5W تابش مری گسیل می‌کند) و فقط ۱ درصد این تابش دارای طول موجی در حدود 550nm است. در هر ثانیه چه تعداد فوتون با این طول موج وارد مردمک‌های چشم ناظر می‌شود که در این فاصله قرار دارد؟ (قطر مردمک را 2mm در نظر بگیرید.)
 د) شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود 1000W/m^2 است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر 1m^2 مقدار انرژی 1000J 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 بازاری هر متر مربع حدود 1000W/m^2 باشد، در هر ثانیه چند فوتون به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد؟ طول موج متوسط فوتون‌ها را 500nm فرض کنید.
 ه) الف) منظور از اثر فوتوالکتریک چیست؟ ب) توضیح دهید نظریه کوانتومی تابش که توسط اینشتین مطرح شد و در آن نور به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفته شده چگونه به تئوری فوتوالکتریک کمک کرد؟ ج) معادله مربوط به اثر فوتوالکتریک به صورت $K_{\text{max}} = hf - W_0$ بیان می‌شود. به‌بخش این معادله را به‌طور جداگانه توضیح دهید.

۵-۲ و ۵-۳ طیف خطی و مدل اتم رادرفورد-بور
 الف) طیف گسیلی یک جسم در چه مواردی پیوسته و در چه مواردی گسسته است؟ منشأ فیزیکی این تفاوت را توضیح دهید.
 ب) توضیح دهید چگونه می‌توان طیف‌های گسیلی پیوسته و خطی را ایجاد کرد.
 ج) شکل صفحه‌ای بعد سه رشته طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را روی نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد که بر اساس مدل اتمی بور رسم شده است.

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 فوتوالکتریک‌هایی می‌شود که از سطح فلز خارج می‌شوند.

۷ الف)

$$W_0 = 2.28 \text{ eV}$$

$$f_s = \frac{W_0}{h} \Rightarrow \lambda_s = \frac{hc}{W_0} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{2.28 \text{ eV}} \approx 544 \text{ nm}$$

این طول موج متناظر با رنگ سبز است.

(ب) خیر، زیرا بسامد آنها کمتر از بسامد آستانه است.

۸

$$K_{\text{max}} = hf - W_0 = \frac{hc}{\lambda} - W_0$$

$$= \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{200 \text{ nm}} - 4.9 \text{ eV} = 1.3 \text{ eV}$$

۹

$$K_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda} - W_0 \Rightarrow 0.5 \text{ eV} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{420 \text{ nm}} - W_0$$

$$\Rightarrow W_0 = 2.45 \text{ eV}$$

$$f_s = \frac{W_0}{h} = \frac{2.45 \text{ eV}}{4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 5.92 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

۵-۲ و ۵-۳ طیف خطی و مدل اتم رادرفورد-بور :

۱۰ در پاراگراف اول بخش ۵-۲ درخصوص تفاوت طیف گسیلی اجسام جامد (که پیوسته است) و طیف گسیلی گازهای اتمی (که خطی است) توضیح داده شده است.

(ب) شکل‌های ۵-۶ و ۵-۸ روش تشکیل طیف گسیلی جسم جامد (مانند رشته تنگستن یک لامپ) و گاز اتمی (مانند گاز هیدروژن اتمی) نشان داده شده است.

۱۱ الف) $n=1$ متناظر با حالت پایه اتم است و برای اتم هیدروژن، انرژی الکترون در حالت پایه 13.6 eV است.

(ب) از یک طرف برهم‌کنش بین اتم‌های گاز بسیار ناچیز است و از طرف دیگر بنا بر مدل بور، الکترون در مدارهایی با شعاع $(r_n = a_0 n^2)$ و انرژی معین $(E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2})$ در فضای پیرامون هسته توزیع شده‌اند. لذا هنگام گذار الکترون‌هایی بین دو مدار، تنها فوتون‌هایی با انرژی معین می‌توانند گسیل یا جذب شوند. به همین دلیل طیف گسیلی یا جذبی گازهای اتمی، خطی است.

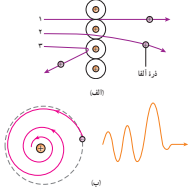
(پ) بلندترین طول موج به ازای $n=2$ و کوتاه‌ترین طول موج به ازای $n=\infty$ به دست می‌آید. به این ترتیب داریم :

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{4}{3R} \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{4}{3R} - \frac{1}{R} = \frac{1}{3R} \approx 30 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{1}{R}$$

فصل ۱۵: الکتریسیته و فیزیک اتمی

بیا تنها اعداد بسیار کمی از ذره‌ها مانند ذره ۳ شریف می‌شوند.
این امر چه نکته‌ای را درباره ساختار اتم طلا نشان می‌دهد؟
بیا چرا رادرفورد در آزمایش خود از صفحه پرتک بازرگ طلا استفاده کرده بود؟
نتیجه این به کدام مشکل مدل رادرفورد اشاره دارد و در مدل بور چگونه این مشکل رفع شده است؟

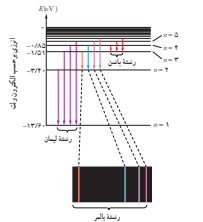


با استفاده از رابطه بور برای انرژی الکترون در اتم هیدروژن، اختلاف انرژی $E_5 - E_1 = \Delta E(5 \rightarrow 1)$ را حساب کنید.

بیا نشان دهید که:
 $\Delta E(5 \rightarrow 2) = \Delta E(5 \rightarrow 1) - \Delta E(2 \rightarrow 1)$
 $\Delta E(5 \rightarrow 3) = \Delta E(5 \rightarrow 1) - \Delta E(3 \rightarrow 1)$

الکترون اتم هیدروژن در تراز $n=5$ قرار دارد. اگر این اتم به حالت پایه برود، امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

بیا فرض کنید فقط گذارهای $n=1$ مجاز باشند. در این صورت امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟



الف) منظور از $n=1$ و انرژی -13.6 eV چیست؟
بیا بر اساس مدل اتمی بور دلیل خطی بودن طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را توضیح دهید.
بیا اختلاف کوتناوبین و بلندترین طول موج در هر رشته را، گستره طول موج‌های آن رشته می‌باشد. گستره طول موج‌های رشته لیان ($n_f = 1$) را پیدا کنید.

الف) فرایند جذب فوتون توسط اتم را توضیح دهید.
بیا با استفاده از مدل بور، چگونه می‌تواند خط‌های تاریک در طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را توجیه کنید؟

بیا وقتی که نور فرابنفش به بسیاری از مواد تابیده شود، تابش مرئی از خود گسیل می‌کنند. این پدیده فیزیکی نمونه‌ای از فوتوسنتزی است. آزمایش نشان می‌دهد در پدیده فوتوسنتزی طول موج‌های گسیل یافته معمولاً برابر همان طول موج نور فرودی با بزرگ‌تر از آن است. این پدیده را چگونه به کمک مدل بور می‌تواند تفسیر کنید؟

الف) منای مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که بر آنکه ذره‌های آلفا توسط یک ورقه نازک طلا دست آمده بود (شکل الف). الف) توضیح دهید چرا بیشتر ذره‌های آلفا مانند ذره‌های ۱ و ۲ با اصلاً منحرف نمی‌شوند یا به مقدار کمی منحرف می‌شوند.

۱۲ الف) به شکل ۵-۱۸ ب و شرح متناظر با آن توجه شود.

ب) با توجه به شکل ۵-۱۶، 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. نکته مهمی که باید توجه شود این است که مدت کوتاهی 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 (10^{-8} 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).

۱۲ الف و ب) به شرح مدل رادرفورد و شکل ۵-۱۸ 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.

۱۲ الف) با استفاده از رابطه ۵-۸ ($E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2}$) داریم:

$$\Delta E(n_u \rightarrow n_L) = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n_u^2} + \frac{13.6 \text{ eV}}{n_L^2} = (-13.6 \text{ eV}) \left(\frac{1}{n_u^2} - \frac{1}{n_L^2} \right)$$

(ب)

$$\Delta E(4 \rightarrow 2) = \Delta E(4 \rightarrow 3) + \Delta E(3 \rightarrow 2)$$

$$(-13.6 \text{ eV}) \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{2^2} \right) = (-13.6 \text{ eV}) \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{3^2} \right) + (-13.6 \text{ eV}) \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{2^2} \right)$$

$$\frac{1}{16} - \frac{1}{4} = \frac{1}{16} - \frac{1}{9} + \frac{1}{9} - \frac{1}{4} = \frac{1}{16} - \frac{1}{4}$$

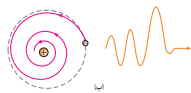
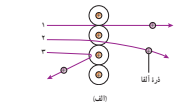
۱۵ الف) گذارهای ممکن از $n=5$ به حالت پایه ($n=1$) عبارت‌اند از:

$$\begin{array}{llll} \Delta E(5 \rightarrow 4) & \text{و} & \Delta E(4 \rightarrow 3) & \text{و} & \Delta E(4 \rightarrow 2) & \text{و} & \Delta E(4 \rightarrow 1) \\ \Delta E(5 \rightarrow 3) & \text{و} & \Delta E(3 \rightarrow 2) & \text{و} & \Delta E(3 \rightarrow 1) & & \end{array}$$

فصل پنجم: آشنایی با فیزیک اتمی ۳۰۱

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

ب) تنها اعداد بسیار کمی از ذره‌ها مانند ذره ۳ منحرف می‌شوند. این امر چه نکته‌ای را درباره ساختار اتم پلان نشان می‌دهد؟
ج) چرا رادرفورد در آزمایش خود از صفحه بسیار نازک طلا استفاده کرده بود؟
د) مشکل ب) به کدام مشکل مدل رادرفورد اشاره دارد و در مدل بور چگونه این مشکل رفع شده است؟



الف) منظور از $n = 1$ و انرژی -13.6 eV چیست؟
ب) بر اساس مدل اتمی بور دلیل خطی بودن طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را توضیح دهید.

ب) اختلاف کوتابین و بیشترین طول موج در هر رشته را، گستره طول موج‌های آن رشته می‌نامند. گستره طول موج‌های رشته لیان ($n_i = 1$) را پیدا کنید.

الف) فرایند جذب فوتون توسط اتم را توضیح دهید.
ب) با استفاده از مدل بور، چگونه می‌تواند خط‌های تالریک در طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را توجیه کنید؟

ب) وقتی که نور فرایض به بسیاری از مواد تابیده شود، تابش مرئی از خود گسیل می‌کنند. این پدیده فیزیکی نمونه‌ای از فوتوسنتزی است. آزمایش نشان می‌دهد در پدیده فوتوسنتزی طول موج‌های گسیل یافته معمولاً برابر همان طول موج نور فرودی یا بزرگ‌تر از آن است. این پدیده را چگونه به کمک مدل بور می‌تواند تبیین کنید؟

الف) بنای مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که از پراکندگی ذره‌های آلفا توسط یک ورقه نازک طلا بدست آمده بود (شکل الف). الف) توضیح دهید چرا بیشتر ذره‌های آلفا مانند ذره‌های ۱ و ۲ به اصلاً منحرف نمی‌شوند یا به مقدار کمی منحرف می‌شوند.

۱۳۵

$$\Delta E(2 \rightarrow 1) \quad \text{و} \quad \Delta E(5 \rightarrow 2)$$

$$\Delta E(5 \rightarrow 1)$$

همان‌طور که دیده می‌شود در مجموع امکان ۱۰ گذار وجود دارد.

ب) با توجه به شرط $\Delta n = 1$ ، تنها امکان ۴ گذار زیر وجود دارد.

$$\Delta E(3 \rightarrow 2) \quad \text{و} \quad \Delta E(4 \rightarrow 3) \quad \text{و} \quad \Delta E(5 \rightarrow 4)$$

$$\Delta E(2 \rightarrow 1)$$

۵-۴- لیزر

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_L و E_U است.

ث) هم بسامد، هم جهت و همگام (هم فاز) اند.

الف) فوتون‌های گسیل شده از رشته تنگستن لامپ دارای طیف گسترده و

پیوسته‌ای از طول موج‌ها هستند و در تمام جهت‌های مختلف حرکت می‌کنند

درحالی‌که آینه درون چراغ قوه جهت‌مندی بهتری به فوتون گسیل شده از

لامپ می‌دهد و فوتون‌ها در گستره فضایی کوچک‌تری منتشر می‌شوند.

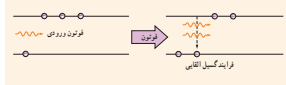
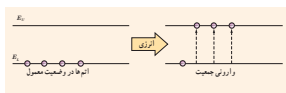
فوتون‌های گسیل شده از لیزر، افزون بر اینکه هم‌بسامدند، هم‌جهت و همگام هستند.

فیزیک ۳۱

فیز ۳-۵

ب) منظور از فرایند جمعیت چیست؟
ج) تا انرژی فوتون ورودی جملری باید باشد تا فرایند گسیل القایی انجام شود؟

الف) منظور از عبارت «اتم‌ها در وضعیت معمول» چیست؟
ب) نقش انرژی داده‌شده چیست و معمولاً این انرژی چگونه تبیین می‌شود؟

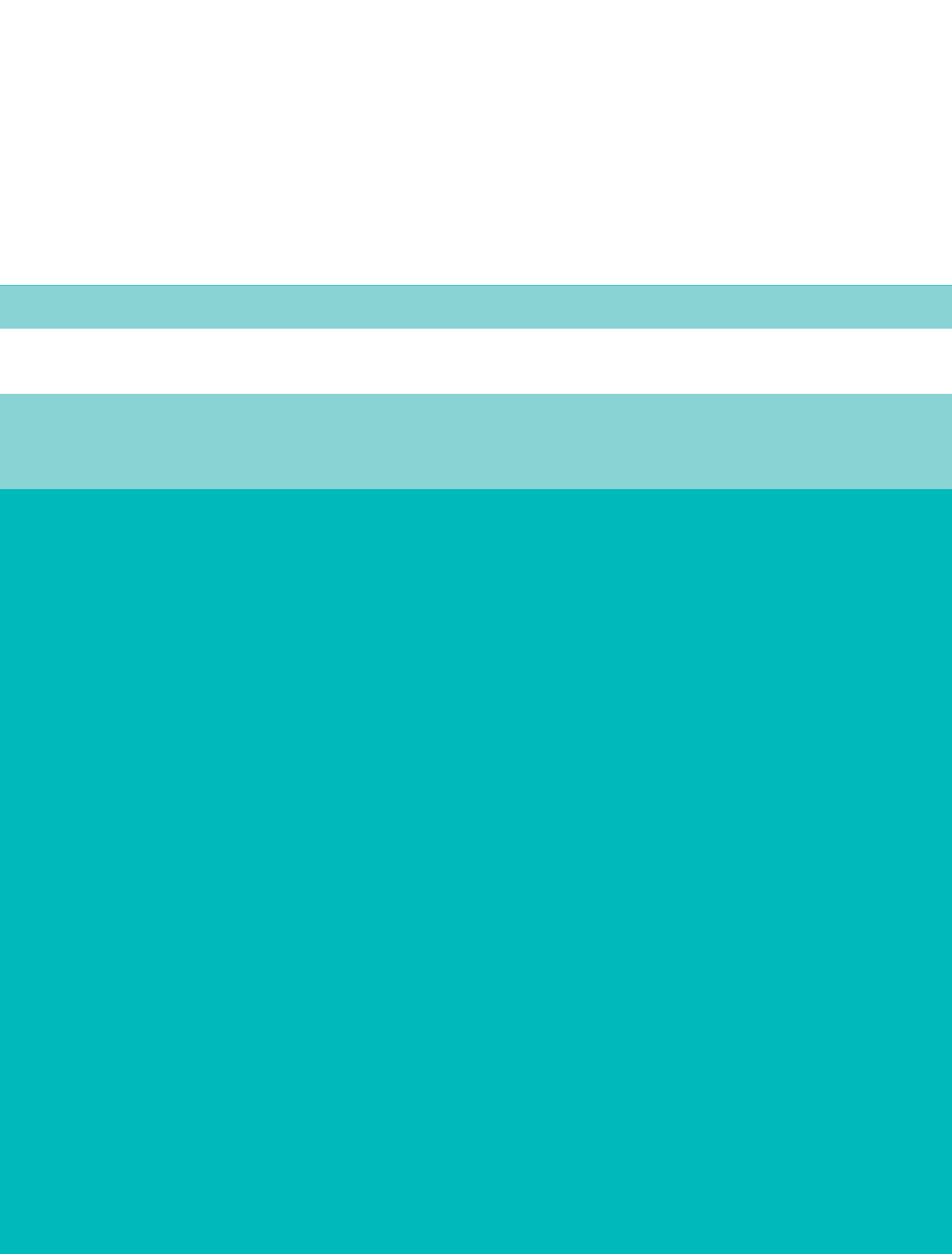


الف) در شکل زیر نحوه گسیل فوتون‌ها از سه چشمه نور شامل لامپ رشته‌ای، چراغ قوه یا لامپ رشته‌ای و لیزر با یکدیگر مقایسه شده است.

الف) با توجه به آنچه در این فصل فراگرفتید تفاوت فوتون‌های



۱۳۶



فصل ششم

آشنایی با فیزیک هسته‌ای

۶-۱- ساختار هسته

۶-۲- پرتوزایی طبیعی و نیمه عمر

۶-۳- شکافت هسته‌ای

۶-۴- 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 حوزه فیزیک هسته‌ای، می‌تواند پیامدهای زیان‌بار و غیرقابل جبرانی داشته باشد.

چه شناختی مطلوب است؟

- هسته 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 تشکیل‌دهنده 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 هسته سنگین به دو هسته با جرم کمتر، شکافت هسته‌ای نامیده می‌شود.
- فرایند ترکیب شدن دو هسته سبک و تشکیل هسته سنگین‌تر، گداخت یا همجوشی هسته‌ای نامیده می‌شود.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید در نظر گرفته شود؟

- مرتبه 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 هر کدام 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 دانش آموزان چه دانش و مهارت‌های اساسی را کسب می‌کنند؟

دانش‌آموزان خواهند دانست که :

- نوکلئون‌ها (شامل پرتون و نوترون) اجزای تشکیل دهنده هسته‌اند.
- هر نوکلئون فقط به نوکلئون مجاورش نیروی هسته‌ای وارد می‌کند.
- انرژی معادل انرژی بستگی هسته‌ای باید تأمین شود تا هسته به نوکلئون‌های تشکیل دهنده 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 کند (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 هسته سنگین‌تری به وجود آروند.

دانش‌آموزان قادر خواهند بود :

- به کمک عدد اتمی عناصر، محل و نام آنها را در جدول تناوبی عناصر مشخص کنند.
- نحوه جلودگیری و نفوذ هر کدام از پرتوهای α ، β و γ را به‌طور عملی پیشنهاد دهند.
- نحوه کار آشکارسازی دود را شرح دهند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

- جلسه اول : تصویر شروع فصل + مقدمه‌ای بر بحث فیزیک هسته‌ای + ساختار هسته تا ابتدای پایداری هسته.
- جلسه دوم : از پایداری هسته تا پایان بخش ۶-۱ + بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶ از شماره ۱ تا ۴.
- جلسه سوم : بخش ۶-۲ تا ابتدای نیمه‌عمر.
- جلسه چهارم : از ابتدای نیمه‌عمر تا پایان بخش ۶-۲ + بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶ از شماره ۵ تا شماره ۱۱.
- جلسه پنجم : بخش ۶-۳ و ۶-۴.
- جلسه ششم : جمع‌بندی و بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶ از شماره ۱۲ تا ۱۷.
- جلسه 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 ادامه فصل با جزئیات این روش آشنا می‌شوند.

تمرین ۶-۱

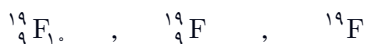
با توجه به جدول تناوبی عناصر که در پیوست کتاب آمده است

الف) عدد اتمی F عبارت است از $Z=9$. به این ترتیب:

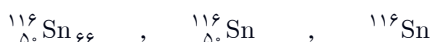
$$A = Z + N = 9 + 10 = 19$$

در نتیجه نماد هسته برای فلور را می توان به یکی از صورت های

زیر نوشت:



ب) عدد اتمی قلع برابر $Z=50$ است. به این ترتیب:



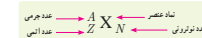
شکل ۸-۱: آشکارساز با فلوریک هیدروژن



عناصر جدول تناوبی (۱۹۱۱-۱۸۶۹)

فرانکلیت، پل از طی دوره کربن و اکسیژن و از آنجا که در ساختار هسته ای عناصر جدول تناوبی را می توان به صورت ${}^{A}_{Z}\text{X}$ نمایش داد. خواص شیمیایی هر اتم را عدد پروتون های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می کند. به همین سبب هسته هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته ها در جدول تناوبی عناصر هم مکان هستند و بنابراین **ایزوتوپ (هم مکان)** نامیده می شوند. به طور مثال، کربن به دو صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می شود که یکی از ${}^6\text{C}$ پروتون و ۶ نوترون (${}^{12}_6\text{C}$)، و دیگری از آنها از ${}^6\text{C}$ پروتون و ۷ نوترون (${}^{13}_6\text{C}$) تشکیل شده است. این دو هسته، ایزوتوپ های کربن هستند. جرم های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم های اتمی ایزوتوپ های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آنها حساب شده اند. به جز هیدروژن، ایزوتوپ های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می کنند (جدول ۶-۳).

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X، نماد هسته به صورت زیر نشان داده می شود:



مشخص کردن N در نماد ایزوتوپ ضروری نیست؛ زیرا می توان آن را از رابطه $A=Z+N$ بدست آورد. همچنین در بسیاری موارد Z را هم می توان ذکر نکرد؛ زیرا نماد شیمیایی عنصر، نشان دهنده مقدار Z است.

برای مثال، هسته اتم آلومینیم را به جای ${}^{27}_{13}\text{Al}$ می توان به صورت ${}^{27}\text{Al}$ یا ${}^{27}_{13}\text{Al}$ نمایش داد.

ایزوتوپ ها: ویژگی های هسته را عدد پروتون ها و نوترون های آن تعیین می کند. خواص شیمیایی هر اتم را عدد پروتون های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می کند. به همین سبب هسته هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته ها در جدول تناوبی عناصر هم مکان هستند و بنابراین **ایزوتوپ (هم مکان)** نامیده می شوند. به طور مثال، کربن به دو صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می شود که یکی از ${}^6\text{C}$ پروتون و ۶ نوترون (${}^{12}_6\text{C}$)، و دیگری از آنها از ${}^6\text{C}$ پروتون و ۷ نوترون (${}^{13}_6\text{C}$) تشکیل شده است. این دو هسته، ایزوتوپ های کربن هستند. جرم های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم های اتمی ایزوتوپ های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آنها حساب شده اند. به جز هیدروژن، ایزوتوپ های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می کنند (جدول ۶-۳).

جدول ۶-۳: ایزوتوپ های 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	۹۹.۹۸۵	کربن ۱۲	C	۶	۶	۹۸.۹۳
دوتریم (هیدروژن ۲)	D	۱	۱	۰.۰۱۵	کربن ۱۳	C	۶	۷	۱.۰۷
ترسیم (هیدروژن ۳)	T	۱	۲	بسیار نادر	اورانیوم ۲۳۵	U	۹۲	۱۴۳	۰.۰۰۰۷۲
کربن ۱۴	C	۶	۸	۱.۰۷	اورانیوم ۲۳۸	U	۹۲	۱۴۶	۹۹.۹۸۴

تمرین ۶-۲

با توجه به آنچه تاکنون دیدید و همچنین با استفاده از جدول تناوبی عناصر، که در پیوست کتاب آمده است، نماد هسته را در هر یک از موارد زیر تعیین کنید.

الف) ایزوتوپ فلور (F) با عدد نوترونی ۱۰

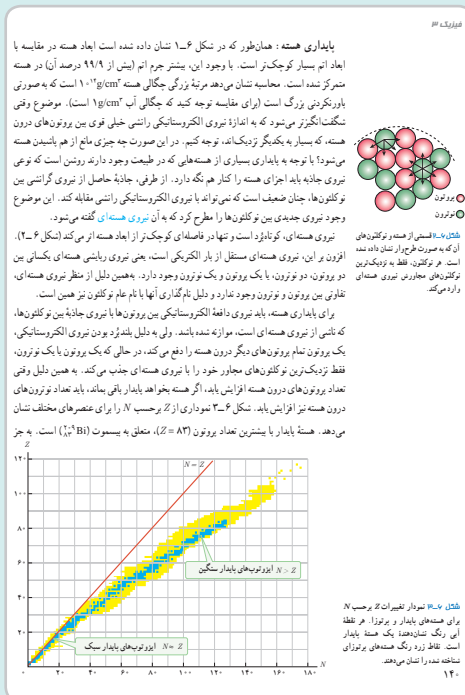
ب) ایزوتوپ قلع (Sn) با عدد نوترونی ۶۶

۱- در کتاب های تخصصی فیزیک هسته ای، این نماد را عدد نوکلئید (nuclide) می نامند.

راهنمای معلم

پایداری هسته

در این قسمت ویژگی های نیروی هسته ای و اهمیت آن در پایداری هسته با توجه به نیروی دافعه شدید بین پروتون های درون هسته بررسی شده است. لازم است توجه کنید که در این کتاب به تقسیم بندی نیروی هسته ای به دو نیروی هسته ای ضعیف و هسته ای قوی پرداخته نشده است بلکه صرفاً به مفهوم نیروی هسته ای به عنوان نیروی جاذبه که بین نوکلئون های مجاور یکدیگر وارد می شود اشاره شده است. همان طور که در شکل ۶-۲ نیز نشان داده شده است، نیروی هسته ای تنها بین نوکلئون های مجاور (یا به عبارت دیگر همسایه های اول) وارد می شود، زیرا نیروی هسته ای به شدت کوتاه برد است. دلیل نام گذاری نوکلئون نیز برای پروتون ها و نوترون های درون هسته به دلیل ماهیت نیروی هسته ای باز می گردد. از منظر نیروی هسته ای، تمامی ذرات داخل هسته که مجاور یکدیگرند نیروی هسته ای جاذبه ای به یکدیگر وارد می کنند و این نیرو مستقل از بار الکتریکی نوکلئون ها است.



پرسش ۱-۶

الف) همان‌طور که در نمودار ۱-۶ 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:

upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Isotopes_and_half-life.svg



انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته : ادامهٔ راهنمای معلم را در این قسمت به‌طور کیفی و براساس شکل ۶-۴ 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

۶-۲ 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 ۴- آشنایی با فیزیک هسته‌ای

در این رابطه X هسته مادر و Y هسته دختر نامیده می‌شود. شکل ۶-۵، مثالی از واپاشی آلفا، برای اورانیوم ۲۳۸ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

هسته مادر ${}_{92}^{238}\text{U}$ → هسته دختر ${}_{90}^{234}\text{Th}$ + ذره آلفا ${}_{2}^{4}\text{He}$

شکل ۶-۵ در واپاشی α یک هسته مادر ناپایدار، ذره α گسیل می‌کند و هسته متعلق به هسته دختر (پروبیوم) می‌آید.

ذره‌های آلفا، سنگین‌اند و بار مثبت دارند. ژرد این ذره‌ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۲ تا ۱۱ سانتی‌متر) و 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 آلفا هرگز وارد بدن نشوند.

نظری و کاربرد: واپاشی آلفا و آشکارسازهای دود

یکی از کاربردهای گسترده واپاشی α در آشکارسازهای دود است (شکل الف). شکل ب، مدار و بخش اصلی یک آشکارساز دود را نشان می‌دهد. دو صفحه کوچک و موازی فلزی در فاصلهٔ حدود یک سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. مقدار اندکی ماده 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 باری باعث می‌شود یک صفحه مثبت و صفحه دیگر منفی باشد، به طوری که هر صفحه یون‌های با بار مخالف را جذب می‌کند. در نتیجه در مدار متصل به صفحه‌ها جریان به‌وجود می‌آید. وجود ذرات دود میان صفحه‌ها جریان را کاهش می‌دهد؛ زیرا یون‌هایی که به ذرات دود برخورد می‌کنند معمولاً خنثی می‌شوند. آفت جریان که ذرات دود باعث آن می‌شود هشدار دهنده‌ای را به کار می‌آورد.

پرسش ۶-۳

شکل رویه‌ی طرح آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان به نوع پرتوزایی طبیعی را مشاهده کرد و به تفاوت بار و جرم پرتوها از یکدیگر پی برد. قطعاتی از ماده پرتوزا را در نه حفرهٔ باریکی در یک استوانهٔ سربی قرار می‌دهند. استوانه را درون اتاقک‌های می‌کشند و هوای درون آن را تخلیه می‌کنند. سپس یک صفحهٔ عکاسی فلزی حفره قرار می‌دهند و میدان مغناطیسی بگوشی درون اتاقک برقرار می‌کنند. خطوط فریزرنگه، مسیر حرکت پرتوها را نشان می‌دهد. نوع بار پرتوها را با هم مقایسه کنید.

میدان مغناطیسی عمود بر صفحه کاذب به طرف درون استوانه سربی

اتاقک خلا

صفحه عکاسی

ماده پرتوزا

واپاشی α : در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هسته X با گسیل ذره آلفا واپاشد. شواهد تجربی نشان می‌دهد که پرتوها α ، ذرات باردار مثبت از جنس هستهٔ اتم هلیوم (${}_{2}^{4}\text{He}$) هستند و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده‌اند. واپاشی α با رابطه زیر بیان می‌شود:

$${}_{Z}^{A}\text{X} \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}\text{Y} + {}_{2}^{4}\text{He} \quad (\text{واپاشی } \alpha) \quad (۶-۳)$$

۱۲۲

فصل ۴- آشنایی با فیزیک هسته‌ای

در این رابطه X هسته مادر و Y هسته دختر نامیده می‌شود. شکل ۶-۵، مثالی از واپاشی آلفا، برای اورانیوم ۲۳۸ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

هسته مادر ${}_{92}^{238}\text{U}$ → هسته دختر ${}_{90}^{234}\text{Th}$ + ذره آلفا ${}_{2}^{4}\text{He}$

شکل ۶-۵ در واپاشی α یک هسته مادر ناپایدار، ذره α گسیل می‌کند و هسته متعلق به هسته دختر (پروبیوم) می‌آید.

ذره‌های آلفا، سنگین‌اند و بار مثبت دارند. ژرد این ذره‌ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۲ تا ۱۱ سانتی‌متر) و 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 آلفا هرگز وارد بدن نشوند.

نظری و کاربرد: واپاشی آلفا و آشکارسازهای دود

یکی از کاربردهای گسترده واپاشی α در آشکارسازهای دود است (شکل الف). شکل ب، مدار و بخش اصلی یک آشکارساز دود را نشان می‌دهد. دو صفحه کوچک و موازی فلزی در فاصلهٔ حدود یک سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. مقدار اندکی ماده 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 باری باعث می‌شود یک صفحه مثبت و صفحه دیگر منفی باشد، به طوری که هر صفحه یون‌های با بار مخالف را جذب می‌کند. در نتیجه در مدار متصل به صفحه‌ها جریان به‌وجود می‌آید. وجود ذرات دود میان صفحه‌ها جریان را کاهش می‌دهد؛ زیرا یون‌هایی که به ذرات دود برخورد می‌کنند معمولاً خنثی می‌شوند. آفت جریان که ذرات دود باعث آن می‌شود هشدار دهنده‌ای را به کار می‌آورد.

پرسش ۶-۳

شکل رویه‌ی طرح آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان به نوع پرتوزایی طبیعی را مشاهده کرد و به تفاوت بار و جرم پرتوها از یکدیگر پی برد. قطعاتی از ماده پرتوزا را در نه حفرهٔ باریکی در یک استوانهٔ سربی قرار می‌دهند. استوانه را درون اتاقک‌های می‌کشند و هوای درون آن را تخلیه می‌کنند. سپس یک صفحهٔ عکاسی فلزی حفره قرار می‌دهند و میدان مغناطیسی بگوشی درون اتاقک برقرار می‌کنند. خطوط فریزرنگه، مسیر حرکت پرتوها را نشان می‌دهد. نوع بار پرتوها را با هم مقایسه کنید.

میدان مغناطیسی عمود بر صفحه کاذب به طرف درون استوانه سربی

اتاقک خلا

صفحه عکاسی

ماده پرتوزا

واپاشی α : در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هسته X با گسیل ذره آلفا واپاشد. شواهد تجربی نشان می‌دهد که پرتوها α ، ذرات باردار مثبت از جنس هستهٔ اتم هلیوم (${}_{2}^{4}\text{He}$) هستند و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده‌اند. واپاشی α با رابطه زیر بیان می‌شود:

$${}_{Z}^{A}\text{X} \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}\text{Y} + {}_{2}^{4}\text{He} \quad (\text{واپاشی } \alpha) \quad (۶-۳)$$

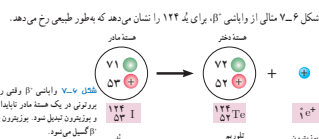
۱۲۳

پرسش ۲-۶

در تصویر داده شده مربوط به این پرسش در کتاب رشته ریاضی (چاپ ۱۳۹۷) لازم است میزان \bar{B} به صورت پروتسو در نظر گرفته شود. این تصویر کتاب رشته تجربی درست است.

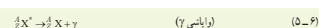
با توجه به حضور میزان \bar{B} مسیر بدون انحراف از جنس تابش گاما است و مسیر با انحراف کمتر مربوط به ذرات آلفا و مسیر با انحراف بیشتر مربوط به ذرات بتا منفی است.

فصل ۶: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

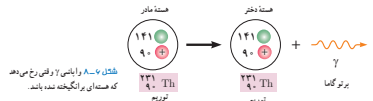


تمرین ۳-۶ ایزوتوپ $^{90}_{40}\text{Th}$ با گسیل پوزیترون، واپاشی می‌کند. معادله این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

واپاشی γ : اغلب هسته‌ها پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته قرار می‌گیرند و با گسیل فوتون‌های یو انرژی (پرتو گاما) به حالت پایه می‌رسند. در این فرایند، A و Z تغییر نمی‌کنند؛ بلکه هسته برانگیخته که با علامت $*$ مشخص شده است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد. واپاشی γ با رابطه زیر بیان می‌شود.



شکل ۶-۸ مثالی از واپاشی γ برای توریم $^{232}_{90}\text{Th}$ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



جراحی با پروتوهای گاما

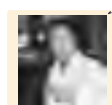
جراحی با پروتوهای گاما، روشی پزشکی نوین است که در سال‌های اخیر برای درمان مشکلات خاصی در مغز، از جمله تخریب غده‌های خوش‌خیم و سرطانی و نیز رفع نقص‌ها در رگ‌های خونی استفاده می‌شود. در این روش که از هیچ جراحی استفاده نمی‌شود، از پرتوهای بسیار متمرکز و توانمندی از پروتوهای گاما که متوجه غده و نقص در رگ‌ها می‌شوند بهره می‌گیرند. پروتوهای γ توسط جشده کالت ^{60}Co گسیل می‌شوند. همان‌طور که شکل آلفا نشان می‌دهد، پیمار یک کلاه ایمنی فلزی بر سر می‌گذارند که سوراخ‌های بسیار کوچکی روی آن ایجاد شده است. پروتوهای عبوری از این سوراخ‌ها، روی هدف مورد نظر درون مغز متمرکز می‌شوند. از این رو باعث هدف، مقدار بسیار زیادی تابش را دریافت می‌کنند و تخریب می‌شوند، در حالی که بافت سالم مجاور آسیب نمی‌بیند. جراحی با پروتوهای گاما، روشی بدون درد و

فیزیک ۳۱

واپاشی β^- : واپاشی بتا، نخستین مورد پرتوهای یو که در سال‌های پایانی قرن نوزدهم، توسط هانری بکل 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 هسته مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون‌های ماباری آنم نیست؛ این الکترون وقتی به وجود می‌آید که نوترونی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود. فرایند واپاشی β^- را با رابطه زیر بیان می‌کنند:



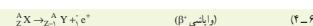
شکل ۶-۶ مثالی از واپاشی β^- برای توریم $^{232}_{90}\text{Th}$ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



جی. ان. رزبرگ (۱۸۷۸-۱۹۴۷) را از زمره ریسختورین فیزیکدان‌های قرن بیستم می‌دانند که در ۱۹۱۲ در شهر برن سوئیس متولد شد. جی. ان. رزبرگ از دانشمندان برجسته‌ای است که در زمینه فیزیک ذرات و فیزیک هسته‌ای فعالیت داشته‌اند. رزبرگ با همکاری همسرش آنی رزبرگ، در سال ۱۹۰۵ نظریه نسبیت خاص را ارائه داد. رزبرگ در سال ۱۹۰۵ با دریافت جایزه نوبل فیزیک، به همراه آلبرت اینشتین و پییر و کوری، به دلیل تحقیقات خود در زمینه فیزیک ذرات و فیزیک هسته‌ای، برنده این جایزه شد. رزبرگ در سال ۱۹۲۷ با دریافت جایزه نوبل فیزیک، به همراه لوئیس براونر و کورت گروتر، به دلیل تحقیقات خود در زمینه فیزیک ذرات و فیزیک هسته‌ای، برنده این جایزه شد. رزبرگ در سال ۱۹۳۷ با دریافت جایزه نوبل فیزیک، به همراه ارنست رزبرگ و کورت گروتر، به دلیل تحقیقات خود در زمینه فیزیک ذرات و فیزیک هسته‌ای، برنده این جایزه شد. رزبرگ در سال ۱۹۴۷ با دریافت جایزه نوبل فیزیک، به همراه ارنست رزبرگ و کورت گروتر، به دلیل تحقیقات خود در زمینه فیزیک ذرات و فیزیک هسته‌ای، برنده این جایزه شد.

تمرین ۲-۶ لوتیم ($^{176}_{71}\text{Lu}$) عنصر پرتوهای است که با گسیل بتای منفی، واپاشی می‌کند. معادله 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، ذره 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^+ را با رابطه زیر بیان می‌شود:



۱- در واپاشی β^+ ذره‌ای دیگر به نام نوترون را نیز به نظر بگیرید ($e^+ + e^- = 2e^+$)؛ همچنین در واپاشی β^- ذره‌ای دیگر به نام پوزیترون را نیز به نظر بگیرید ($e^- + e^+ = 2e^-$)؛ در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

۱۲۲

تمرین ۲-۶



لوتسیم $^{176}_{71}\text{Lu}$ ، دارای یک ایزوتوپ پایدار $^{175}_{71}\text{Lu}$ با درصد فراوانی ۹۷/۴۱ درصد است. همچنین دارای سه ایزوتوپ ناپایدار که در این میان $^{176}_{71}\text{Lu}$ ، با درصد فراوانی ۲/۵۹۹ درصد، دارای نیمه عمر 3.78×10^{10} سال است.

۱۴ و ۱۵ نشان می‌دهند. میون‌ها ذراتی بنیادی و دارای طول‌عمری از مرتبه میکروثانیه هستند.^{۱۵}

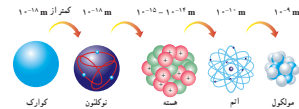
طبقه‌بندی ذرات؛ تمامی ذرات زیر اتمی را در سه خانواده **جامل‌های نیرو**، **لیتون‌ها** و **جادرون‌ها** می‌توان طبقه‌بندی کرد.

■ خانواده **جامل‌های نیرو** از ذراتی تشکیل شده‌اند که قشطن اساسی در پرمیشت‌ها بازی می‌کنند. برای مثال، فوتون که یکی از ذرات عضو این خانواده است عامل پرمیشت‌های الکترومغناطیسی است.

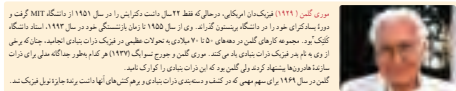
■ خانواده **لیتون‌ها** شامل ذراتی هستند که تمامی آنها بنیادی‌اند. الکترون، پوزیترون، نوترینوها و میون‌ها از جمله ذرات عضو خانواده لیتون‌ها هستند.

■ خانواده **جادرون‌ها**، شامل ذراتی غیر بنیادی هستند که از ذرات ریزتری به نام **کوارک‌ها** ساخته شده‌اند. پروتون، نوترون و میون‌ها^{۱۶} از جمله ذرات خانواده جادرون‌ها به‌شمار می‌روند.

کوارک‌ها؛ همان‌طور که اشاره کردیم ذرات خانواده جادرون‌ها، مانند پروتون و نوترون بنیادی نیستند. برای توضیح این موضوع، در سال ۱۹۶۴ دو فیزیکدان آمریکایی به نام‌های موری گلمن و جورج سولایگ به‌طور مستقل، مدلی را پیشنهاد کردند که مطابق آن، جادرون‌ها از ترکیب ذرات بنیادی به نام کوارک‌ها تشکیل شده‌اند. در این مدل، سه نوع کوارک و سه باکوارک متناظر با آنها پیشنهاد شده است. به این ترتیب، می‌توان گفت ذرات بنیادی یا همان بلی سازه‌های ماده، کوارک‌ها و لیتون‌ها هستند و همه عالم از آنها ساخته شده است. شکل زیر طرحی ساده از چگونگی تشکیل ماده از واحدهای اصلی را نشان می‌دهد.



کوارک‌ها، نوترون‌ها را می‌سازد. نوترون‌ها (که عضو خانواده جادرون‌ها هستند) هسته را می‌سازند. اتم‌ها از هسته و الکترون (عضو خانواده لیتون‌ها) ساخته می‌شوند. اتم‌ها، مولکول‌ها را می‌سازند و عالم ماده از آنها ساخته می‌شود.



۱- در یک روش برای تولد میون، پرتوهای پرتوهای انرژی بالا (تا ۱۰ MeV) به هدف ذراتی از جنس کربن برخورد می‌کنند و یک نوترون و یک π^+ تولید می‌شود. پس از π^+ به π^0 تبدیل می‌شود.
۲- میون‌ها در سال ۱۹۳۶ کشف شدند و به سه صورت مثبت، منفی و خنثی وجود دارند که به ترتیب با π^+ ، π^0 و π^- نشان داده می‌شوند. جرم هر سه میون با یکدیگر برابر است.
میون‌های π^+ و π^- با ذراتی با یکدیگر و دارای طول‌عمری از مرتبه 10^{-8} ثانیه هستند.

۳- California Institute of Technology



فصل ۳۲-۱ طرحی از راکتور آزمایشی گرما هسته‌ای بین‌المللی (ITER). ساخت این راکتور با مشارکت چین کشور جهان، از سال ۲۰۰۷ به فرانسه شروع شده است و پیش‌بینی می‌شود برای آن در سال ۲۰۲۵ با تمام هزینه ۵۰۰ میلیون یورو به کارگرفته شود.

از آنجا که در واکنش‌های گداخت، مقدار بسیار زیادی انرژی آزاد می‌شود، ساخت راکتورهای گداخت مورد توجه زیادی است (شکل ۳۲-۴). اگرچه تاکنون نوع تجاری آن ساخته نشده است. مشکلات در ساخت راکتور گداخت به این علت پیش می‌آید که دو هسته کرم‌جرم به هم نزدیک شوند تا نیروی کربانه‌ای هسته‌ای بتواند آنها را کنار هم بکشد و در واکنش گداخت انجام شود. ولی، هر هسته، بار مثبت دارد و هسته دیگر را دفع می‌کند، برای آنکه هسته‌ها با وجود این نیروی رانشی بسیار قوی، بتوانند به هم گداخت 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-تريتم به دمای حدود ده‌ها میلیون درجه سلسیوس نیاز است. دمای از این مرتبه در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً خورشید، که در آن از گداخت هسته‌های هیدروژن انرژی آزاد می‌شود، دمای درونی آن فراز از ۲۰ میلیون درجه سلسیوس برآورد شده است. در نتیجه واکنش گداخت هسته‌ای، در مرکز خورشید و ستارگان که دما و فشار بسیار بالاست صورت می‌گیرد.

آشنایی مختصر با ذرات بنیادی

تا سال ۱۹۳۲ سه ذره سازه‌ای اتم‌ها شامل الکترون، پروتون، و نوترون کشف شده بودند و به‌عنوان سه ذره بنیادی تصور می‌شدند ولی سواد تجربی بدست آمده پس از آن، نشان داد که به تنها و نوترون ذرات بنیادی نیستند؛ بلکه صدها ذره 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 میون‌ها ذرات غیر بنیادی‌اند و از ذرات بنیادی‌ای به نام کوارک‌ها ساخته شده‌اند.

در نشان‌دهنده‌ها بیشتر ذرات زیر اتمی را با برخورد پروتون‌ها یا نوترون‌های پر انرژی با یک هسته هدف موجود می‌آورند. در ادامه به معرفی چند ذره بنیادی پرداخته و به طبقه‌بندی ذرات زیر اتمی نیز اشاره می‌شود.

پوزیترون؛ در سال ۱۹۳۲ درای با همان جرم الکترون ولی با بار مخالف ($+$) توسط کارل آنتونسون، فیزیک‌دان آمریکایی، کشف شد و جایزه نوبل فیزیک ۱۹۳۶ را برای وی به همراه داشت. این الکترون مثبت، پوزیترون نامیده شد که

یادآور الکترون است! پوزیترون پادمار است و خودبه‌خود و پاینده نمی‌شود.

نوترینوها؛ در وایانی ۱۵ با این ذره آشنا شدید که در سال ۱۹۳۰ میلادی توسط ولنگانگ پاولی 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. همین‌طور آشکارسازی آنها بسیار دشوار است. زیرا با ماده پرمیشت بسیار ضعیفی دارند. برای مثال، در هر ثانیه از مرتبه هزار میلیارد نوترینو از بدن ما می‌گذرد و اثر شناخته‌شده‌ای 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 اندازه بار آنها برابر بار الکترون بود. این دو ذره را که جرمی یکسان، ولی بار مخالف دارند میون می‌نامند و با نمادهای

۱- International Thermoelectric Experimental Reactor

۲- پوزیترون (positive electron)، صورت گرفته‌ای الکترون مثبت (positive electron) است.

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۶

۱ فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیوم $^{238}_{92}\text{U}$ است. عددهای ۲۳۸ و ۹۲ نشان‌دهنده 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) نقره ۱۰۸، ایزوتوپ دیگری از نقره است. به‌طور کامل توضیح دهید واژه 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 کدام یک 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) کدام یک از ذره‌هایی که با \bullet ، \circ و \times نشان داده شده‌اند

۱ بار مثبت دارند؟

۲ بار ندارند؟

۳ جرمشان از همه کمتر است؟

(ت) با همین نمادها نمودار ذره α را رسم کنید.

۴ کدام تابش از ماده پرتوزا

(الف) بار مثبت دارد؟

(ب) بیشترین قدرت نفوذ را دارد؟

(پ) در میدان مغناطیسی به راحتی منحرف می‌شود؟

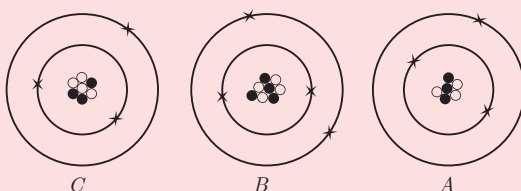
(ت) از موج الکترومغناطیسی تشکیل شده است؟

(ث) باعث شدیدترین یونش می‌شود؟

(ج) در هوا کوچک‌ترین برد را دارد؟

(چ) بار منفی دارد؟

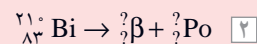
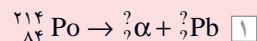
(ح) در میدان الکتریکی منحرف نمی‌شود؟



۵ جدول زیر را کامل کنید.

ذره یا پرتو	جرم	بار
پروتون	یک واحد	+ یک واحد
نوترون
الکترون
ذره آلفا
ذره بتا
پرتو گاما

الف) واکنش‌های زیر را که نشان‌دهندهٔ واپاشی پرتوزا هستند کامل کنید.



ب) با توجه به دو واکنش بالا توضیح دهید در واپاشی‌های

۱ آلفازا

۲ بتازا

چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟

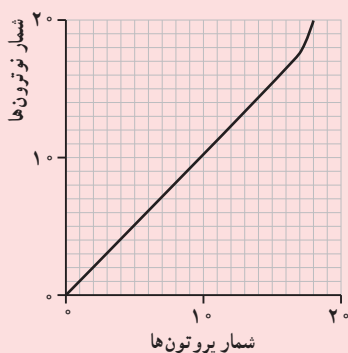
۶ گسیل پرتوی گاما چه اثری بر هسته می‌گذارد؟

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 ${}_{29}^{63}\text{Cu}$ با نوترون بمباران می‌شود و با جذب نوترون به یک ایزوتوپ پرتوزا تبدیل می‌شود.

الف) رابطه‌ای برای نشان دادن جذب نوترون به وسیلهٔ 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:

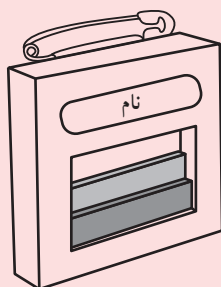
الف) شمار پروتون‌های هستهٔ آن چند است؟

ب) روی نمودار با علامت × جای فسفر ۳۲ را مشخص کنید.

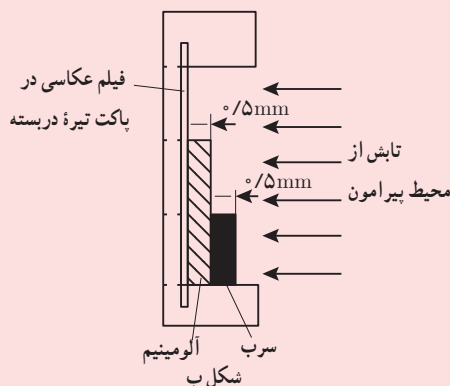
پ) از روی نمودار چگونه تشخیص می‌دهید که فسفر ۳۲ پرتوزا است؟

ت) با محاسبهٔ نسبت $\frac{N}{Z}$ نشان دهید که فسفر ۳۲ با واپاشی β^- به یک ایزوتوپ

پایدار تبدیل می‌شود.



شکل الف



شکل ب

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 یک بار 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:

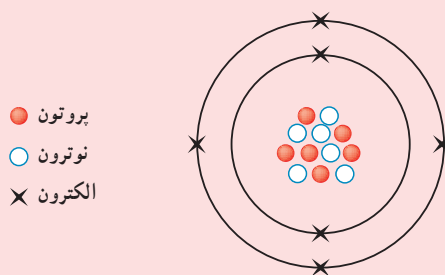
الف) چرا نباید دزسنج را در جیب گذاشت؟

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 $^{12}_6\text{C}$ را نشان می‌دهد. جدول زیر را کامل کنید.



شکل ۴-۱۲

ذره	تعداد آن در اتم
پروتون
نوترون
الکترون

ب) کربن $^{14}_6\text{C}$ پرتوزاست. چه تفاوتی میان کربن $^{12}_6\text{C}$ و کربن $^{14}_6\text{C}$ وجود دارد؟

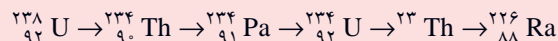
پ) کربن $^{14}_6\text{C}$ با گسیل ذره بتا واپاشی می‌کند.

۱- بتا از کدام بخش اتم گسیل می‌شود؟

۲- کدام گزینه دربارهٔ ذرهٔ بتا درست است؟

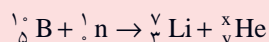
الف) پروتون سریع ب) نوترون سریع پ) الکترون سریع

۱۲) بخش نخست از زنجیرهٔ واپاشی ایزوتوپ $^{238}_{92}\text{U}$ به صورت زیر است :



در این پنج مرحله چه ذره‌هایی گسیل می‌شوند؟

۱۳) مغز انسان می‌تواند دچار یک نوع تومور مغزی به نام گلیوبلاستوم شود. این نوع تومور در مغز پخش می‌شود و نمی‌توان آن را با جراحی درمان کرد. به جای آن جراحان مغز و اعصاب به بیمار محلولی تزریق می‌کنند که حاوی عنصر بور است. گلیوبلاستوم بور را جذب می‌کند. سپس مغز بیمار را با ذره‌های نوترون بمباران می‌کنند. واکنش زیر انجام می‌شود :



الف) در واکنش بالا x و y را مشخص کنید.

ب) هسته بور به لیتیم و هلیوم تجزیه می‌شود. این فرایند چه نام دارد؟ توضیح دهید چرا هسته‌های هلیوم و لیتیم به سرعت از هم دور می‌شوند.

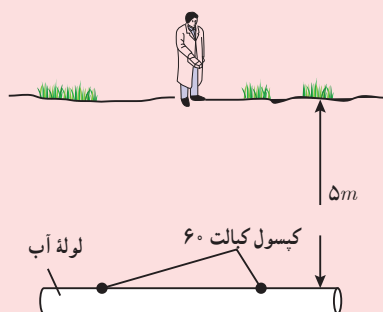
پ) توضیح دهید چگونه این فرایند موجب نابودی گلیوبلاستوم می‌شود.

ت) چرا این فرایند برای افراد سالم خطرناک است؟

۱۴) نیمه‌عمر سیزیم $^{131}_{53}\text{I}$ در محیطی که تابش زمینه 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 روبه رو). کپسول کبالت ^{60}Co چشمه‌هایی پرتوزا هستند که به لوله‌ها جعبانیده شده‌اند و پرتوهای گاما گسیل می‌کنند. لوله‌های در عمق ۵ متری قرار دارند. الف) توضیح دهید چرا چشمه‌های گسیل‌کننده 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 به کار روند نام ببرید.

۲ دو بخش از طیف الکترومغناطیسی را که می‌توانند در ارتباطات به کار روند نام ببرید.

۳ دو بخش از طیف الکترومغناطیسی را که می‌توانند برای تولید گرما به کار 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؟

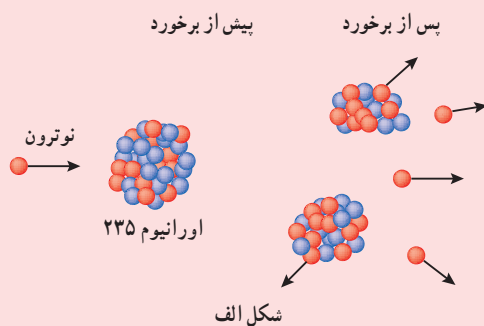
پ) دو مزیت و دو اشکال استفاده از نیروگاه هسته‌ای را بنویسید.

ت) واژه‌های ژنراتور، مبدل گرمایی، رآکتور و بخار را در جای درست خود در چند جمله زیر به کار ببرید:

در نیروگاه هسته‌ای، شکافت هسته‌ای در صورت می‌گیرد. انرژی به وسیله خنک‌کننده از سوخت هسته‌ای گرفته می‌شود و به منتقل می‌شود که در آنجا برای تولید به کار می‌رود و توربین‌ها را به کار می‌اندازد. توربین‌ها را می‌چرخانند و برق تولید می‌کنند.

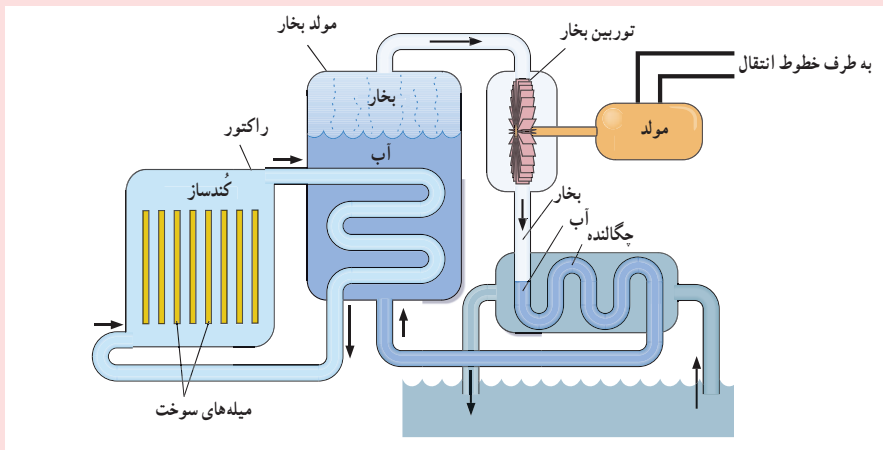
۱۷ در یک ایستگاه تولید برق هسته‌ای، از انرژی آزاد شده در فرایند شکافت هسته برای تولید برق استفاده می‌شود.

الف) شکافت اورانیوم ^{235}U در شکل الف نشان داده شده است.



۱ فرایندی را که در این نمودار نشان داده شده است شرح دهید.

۲) در شکافت اورانیوم ^{235}U انرژی از هسته آزاد می شود. این انرژی کجا می رود؟
 ب) در شکل ب اجزای اصلی ایستگاه برق هسته ای دیده می شود. توضیح دهید چگونه سوخت آن برای تولید انرژی به کار می رود.

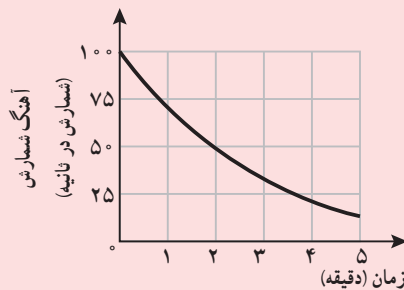


شکل ب

۱۸) الف) حدود نیروی رانش میان دو پروتون را که در فاصله 10^{-14} متری یکدیگر واقع اند برآورد کنید. ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$)
 ب) با توجه به نتیجه بخش الف، کار نیروی هسته ای را در جدا کردن دو ذره هسته ای تخمین بزنید.

۱۹) ایزوتوپ پرتوزای ^{232}Th در چهار واپاشی بی دربی دو ذره آلفا و دو ذره بتا گسیل می کند. اگر هسته دختر به صورت ^A_ZX باشد، اندازه های A و Z را مشخص کنید. آیا ^{232}Th و ^A_ZX ایزوتوپ اند؟ چرا؟

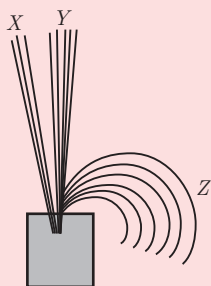
۲۰) نمودار واپاشی یک اتم به صورت شکل زیر است. نیمه عمر آن چقدر است؟



شکل ۴-۲۰

۲۱) واپاشی پرتوزای ایزوتوپ کوتاه عمر توریم با رابطه $^{225}\text{Th} \rightarrow ^A_Z\text{Ra} + \alpha$ مشخص می شود. نیمه عمر آن 8.0 دقیقه است.
 الف) A و Z چه کمیتی را نشان می دهند؟
 ب) مقدار آنها چقدر است؟

۲۲) الف) تفاوت بار، جرم و سرعت پرتوهای آلفا، بتا و گاما را بنویسید.



ب) در نخستین سال‌های سده 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 X ، Y و Z را مشخص کنید.

۲ جهت میدان مغناطیسی را تعیین کنید.

۲۳ خورشید با آهنگ $4 \times 10^{26} \text{ W}$ انرژی تولید می‌کند.

الف) با استفاده از رابطه $E=mc^2$ تعیین کنید خورشید در هر ثانیه چقدر از جرم خود را از دست می‌دهد.

ب) اگر خورشید با همین آهنگ تولید انرژی مدت 10^{10} سال دوام بیاورد، چقدر جرم از دست می‌دهد؟

پ) این مقدار جرم چند درصد جرم کنونی خورشید است؟

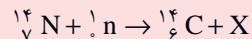
۲۴ توان تولیدی متوسط یک نیروگاه برق هسته‌ای در شبکه سراسری 150 MW است. اگر در این نیروگاه در هر ساعت 0.3

کیلوگرم سوخت اورانیوم ^{235}U مصرف شود:

الف) نیروگاه در هر ساعت چند ژول انرژی دریافت می‌کند؟

ب) اگر از هر کیلوگرم سوخت اورانیوم ^{235}U $5 \times 10^7 \text{ J}$ به دست آید، بازده نیروگاه چند درصد است؟

۲۵ در لایه‌های بالایی جو زمین بر اثر برخورد نوترون با نیتروژن $^{14}_7\text{N}$ ، کربن پرتوزا به وجود می‌آید و داریم



الف) ۱ در واکنش بالا عددهای اتمی و جرمی X را تعیین کنید.

۲ X را شناسایی کنید.

ب) جرم کربن $^{14}_6\text{C}$ تولید شده در مدت یک سال بر اثر این واکنش $7/5$ کیلوگرم است. نشان دهید که شمار اتم‌های کربن $^{14}_6\text{C}$

تولید شده در هر سال تقریباً 3×10^{26} است.

نیمه‌عمر کربن $^{14}_6\text{C}$ را 5730 سال و عدد آووگادرو را 6×10^{23} بگیرد.

۲۶ منظور از «نیمه‌عمر یک ماده پرتوزا ۲ دقیقه است» چیست؟ پس از ۸ دقیقه چه مقدار ماده برجای می‌ماند؟

۲۷ با توجه به جدول، نمودار آهنگ شمارش بر حسب زمان را رسم کنید و به کمک آن نیمه‌عمر ماده را به دست آورید.

زمان (دقیقه)	شمارش در ثانیه
۰	۱۰۰
۱	۵۹
۲	۳۴
۳	۲۰
۴	۱۲
۵	۷

۲۷ معادله زیر واکنش هسته‌ای برخورد یک نوترون کُند با هسته $^{235}_{92}\text{U}$ را نشان می‌دهد.



الف) ۱ این فرایند چه نام دارد؟

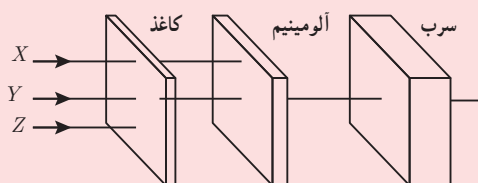
۲ X نمایش چه چیزی است؟

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 زیست محیطی را که همراه با این نوع تولید الکتریسیته به وجود می‌آید بنویسید.

پ) کاهش جرم در یک واکنش هسته‌ای از نوع بالا $3/4 \times 10^{-28} \text{ kg}$ و تندی نور $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ است. مقدار انرژی این واکنش را حساب کنید.

۲۹ در شکل زیر جنس پرتوهای X، Y و Z را مشخص کنید.

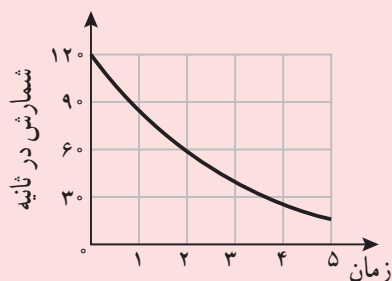


شکل ۴-۲۴

E	D	C	B	A	
بنا	گاما	گاما	بنا	آلفا	X
گاما	بنا	آلفا	آلفا	بنا	Y
آلفا	آلفا	بنا	گاما	گاما	Z

الف) A ب) B پ) C ت) D ث) E

۳۰ نیمه عمر ماده 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 هسته 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 ${}^6_3\text{Li}$ 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 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ با گسیل ذره α به کدام یک از عنصرهای زیر تبدیل می‌شود؟

(الف) ${}^{216}_{85}\text{At}$ (ب) ${}^{216}_{86}\text{Rn}$ (پ) ${}^{218}_{84}\text{Po}$ (ت) ${}^{216}_{84}\text{Po}$ (ث) ${}^{217}_{85}\text{At}$

۳۴ توریم ${}^{232}_{90}\text{Th}$ با گسیل ذره β^- به کدام یک از عنصرهای زیر تبدیل می‌شود؟

(الف) ${}^{230}_{90}\text{Th}$ (ب) ${}^{230}_{89}\text{Ac}$ (پ) ${}^{234}_{89}\text{Ac}$ (ت) ${}^{232}_{88}\text{Ra}$ (ث) ${}^{234}_{91}\text{Pa}$

۳۵ یک ایزوتوپ پرتوزا یک ذره آلفا و دو ذره 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 زنجیره واپاشی با ${}^{232}_{90}\text{Th}$ آغاز می‌شود و به ترتیب واپاشی آلفا، بتا، بتا، گاما و آلفا می‌یابد. محصول پایانی

کدام است؟

(الف) ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ (ب) ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ (پ) ${}^{208}_{86}\text{Rn}$ (ت) ${}^{212}_{85}\text{At}$ (ث) ${}^{225}_{87}\text{Fr}$

۳۷- اگر نیمه‌عمر یک ایزوتوپ پرتوزا ۱۶۰۰ سال باشد، چند سال طول می‌کشد تا $\frac{1}{8}$ آن واپاشی کند؟

(الف) ۲۰۰ (ب) ۱۴۰۰ (پ) ۴۸۰۰ (ت) ۱۲۸۰۰

۳۸ در فرایند هم‌جوشی دو هسته ${}^2_1\text{H}$ و ${}^3_1\text{H}$ در یک رآکتور، یک نوترون به بیرون پرتاب می‌شود، هسته به‌دست آمده (Y)

کدام است؟

(الف) ${}^4_2\text{He}$ (ب) ${}^4_2\text{He}$ (پ) ${}^4_2\text{He}$ (ت) ${}^4_2\text{He}$ (ث) ${}^4_2\text{He}$

۳۹ دو عنصر پرتوزای X و Y به ترتیب نیمه عمرهای 5° و 10° دقیقه دارند. شمار اتم‌های A و B با یکدیگر مساوی‌اند. بعد از 20° دقیقه نسبت زیر برابر با کدام یک از عددهاست؟

$$\frac{\text{شمار اتم‌های تغییر نکرده X}}{\text{شمار اتم‌های تغییر نکرده Y}}$$

الف) ۴ ب) ۲ پ) ۱ ت) $\frac{1}{2}$ ث) $\frac{1}{4}$

۴۰ هنگامی که هسته اتم ${}^6\text{Li}$ با ذره‌های خاصی بمباران می‌شود، تنها دو ذره آلفا به دست می‌آید. کدام یک از ذره‌های زیر در بمباران شرکت داشته‌اند؟

الف) الکترون‌ها ب) پروتون‌ها پ) دوترون‌ها ت) نوترون‌ها ث) فوتون‌ها

۴۱ در یک رآکتور شکافت گرمایی، به کار 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 تجزیه هسته ${}^{235}\text{U}$ ندارند.

راهنمای پاسخ‌یابی به پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶

۱-۶ ساختار هسته

۱ اگر هنگام قرار گرفتن نوترون‌ها درون توپ تنیس، فضاهای خالی را نادیده بگیریم و ضریب پراش‌دهی را یک در نظر بگیریم، در این صورت داریم:

$$\approx \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{(3/2 \times 10^{-2} \text{ m})^3}{(10^{-15} \text{ m})^3} \approx 10^4$$

در توپ تنیس جای می‌گیرند

$$10^3 \text{ kg} = 10^{-27} \text{ kg} \times 10^4 \approx \text{مرتبه بزرگی جرم توپ تنیس در این شرایط}$$

برای مقایسه خوب است بدانید مرتبه بزرگی جرم تمامی ساکنین روی کره زمین حدود 10^{12} kg است!

۲ الف

$$A = 208 \text{ تعداد نوکلئون‌ها (عدد جرمی)}$$

ب

$$N = A - Z = 208 - 82 = 126$$

پ

$$q = +Ze = +82e$$

۳ الف

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶

۱-۶ ساختار هسته

۱. مرتبه بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تک هم در یک توپ تنیس به شعاع ۳.۷۵ cm جای داد، تخمین زنید. در این صورت مرتبه بزرگی جرم این توپ چقدر است؟ (مرتبه بزرگی شعاع و جرم نوترون را به ترتیب 10^{-15} m و $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ در نظر بگیرید.)

۲. برای ^{208}Pb مطلوب است:

الف) تعداد نوکلئون‌ها

ب) تعداد نوترون‌ها

ج) بار الکتریکی خالص هسته

د) در هر یک از موارد زیر نشان دهید که عدد اتمی و عدد جرمی هسته‌های پرتوزایی که در یک از موارد زیر نشان داده شده‌اند، در صورتی که در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.

الف) ^{208}X ب) ^{208}X ب) ^{208}X

۳. آیا می‌توان ایزوتوپ ^{208}X را با روش شیمیایی از ایزوتوپ ^{207}X جدا کرد؟ از ایزوتوپ ^{207}X چگونه باید خود را توضیح دهید.

۴-۶ پرتوهای طبیعی و نیمه‌عمر

۱. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان‌دهنده یک یا چند ذره α یا β^- است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.

الف) $^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Bi} + \dots$

ب) $^{13}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{B} + \dots$

ج) $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + \dots$

۲. هسته دختر بدست‌آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به صورت ^A_ZX مشخص کنید.

الف) ^{210}Po واپاشی α انجام دهد.

ب) سدیم ^{24}Na واپاشی β^- انجام دهد.

ج) نیتروژن ^{14}N واپاشی β^- انجام دهد.

د) ^{23}O واپاشی β^- انجام دهد.

۳. هنگامی که نیتروژن جز زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزایی کربن ^{14}C با آنگ تابش در 1.3 به‌طور فوقانی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ^{12}C که به‌طور طبیعی در جو وجود دارد در هم آمیخته می‌شود. فرض کنید که در یک نمونه از کربن 1000 میلیارد اتم پدیدار کربن ^{14}C تقریباً یک اتم پرتوزایی کربن ^{14}C از این طریق وارد جو می‌شود. اتم‌های کربن جزئی از طریق حالت‌های مکان خود را عوض می‌کنند و فوسفر و فسفر، به‌طور کاتوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به این جاداران منتقل می‌شوند. به‌طوری که اتم‌های کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزایی کربن ^{14}C است.

وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزایی به تدریج در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر 5730 سال رو به کاهش می‌گذارد. کربن ^{14}C موجود در یک نمونه زغال فسیل، $1/56$ درصد (معادل $1/56$) مقدار عادی کربن ^{14}C موجود در زغال است که تازه تولید شده است.

$$^{195}_{78}\text{X} = ^{195}_{78}\text{Pt}$$

$$N = A - Z = 195 - 78 = 117$$

ب

$$^{23}_{16}\text{X} = ^{23}_{16}\text{S}$$

$$N = A - Z = 32 - 16 = 16$$

پ

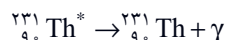
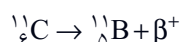
$$^{61}_{29}\text{X} = ^{61}_{29}\text{Pm}$$

$$N = A - Z = 61 - 29 = 32$$

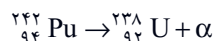
۴ $^{59}_{25}\text{X}$ و $^{61}_{25}\text{X}$ از ایزوتوپ‌های منگنز هستند که به طریق شیمیایی قابل جداسازی نیستند. در حالی که $^{61}_{25}\text{X}$ یکی از ایزوتوپ‌های آهن است و به سادگی می‌توان به روش شیمیایی آن را از ایزوتوپ منگنز جدا نمود.

۲-۶ پرتوهای طبیعی و نیمه‌عمر

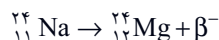
۵



۶



الف



ب

برسش‌ها و مسئله‌های فصل ۶

۱. مباحث هسته

۱. مرتبه‌ی بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تک هم در یک توپ تنیس به شعاع 3.7cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبه‌ی بزرگی جرم این توپ چقدر است؟
(مرتبه‌ی بزرگی شعاع و جرم نوترون را به ترتیب 10^{-14}m و 10^{-27}kg در نظر بگیرید.)

۲. برای ^{210}Po معکوس است:

الف) تعداد نوکلئون‌ها ب) تعداد نوترون‌ها

ب) بار الکتریکی خالص هسته

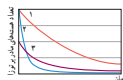
۳. در هر یک از موارد زیر تعداد X چه شعری را نشان می‌دهد

و در هسته هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.

الف) ^{132}X ب) ^{232}X ج) ^{238}X

۴. آیا می‌توان از نوترون ^{235}X را با روش تئیسایی از نوترون ^{238}X جدا کرد؟ از نوترون ^{235}X بطور واضح یا به روش توضیح دهید.

۵. نیتروژن ^{14}N از نوترون است که در راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. این نوترون پایدار است و واپاشی آن از طریق گسیل ذرات α ، β ، γ ، δ ، ϵ ، ζ ، η ، θ صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هسته‌های چقدر است؟ شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پروتوزی سه نمونه را بر حسب زمان نشان می‌دهد. نیمه‌عمر این سه نمونه را با هم مقایسه کنید.



۶. هنگامی که نیترون جزو زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) پیلران می‌شود، از نوترون پروتوزی کرن ۱۲ با آهنگ ثابتی در لایه‌های فوای جو تولید می‌شود. این کرن پروتوزا، با کرن ۱۲ که بطور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. ورسا نشان داده است که به ازای هر ۱۰۰۰۰ میلیارد اتم پایدار کرن ۱۲، تقریباً یک اتم پروتوزی کرن ۱۲ از این طریق وارد جو می‌شود. اتمهای کرن جوئی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبل فوستر و تقس، به جو کائورای مکان خود را عوض می‌کنند و به بین جاداران منتقل می‌شوند. بطوری که اتمهای کرن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از نوترون پروتوزی کرن ۱۲ است.

۷. هسته دختر بدست‌آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به صورت مشخص کنید.
الف) ^{210}Po واپاشی α انجام دهد.
ب) سیم ^{210}Na واپاشی β انجام دهد.
ج) نیترون ^{1}n واپاشی β انجام دهد.
د) ^{16}O واپاشی β انجام دهد.

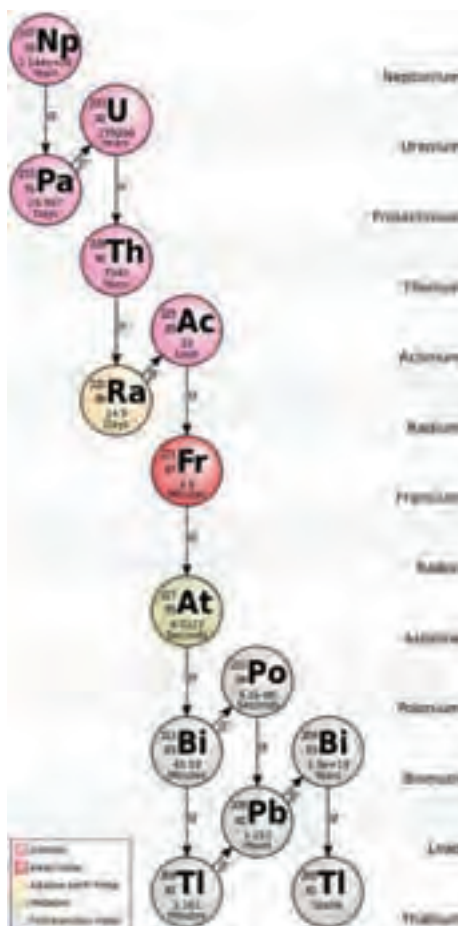
۱۵۵

(پ)

(ت)

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.

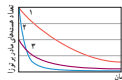
www.en.wikipedia.org/wiki/decay-chain



برش‌ها و سته‌های فصل ۶

۱-۳-۱ ساختار هسته

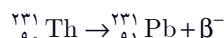
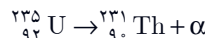
۱. مرتبه‌ی بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تک هم در یک توب تیس به شعاع 3.7 cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبه‌ی بزرگی جرم این توب چقدر است؟ (مرتبه‌ی بزرگی شعاع و جرم نوترون را به ترتیب 10^{-10} m و 10^{-27} kg در نظر بگیرید.)
۲. برای $^{238}_{92}\text{Pu}$ معکوس است:
 - الف) تعداد نوترون‌ها (ب) تعداد نوترون‌ها
 - ب) بار الکتریکی خالص هسته (ب) بار الکتریکی خالص هسته
۳. در هر یک از موارد زیر تعداد X چه شعری را نشان می‌دهد و در هسته هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.
 - الف) $^{238}_{92}\text{X}$ (ب) $^{238}_{92}\text{X}$ (ب) $^{238}_{92}\text{X}$
 - ب) آیا می‌توان ایزوتوپ $^{238}_{92}\text{X}$ را با روشی تشخیصی از ایزوتوپ $^{238}_{92}\text{X}$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{238}_{92}\text{X}$ چگونه؟ پاسخ خود را توضیح دهید.



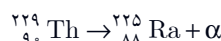
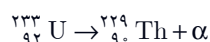
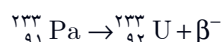
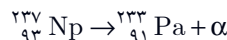
۴. هنگامی که نوترون جز زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) پدیدار می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن $^{14}_6\text{C}$ با آنگ تابش در لامپ‌های فوایدی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن $^{12}_6\text{C}$ که به‌طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمزد. بررسی‌ها نشان داده است که به‌ازای هر 10000 میلیارد اتم پایدار کربن $^{12}_6\text{C}$ ، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن $^{14}_6\text{C}$ از این طریق وارد جو می‌شود.
 - الف) اتمهای کربن جوی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فوسفر و تنفس، به‌جای کانون‌های مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به‌طوری که اتمهای کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزای کربن $^{14}_6\text{C}$ است.
 - ب) وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به‌تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر 5730 سال رو به کاهش می‌گذارد. کربن $^{14}_6\text{C}$ موجود در یک نمونه زغال قدیمی 15% درصد (معمول $\frac{1}{6}$) مقدار عادی کربن $^{14}_6\text{C}$ موجود در زغال است که تازه تولید شده است.
۵. هسته دختر بدست‌آمده از هر یک از واکنش‌های زیر را به‌صورت ^A_ZX مشخص کنید.
 - الف) $^{238}_{92}\text{Pu}$ واپاشی α انجام دهد.
 - ب) سمیم $^{238}_{92}\text{Pu}$ واپاشی β^- انجام دهد.
 - ب) نیترون ^1_0n واپاشی β^- انجام دهد.
 - ب) $^{238}_{92}\text{Pu}$ واپاشی β^+ انجام دهد.

در شکل‌های بالا، سری‌های واپاشی پرتوزای $^{237}_{93}\text{Np}$ به $^{208}_{81}\text{Ti}$ که هسته دختر پایداری است و همچنین $^{235}_{92}\text{U}$ به هسته دختر پایدار $^{207}_{82}\text{Pb}$ نشان داده شده است.

برای مثال در ادامه تعدادی از فرایندهای مربوط به واپاشی α یا β^- اورانیم $^{235}_{92}\text{U}$ (به هسته دختر پایدار سرب $^{207}_{82}\text{Pb}$) آمده است.

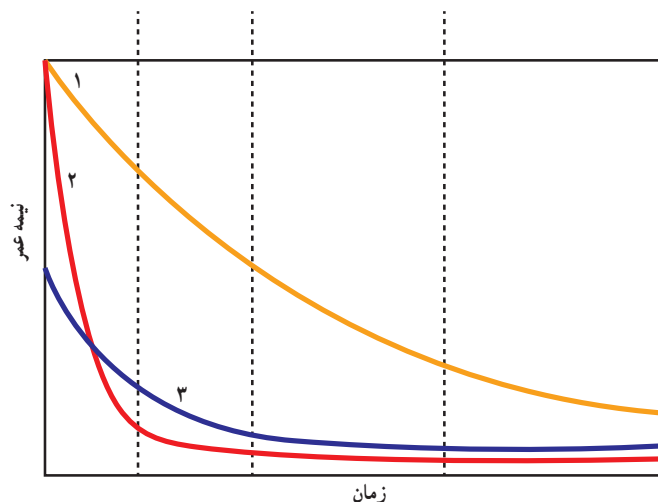


همان‌طور که در تصویر مربوط پاسخ تمرین ۷ دیده می‌شود سری واپاشی پرتوزای نپتونیم $^{237}_{93}\text{Np}$ آمده است.



همان‌طور که دیده می‌شود $^{237}_{93}\text{Np}$ پس از واپاشی‌های α ، β^- ، α به هسته دختر رادیوم $^{225}_{88}\text{Ra}$ تبدیل می‌شود که هنوز پرتوزا است و پس از واپاشی‌های دیگر به هسته دختر پایدار تالیم $^{205}_{81}\text{Tl}$ تبدیل می‌شود.

با توجه به گام‌های زمانی نشان داده شده روی نمودار شکل زیر، مشخص است که نمونه ۱، دارای بیشترین نیمه عمر و نمونه ۲، دارای کمترین نیمه عمر است.



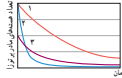
برش‌ها و هسته‌های فصل ۶

۱-۶. ماضی هسته

۱. مرتبه بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تک هم در یک توب تیس به شعاع 3.7cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبه بزرگی جرم این توب چقدر است؟
(مرتبه بزرگی شعاع و جرم پروتون را به ترتیب 10^{-14}m و $1.67 \times 10^{-27}\text{kg}$ در نظر بگیرید.)

۲. برای ^{238}Pu مغلوب است:
(الف) تعداد نوکلئون‌ها (ب) تعداد نوترون‌ها
(ج) بار الکتریکی خالص هسته
در هر یک از موارد زیر تعداد X چه شعری را نشان می‌دهد و در هسته هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.

۳. آیا می‌توان ایزوتوپ ^{238}X را با روشی تشخیصی از ایزوتوپ ^{235}X جدا کرد؟ از ایزوتوپ ^{235}X چگونه؟ پاسخ خود را توضیح دهید.



۴. هنگامی که نیترون جز زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های H^+ و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ^{14}C با آنگاهایی در لامپ‌های فوایدی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ^{12}C که بطور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمزد. ورسه نشان داده است که به ازای هر 10000 میلیارد اتم پایدار کربن ^{12}C تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ^{14}C از این طریق وارد جو می‌شود. اتمهای کربن جزوی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فوسفر و تنفس، بهنجو کاتوره‌ای 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 ^{14}C است. وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه عمر 5730 سال رو به کاهش می‌گردد. کربن ^{14}C موجود در یک نمونه زغال قدیمی، 15% درصد (مقابل $\frac{1}{6}$) مقدار عادی کربن ^{14}C موجود در زغال است که تازه تولید شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

۵. معادله زیر بخشی از واکنش را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.

۶-۲. شکافت هسته‌ای

۷. معادله زیر بخشی از واکنش را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.

۸. اهمیت عددهای 235 و 238 را توضیح دهید.

۹. اتمهای ^{235}U پایدارند و خودبه‌خود به قطعه‌های کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بن 2.5 عدد) و مقدار زیادی انرژی واکنشیده می‌شوند. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟

۱۰. برای اورانیوم 235 عدد نوترون‌های با عددی کم را جذب می‌کند تا نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه عدد نوترون‌ها را در قلب راکتور کم می‌کنند.

۱۱. چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟

۱۲. واکنش زنجیری را توضیح دهید.

۱۳. ج انرژی به‌صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟

۱۴. هنگامی که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می‌شوند، آنها «پرتوزا» و «پرتوزایی» با زمینه‌عمر طولانی هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.

۱۵. (الف) حدود 10^{-14} درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیوم از ایزوتوپ 235 تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود 200MeV انرژی آزاد می‌شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ 235 موجود در یک کیلوگرم از این اورانیوم بتواند از شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی را بر حسب مگاالکترون‌ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟

۱۶. با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ حدود 30MJ انرژی

$$\frac{1}{64} = \left(\frac{1}{2}\right)^n = \left(\frac{1}{2}\right)^6 \Rightarrow n = 6$$

بنابراین پس از ۶ نیمه‌عمر، کربن ۱۴ موجود در نمونه زغال قدیمی به $1/56$ درصد مقدار کربن ۱۴ موجود در زغالی که تازه تولید شده، رسیده است. چون هر نیمه‌عمر 5730 سال طول می‌کشد، در این صورت سن تقریبی این زغال برابر است با

$$6 \times 5730 \text{ years} = 34380 \text{ years}$$

۱۱. چهار ساعت معادل ۴ نیمه عمر است. بنابراین $\left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{1}{16}$ ماده اولیه، در نمونه بیسموت باقی می‌ماند.

۶-۲. شکافت هسته‌ای

۱۲. الف) اورانیوم 235 ، که حاوی ۹۲ پروتون و ۱۴۳ نوترون است، عنصری پرتوزا و با نیمه‌عمر بسیار زیاد حدود 700 میلیون سال است. به عبارت دیگر، این تعداد پروتون و نوترون که در هسته اتم اورانیوم 235 کنار یکدیگر جمع شده‌اند، سبب توازن 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، $Z > 82$ ، ناپایدارند.)

ب) وقتی هسته اتم اورانیوم 235 ، یک نوترون کم انرژی (یا اصطلاحاً نوترون کند) را به دام می‌اندازد به هسته مرکب و به شدت ناپایداری تبدیل می‌شود که پس از 10^{-12} ثانیه منجر به فرایند شکافت می‌شود. انرژی آزاد شده در هر فرایند شکافت، کمی بیش از 200MeV 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 هسته مرکب اورانیوم 235 است، این اختلاف جرم بنا به رابطه معروف اینشتین $E=mc^2$ ، سبب آزاد

فیروزبک

گرما آزاد می‌شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در قسمت الف، انرژی تولید شود؟

۳. یکی از واکنش‌های ممکن در شکافت ^{235}U ، داده شده است. در این واکنش عدد اتمی x ، عدد جرمی y ، و عنصر Z را در $^x_Z X$ تعیین کنید.

۴-۲. شکافت هسته‌ای

۵. معادله زیر بخشی از واکنش را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.

۶. (الف) اهمیت عددهای 235 و 238 را توضیح دهید.
(ب) اتمهای ^{235}U پایدارند و خودبه‌خود به قطعه‌های کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بن 2.5 عدد) و مقدار زیادی انرژی واکنشیده می‌شوند. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟

۷. برای اورانیوم 235 عدد نوترون‌های با عددی کم را جذب می‌کند تا نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه عدد نوترون‌ها را در قلب راکتور کم می‌کنند.

۸. چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟

۹. واکنش زنجیری را توضیح دهید.

۱۰. ج انرژی به‌صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟

۱۱. هنگامی که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می‌شوند، آنها «پرتوزا» و «پرتوزایی» با زمینه‌عمر طولانی هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.

۱۲. (الف) حدود 10^{-14} درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیوم از ایزوتوپ 235 تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود 200MeV انرژی آزاد می‌شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ 235 موجود در یک کیلوگرم از این اورانیوم بتواند از شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی را بر حسب مگاالکترون‌ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟

۱۳. با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ حدود 30MJ انرژی

۱۴. بازه نمره‌گذاری هسته‌ای پوتشر حدود 25 درصد است. جی 25 درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیوم 235 ، به‌صورت گرما تلف و حدود 25 درصد آن به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود 200MeV انرژی آزاد می‌شود، چند کیلوگرم اورانیوم 235 در سال شکافت پیدا می‌کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان پایدار 1000 مگاوات کار می‌کند.)

۱۵-۶. شکافت هسته‌ای

۱۶. انرژی آزاد شده در هر واکنش شکافت اورانیوم 235 با یک نوترون کند حدود 200MeV و در هر واکنش شکافت دوتیم با نیمه‌عمر حدود 17.6 است.

۱۷. (الف) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش شکافت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید. (ب) با تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش شکافت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید. (ج) نتیجه‌های قسمت (الف) و (ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی، با توجه به اینکه مواد قابل شکافت مانند ^{235}U به مقدار بسیار کمی در طبیعت وجود دارد ولی دوتیم بطور فراوان در آب اقیانوس‌ها و دریاها موجود است و جدا کردن آن از هیدرژن معمولی آسان و کم‌هزینه است، اهمیت این مقایسه را توضیح دهید.

۳۲۹

گرما می‌شود. سن تقریبی این زغال دیمی جعفر است؟
 II نیمه عمر بیست و یک سال دارد. پس از گذشت
 چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه، در نمونه‌ای از این
 بیسوت، باقی می‌ماند؟
 است. در این واکنش عدد اتمی، عدد جرمی، و عنصر X را
 در واکنش تعیین کنید.

۳-۲ شکافت هسته‌ای
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

۳-۳ شکافت هسته‌ای
 در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟

۳-۴ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵ شکافت هسته‌ای
 با 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.)

۳-۶ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۷ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۸ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۹ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۰ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۱ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۲ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۳ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۴ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۵ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۶ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۷ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۸ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۱۹ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۰ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۱ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۲ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۳ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۴ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۵ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۶ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۷ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۸ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۲۹ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۰ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۱ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۲ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۳ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۴ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۵ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۶ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۷ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۸ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۳۹ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۰ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۱ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۲ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۳ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۴ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۵ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۶ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۷ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۸ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۴۹ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۰ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۱ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۲ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۳ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۴ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۵ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۶ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۷ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۸ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۵۹ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۰ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۱ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۲ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۳ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۴ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۵ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۶ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۷ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۸ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۶۹ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۷۰ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۷۱ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۷۲ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۷۳ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۷۴ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

۳-۷۵ شکافت هسته‌ای
 نوترون‌ها + $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{54}\text{Xe} + ^{89}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

شدن انرژی گرمایی زیادی عمدتاً به صورت 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 کند 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 هسته اورانیم ۲۳۶، که به شدت ناپایدار است، پس از 10^{-12} ثانیه به دو پاره شکافت و تعدادی نوترون سریع به وجود می‌آید. پس از کند شدن نوترون سریع و جذب آنها توسط هسته‌های دیگر اورانیم ۲۳۵، این فرایند به طور 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 ۶-۱۳ 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.

نیمه عمر: مدت زمانی که طول می‌کشد تا نیمی از هسته‌های یک نمونه پرتوزا، واپاشی کنند.

الف) ابتدا جرم یک مول سنگ معدن طبیعی اورانیم را به دست می‌آوریم.

$$M(\text{U}) = \frac{1}{1000} (\%7 \times 235 + \%99 \times 238) \approx 0.238 \text{ kg/mol}$$

به این ترتیب تعداد اتم‌های ۱ kg سنگ معدن طبیعی اورانیم برابر است با

$$N = \left(\frac{1 \text{ kg}}{0.238 \text{ kg}} \right) \times 6.022 \times 10^{23} = 2.53 \times 10^{24}$$

تعداد اتم‌های اورانیم ۲۳۵ در ۱ mg، سنگ معدن طبیعی برابر است با

$$n = \frac{V}{V_0} \times 2.53 \times 10^{24} = 1.77 \times 10^{22}$$

اگر تمامی این اتم‌های اورانیم ۲۳۵ بر اثر فرایند شکافت انرژی خود را آزاد کنند، انرژی آزاد شده برابر است با

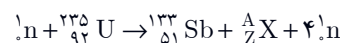
$$E = 1.77 \times 10^{22} \times 200 \text{ MeV} = 3.54 \times 10^{24} \text{ MeV}$$

$$= (3.54 \times 10^{24} \text{ eV}) \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 5.66 \times 10^{11} \text{ J}$$

ب) مقدار زغال سنگ که باید بسوزد تا انرژی معادل $5/66 \times 10^{11} \text{ J}$ ایجاد کند برابر است با

$$m = (5/66 \times 10^{11} \text{ J}) \left(\frac{1 \text{ kg}}{3 \times 10^6 \text{ J}} \right) = 1/88 \times 10^4 \text{ kg}$$

حدود ۱۹ تن زغال سنگ باید بسوزد تا انرژی معادل انرژی حاصل از شکافت اورانیم های ۲۳۵ داخل سنگ معدن طبیعی آزاد شود. این نتیجه اهمیت غنی سازی اورانیم را نشان می دهد که برای نیروگاه های هسته ای درصد اورانیم ۲۳۵ را در میله های سوخت به حدود ۳ تا ۵ درصد می رسانند.



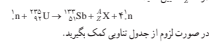
با توجه به موازنه بودن عدد جرمی و عدد اتمی در دو طرف معادله واکنش، داریم

$$A = (1 + 235) - (133 + 4) = 99$$

$$Z = (92 + 0) - (51 + 0) = 41$$

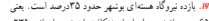
با مراجعه به جدول تناوبی، که در پیوست پایان کتاب آمده است، نام عنصر پاره شکافت نیوبیم $^{99}_{41}\text{Nb}$ است.

گرما می آزاد می شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در قسمت الف، انرژی تولید شود؟
۱۶. یکی از واکنش های ممکن در شکافت $^{235}_{92}\text{U}$ داده شده است. در این واکنش عدد اتمی X ، عدد جرمی A ، و عنصر X را در ^A_ZX تعیین کنید.



در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

۱۷. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می شود؟



نوترون ها ^1_0n و $^{235}_{92}\text{U}$ را توضیح دهید.

۱۸. بازه نیروگاه هسته ای پونهر حدود ۳۵ درصد است. یعنی ۳۵ درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵، به صورت گرما تلف و حدود ۲۵ درصد آن به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود 200 MeV انرژی آزاد می شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت پیدا می کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان ۱۰۰۰ مگاوات کار می کند.)

۱۹. انرژی آزاد می شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت پیدا می کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان ۱۰۰۰ مگاوات کار می کند.)

۲۰. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۲۱. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۲۲. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۲۳. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۲۴. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۲۵. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۲۶. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۲۷. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۲۸. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۲۹. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۰. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۱. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۲. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۳. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۴. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۵. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۶. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۷. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۸. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۹. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۰. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۱. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۲. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۳. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۴. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۵. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۶. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۷. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۸. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۴۹. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۰. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۱. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۲. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۳. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۴. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۵. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۶. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۷. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۸. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۵۹. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۰. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۱. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۲. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۳. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۴. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۵. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۶. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۷. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۸. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۶۹. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۰. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۱. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۲. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۳. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۴. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۵. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۶. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۷. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۸. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۷۹. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۰. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۱. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۲. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۳. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۴. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۵. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۶. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۷. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۸. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۸۹. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۰. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۱. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۲. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۳. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۴. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۵. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۶. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۷. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۸. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۹۹. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۱۰۰. واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ را توضیح دهید.

۳۳۰

۱۵۶

۱۵ با توجه به فرض مسئله، اگر توان نیروگاه را 100 mW در نظر بگیریم در این صورت انرژی معادل این توان در یک سال برابر است با

$$E = (10^3 \times 10^6 \text{ J/s}) (24 \times 3600 \times 365 \text{ s})$$

$$= 3/15 \times 10^{16} \text{ J} = (3/15 \times 10^{16} \text{ J}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1/6 \times 10^{-19} \text{ J}} \right)$$

$$= 1/97 \times 10^{35} \text{ eV} = 1/97 \times 10^{26} \text{ MeV}$$

از آنجا که بازده نیروگاه حدود ۳۵ درصد است، لذا تنها انرژی معادل $200 \text{ MeV} \times \frac{35}{100}$ از هر فرایند شکافت اورانیم ۲۳۵ به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. به این ترتیب تعداد اتم های اورانیم ۲۳۵ که باید شکافت یابند تا انرژی معادل E را تولید کنند برابر است با

$$n = \frac{1/97 \times 10^{29} \text{ MeV}}{200 \text{ MeV}} = 2/81 \times 10^{27}$$

از آنجا که جرم هر مول $(6/022 \times 10^{23})$ اورانیم ۲۳۵ معادل ۲۳۵g است، جرم اورانیم ۲۳۵ مورد نیاز برابر است با

$$m = (2/81 \times 10^{27} \text{ kg}) \left(\frac{2/81 \times 10^{27}}{6/022 \times 10^{23}} \right) = 1100 \text{ kg}$$

این مقدار اورانیم ۲۳۵ در میله های سوخت، که معمولاً بین ۳ تا ۵ درصد آنها حاوی اورانیم ۲۳۵ است، توزیع شده اند.

