

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



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، ۱ و ۶) - 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 زرنیدی، رعنا فرج‌زاده درویی، شاداب ارشادی، سپیده ملک‌ایزدی و راحله زاد فتح‌اله (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 «قَدِّسَ سرُّهُ»

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 کشش 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 موردنیاز 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 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) های 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 در فهم 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 به‌عنوان نمونه‌ای از حرکت با شتاب ثابت مدل‌سازی کرد.
- حرکت سقوط آزاد شامل پرتاب جسم روبه بالا، روبه پایین و همچنین رها کردن جسم از ارتفاع معینی نسبت به سطح زمین است.

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

بودجه‌بندی پیشنهادی

جلسه اول: نگاهی به 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

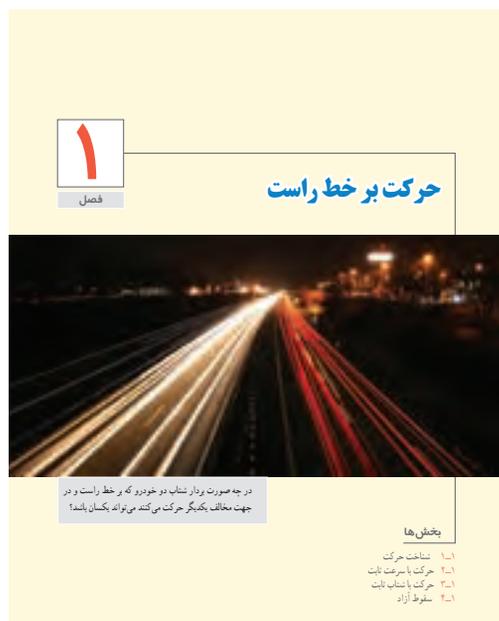
جلسه پنجم: بخش ۲-۱ حرکت با سرعت ثابت (صفحه ۱۳) تا پایان آن و همچنین بررسی پرسش‌ها و مسئله‌های پایان فصل مربوط به بخش ۲-۱

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: آزمون تشریحی فصل اول



در این تصویر حرکت خودروها (در دو مسیر رفت و برگشت) در بزرگراهی نشان داده شده که تقریباً بر خط راست است. از آنجا که دانش‌آموزان شناختی اولیه نسبت به کمیت‌های فیزیکی توصیف‌کننده حرکت به دست 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 فزاتر از حرکت بر خط راست، به حرکت اجسام داریم.

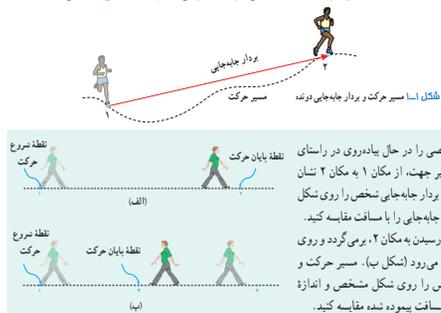
دانش‌آموزان در علوم سال نهم با مفاهیم مسافت و جابه‌جایی به‌طور کامل آشنا شده‌اند و به ماهیت برداری بودن جابه‌جایی نیز واقف‌اند. در اینجا ضمن مرور این مفاهیم، در پرسش ۱-۱ و فعالیت ۱-۱ به جمع‌بندی این دو مفهوم پرداخته‌ایم.

فیزیک ۳

بررسی حرکت اجسام، همواره مورد توجه بشر بوده است. در فیزیک نیز، شناخت و توصیف حرکت اجسام، یکی از مباحث مهمی است که در هر کتاب درسی به آن پرداخته می‌شود و زمینه‌ساز درک بهتر مباحث دیگر فیزیک است. آشنایی با حرکت اجسام، که به آن حرکت‌شناسی یا سینماتیک نیز گفته می‌شود، در بیشتر شاخه‌های مهندسی اهمیت زیادی دارد. برای مثال، مدت زمان رسیدن تندی خودرو از صفر به 100 km/h یکی از معیارهای مقایسه خودروهایی امروزی در صنعت خودروسازی است. همچنین مهندسانی که به طراحی و ساخت باله پرواز فرودگاه‌ها می‌پردازند توجه دارند که هواپیماهای مختلف برای آنکه به تندی لازم برای برخاستن برسند، چه مسافتی را باید روی باله 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 رنگ مسدود باید به نحوه حرکت خون در رگ‌ها توجه کنند. در این فصل ابتدا نگاهی دقیق‌تر خواهیم (انماخت 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.

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



پرسش ۱-۱

۱- شکل الف شخصی را در حال پیاده‌روی در راستای خط راست و بدون تغییر جهت، از مکان ۱ به مکان ۲ نشان می‌دهد. مسیر حرکت بردار جابه‌جایی شخص را روی شکل مشخص و اندازه بردار جابه‌جایی را با مسافت مقایسه کنید.
 ۲- شخصی پس از رسیدن به مکان ۲، برمی‌گردد و روی همان مسیر به مکان ۳ می‌رود (شکل ب). مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی شخص را روی شکل مشخص و اندازه بردار جابه‌جایی را با مسافت پیموده شده مقایسه کنید.

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.

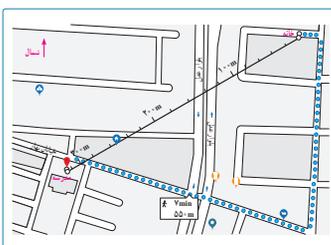
شکل ۱۰ حرکت بر خط راست

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



فعالیت ۱-۱

همانند شکل رویه‌رو و به کمک یک نرم‌افزار نقشه‌یاب (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 دورتدا شکل ۱-۱ در مدت زمان Δt از مکان ۱ به مکان ۲ برود مسافت و بردار جابه‌جایی بین این دو مکان را به ترتیب با l و \vec{l} نشان دهیم. همان‌طور که در علوم سال نهم دیدید، تندی متوسط و سرعت متوسط دوتاه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

همان‌طور که دیده می‌شود تندی متوسط، کمیتی زده‌ای و سرعت متوسط، کمیتی برداری 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- نامش این «در ماه‌های تندی متوسط و سرعت متوسط از برار انگلیسی average» معنی متوسط گرفته شده است.
 ۲- آموختنی‌هایی که دانش‌آموزی را در معادله $\vec{v}_{av} = \frac{\vec{l}}{\Delta t}$ و $v_{av} = \frac{l}{\Delta t}$ درگیر می‌کند عبارتند از: بردار، نقطه‌یابی، و مقایسه‌ی بردارها با مقادیر عددی. با تعیاری دید می‌کند خارج از زمینه‌ی فیزیکی آن کتاب است و ارزشی برای آن نماند. انجام نمود.

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 ...).

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 برخط راست حرکت کند و در حین حرکت به عقب بازنگردد، اندازه سرعت متوسط با تندی متوسط آن برابر است.

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 $\Delta t = 22 \text{ s} = 7/0 \cdot \text{min}$ مسافت $\Delta x = 550 \text{ m}$ را از خانه تا مدرسه پیموده باشد، با توجه به رابطه ۱-۱ تندی متوسط وی برابر $v_{\text{avg}} = 550 \text{ m} / 22 \text{ s} = 1/31 \text{ m/s}$ 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 $v_{\text{avg}} = 225 \text{ m} / 22 \text{ s} = -1/74 \text{ m/s}$ و جهت آن به طرف جنوب غربی است.

پوشش ۱-۱

در چه صورت اندازه سرعت متوسط یک متحرک با تندی متوسط آن برابر است؟ برای پاسخ خود می‌توانید به شکل‌های برشش 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 بردار مکان جسم در آن لحظه نامیده می‌شود.

شکل ۱-۱ 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 به صورت زیر نوشت :

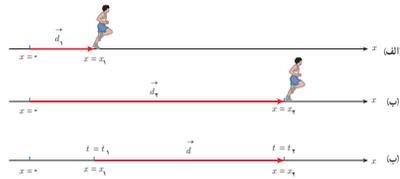
$$\vec{d}_1 = x_1 \vec{i} \quad \text{و} \quad \vec{d}_2 = x_2 \vec{i}$$

در این صورت و با توجه به شکل ۱-۱ 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 ۱-۱ مربوط به سرعت متوسط دونه را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد :

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



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

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

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

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

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

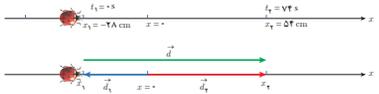
ادامه راهنمای تدریس: هرچند در ابتدای این بخش کمیت‌هایی مانند جابه‌جایی، تندی متوسط و سرعت متوسط برای حالت کلی تعریف شده‌اند ولی از آنجا که هدف اصلی این فصل بررسی حرکت بر خط راست اجسام است، لذا می‌توان با حذف علامت بردار از روی کمیت‌های برداری، به علامت جبری این کمیت‌ها توجه کرد و از روی علامت آنها به جهت حرکت پی برد. مطابق شکل ۳-۱، اگر علامت هر یک 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 نشان‌دهنده جهت حرکت متحرک است. برای مثال اگر جابه‌جایی متحرک $\Delta x = -2/1 \text{ m}$ شده باشد، اندازه جابه‌جایی برابر $2/1 \text{ m}$ است و علامت منفی نشان‌دهنده جهت جابه‌جایی است که در اینجا در جهت منفی محور x (یا خلاف جهت محور x) است.

فصل ۱: حرکت پویا راست

مثال ۲-۱

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

الف) بردارهای مکان در لحظه‌های t_1 و t_2 و بردار جابه‌جایی کفش‌دوزک در این بازه زمانی را رسم کنید. ب) سرعت متوسط کفش‌دوزک را در این بازه زمانی پیدا کنید.



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

$$\vec{v}_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{5 \text{ cm} - (-2 \text{ cm})}{2 \text{ s} - 0 \text{ s}} = (1.75 \text{ cm/s}) \hat{i}$$

توضیح ۱-۱

جدول زیر را کامل کنید. فرض کنید هر چهار متحرک در مدت زمان $2/1 \text{ s}$ فاصله بین مکان آغازین و مکان پایانی را طی می‌کنند.

مکان آغازین	مکان پایانی	بردار جابه‌جایی	سرعت متوسط	جهت حرکت
A متحرک	$(-2/1 \text{ m}) \hat{i}$	$(6/1 \text{ m}) \hat{i}$		
B متحرک	$(-2/1 \text{ m}) \hat{i}$	$(-5/6 \text{ m}) \hat{i}$		
C متحرک	$(2/1 \text{ m}) \hat{i}$	$(8/6 \text{ m}) \hat{i}$		
D متحرک	$(-1/4 \text{ m}) \hat{i}$		$(2/7 \text{ m/s}) \hat{i}$	

از آنجا که در ادامه این فصل، تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، جابه‌جایی متحرک را به جای بردار $\vec{\Delta x}$ به صورت Δx و سرعت متوسط را به جای بردار \vec{v}_{av} به صورت رابطه زیر در حل مسئله‌ها به کار می‌بریم. در این صورت علامت جبری Δx و v_{av} جهت جابه‌جایی را نشان می‌دهند. اگر متحرک در جهت محور x حرکت کند جابه‌جایی و سرعت متوسط آن مثبت و اگر متحرک در خلاف جهت محور x حرکت کند، جابه‌جایی و سرعت متوسط آن منفی خواهد بود (شکل ۳-۱).

$$(3-1) \quad v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (\text{رابطه سرعت متوسط برای حرکت در راستای محور } x)$$

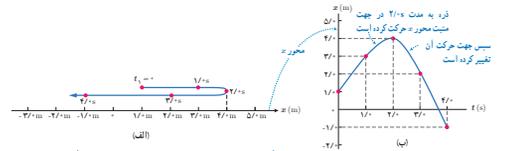


شکل ۳-۱ مکانی که روی یک محور تعیین می‌شود توسط یک نقطه قرمز در اینجا نشان داده شده است. جهت مثبت یا بی‌نهایت ادامه دارد. جهت مثبت در جهت x و جهت منفی در جهت $-x$ است.

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

شکل ۳-۱

برای توصیف حرکت یک جسم می‌توان از نمودار مکان-زمان، مکان جسم را در هر لحظه نشان می‌دهد، استفاده کرد. برای رسم این نمودار، زمان را روی محور افقی و مکان را روی محور قائم در نظر می‌گیریم. برای مثال، به حرکت ذره‌ای که در شکل ۳-۱ الف نشان داده شده است، توجه کنید. این ذره در لحظه $t_1 = 0 \text{ s}$ در مکان $x_1 = 1 \text{ m}$ و در لحظه $t_2 = 1 \text{ s}$ در مکان $x_2 = 3 \text{ m}$ قرار دارد و به همین ترتیب در لحظه‌های دیگر در مکان‌های دیگر. اگر بخواهیم نمودار مکان-زمان حرکت این ذره را رسم کنیم، ابتدا هر یک از محورهای مکان و زمان را با مقیاس مناسب منبسط می‌کنیم. سپس نقاطی از نمودار را که مربوط به هر یک از زمان‌ها و مکان‌های داده شده است، در صفحه $x-t$ مشخص می‌کنیم و با وصل کردن این نقاط به هم، به وسیله یک منحنی (خط) نمودار مکان-زمان را همانند شکل ۳-۱ ب رسم می‌کنیم.



شکل ۳-۱ الف) مسیر حرکت ذره در امتداد محور x . ب) نمودار مکان-زمان متحرک

مثال ۳-۱

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

الف) در کدام بازه زمانی مورچه در جهت محور x حرکت می‌کند؟ ب) در کدام بازه زمانی مورچه در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟

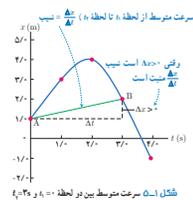
ب) در کدام بازه‌های زمانی مورچه ایستاده است؟ ت) در کدام لحظه‌های فاصله مورچه از مبدأ 30 cm است؟

ت) در کدام بازه زمانی فاصله مورچه از مبدأ کمترین مقدار است؟ ج) جابه‌جایی و سرعت متوسط مورچه را در بازه زمانی 0 s تا 2 s پیدا کنید.

پاسخ: الف) در بازه زمانی 0 s تا 1 s ، 1 s تا 2 s ، 3 s تا 4 s ، 5 s تا 6 s ، 7 s تا 8 s ، 9 s تا 10 s ، 11 s تا 12 s ، 13 s تا 14 s ، 15 s تا 16 s ، 17 s تا 18 s ، 19 s تا 20 s ، 21 s تا 22 s ، 23 s تا 24 s ، 25 s تا 26 s ، 27 s تا 28 s ، 29 s تا 30 s ، 31 s تا 32 s ، 33 s تا 34 s ، 35 s تا 36 s ، 37 s تا 38 s ، 39 s تا 40 s ، 41 s تا 42 s ، 43 s تا 44 s ، 45 s تا 46 s ، 47 s تا 48 s ، 49 s تا 50 s ، 51 s تا 52 s ، 53 s تا 54 s ، 55 s تا 56 s ، 57 s تا 58 s ، 59 s تا 60 s ، 61 s تا 62 s ، 63 s تا 64 s ، 65 s تا 66 s ، 67 s تا 68 s ، 69 s تا 70 s ، 71 s تا 72 s ، 73 s تا 74 s ، 75 s تا 76 s ، 77 s تا 78 s ، 79 s تا 80 s ، 81 s تا 82 s ، 83 s تا 84 s ، 85 s تا 86 s ، 87 s تا 88 s ، 89 s تا 90 s ، 91 s تا 92 s ، 93 s تا 94 s ، 95 s تا 96 s ، 97 s تا 98 s ، 99 s تا 100 s ، 101 s تا 102 s ، 103 s تا 104 s ، 105 s تا 106 s ، 107 s تا 108 s ، 109 s تا 110 s ، 111 s تا 112 s ، 113 s تا 114 s ، 115 s تا 116 s ، 117 s تا 118 s ، 119 s تا 120 s ، 121 s تا 122 s ، 123 s تا 124 s ، 125 s تا 126 s ، 127 s تا 128 s ، 129 s تا 130 s ، 131 s تا 132 s ، 133 s تا 134 s ، 135 s تا 136 s ، 137 s تا 138 s ، 139 s تا 140 s ، 141 s تا 142 s ، 143 s تا 144 s ، 145 s تا 146 s ، 147 s تا 148 s ، 149 s تا 150 s ، 151 s تا 152 s ، 153 s تا 154 s ، 155 s تا 156 s ، 157 s تا 158 s ، 159 s تا 160 s ، 161 s تا 162 s ، 163 s تا 164 s ، 165 s تا 166 s ، 167 s تا 168 s ، 169 s تا 170 s ، 171 s تا 172 s ، 173 s تا 174 s ، 175 s تا 176 s ، 177 s تا 178 s ، 179 s تا 180 s ، 181 s تا 182 s ، 183 s تا 184 s ، 185 s تا 186 s ، 187 s تا 188 s ، 189 s تا 190 s ، 191 s تا 192 s ، 193 s تا 194 s ، 195 s تا 196 s ، 197 s تا 198 s ، 199 s تا 200 s ، 201 s تا 202 s ، 203 s تا 204 s ، 205 s تا 206 s ، 207 s تا 208 s ، 209 s تا 210 s ، 211 s تا 212 s ، 213 s تا 214 s ، 215 s تا 216 s ، 217 s تا 218 s ، 219 s تا 220 s ، 221 s تا 222 s ، 223 s تا 224 s ، 225 s تا 226 s ، 227 s تا 228 s ، 229 s تا 230 s ، 231 s تا 232 s ، 233 s تا 234 s ، 235 s تا 236 s ، 237 s تا 238 s ، 239 s تا 240 s ، 241 s تا 242 s ، 243 s تا 244 s ، 245 s تا 246 s ، 247 s تا 248 s ، 249 s تا 250 s ، 251 s تا 252 s ، 253 s تا 254 s ، 255 s تا 256 s ، 257 s تا 258 s ، 259 s تا 260 s ، 261 s تا 262 s ، 263 s تا 264 s ، 265 s تا 266 s ، 267 s تا 268 s ، 269 s تا 270 s ، 271 s تا 272 s ، 273 s تا 274 s ، 275 s تا 276 s ، 277 s تا 278 s ، 279 s تا 280 s ، 281 s تا 282 s ، 283 s تا 284 s ، 285 s تا 286 s ، 287 s تا 288 s ، 289 s تا 290 s ، 291 s تا 292 s ، 293 s تا 294 s ، 295 s تا 296 s ، 297 s تا 298 s ، 299 s تا 300 s ، 301 s تا 302 s ، 303 s تا 304 s ، 305 s تا 306 s ، 307 s تا 308 s ، 309 s تا 310 s ، 311 s تا 312 s ، 313 s تا 314 s ، 315 s تا 316 s ، 317 s تا 318 s ، 319 s تا 320 s ، 321 s تا 322 s ، 323 s تا 324 s ، 325 s تا 326 s ، 327 s تا 328 s ، 329 s تا 330 s ، 331 s تا 332 s ، 333 s تا 334 s ، 335 s تا 336 s ، 337 s تا 338 s ، 339 s تا 340 s ، 341 s تا 342 s ، 343 s تا 344 s ، 345 s تا 346 s ، 347 s تا 348 s ، 349 s تا 350 s ، 351 s تا 352 s ، 353 s تا 354 s ، 355 s تا 356 s ، 357 s تا 358 s ، 359 s تا 360 s ، 361 s تا 362 s ، 363 s تا 364 s ، 365 s تا 366 s ، 367 s تا 368 s ، 369 s تا 370 s ، 371 s تا 372 s ، 373 s تا 374 s ، 375 s تا 376 s ، 377 s تا 378 s ، 379 s تا 380 s ، 381 s تا 382 s ، 383 s تا 384 s ، 385 s تا 386 s ، 387 s تا 388 s ، 389 s تا 390 s ، 391 s تا 392 s ، 393 s تا 394 s ، 395 s تا 396 s ، 397 s تا 398 s ، 399 s تا 400 s ، 401 s تا 402 s ، 403 s تا 404 s ، 405 s تا 406 s ، 407 s تا 408 s ، 409 s تا 410 s ، 411 s تا 412 s ، 413 s تا 414 s ، 415 s تا 416 s ، 417 s تا 418 s ، 419 s تا 420 s ، 421 s تا 422 s ، 423 s تا 424 s ، 425 s تا 426 s ، 427 s تا 428 s ، 429 s تا 430 s ، 431 s تا 432 s ، 433 s تا 434 s ، 435 s تا 436 s ، 437 s تا 438 s ، 439 s تا 440 s ، 441 s تا 442 s ، 443 s تا 444 s ، 445 s تا 446 s ، 447 s تا 448 s ، 449 s تا 450 s ، 451 s تا 452 s ، 453 s تا 454 s ، 455 s تا 456 s ، 457 s تا 458 s ، 459 s تا 460 s ، 461 s تا 462 s ، 463 s تا 464 s ، 465 s تا 466 s ، 467 s تا 468 s ، 469 s تا 470 s ، 471 s تا 472 s ، 473 s تا 474 s ، 475 s تا 476 s ، 477 s تا 478 s ، 479 s تا 480 s ، 481 s تا 482 s ، 483 s تا 484 s ، 485 s تا 486 s ، 487 s تا 488 s ، 489 s تا 490 s ، 491 s تا 492 s ، 493 s تا 494 s ، 495 s تا 496 s ، 497 s تا 498 s ، 499 s تا 500 s ، 501 s تا 502 s ، 503 s تا 504 s ، 505 s تا 506 s ، 507 s تا 508 s ، 509 s تا 510 s ، 511 s تا 512 s ، 513 s تا 514 s ، 515 s تا 516 s ، 517 s تا 518 s ، 519 s تا 520 s ، 521 s تا 522 s ، 523 s تا 524 s ، $$

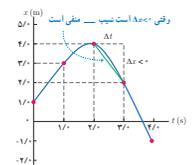
تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان - زمان

فصل ۱، حرکت بر خط راست



تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان - زمان : دوباره به نمودار شکل ۳-۱ که باره‌خط بین دو نقطه دلخواه آن مطابق شکل ۱-۱ رسم شده است توجه کنید. همان‌طور که از درس ریاضی می‌دانید نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ برابر شیب باره‌خطی است که دو نقطه A و B را به هم وصل می‌کند. از سوی دیگر با توجه به رابطه ۳-۱ می‌دانیم که این نسبت برابر سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی t_1 تا t_2 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان برابر شیب باره‌خطی است که نقاط نظر آن دو لحظه در نمودار مکان - زمان را به یکدیگر وصل می‌کند.

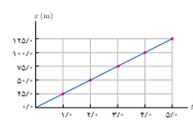
مثال ۳-۱



با توجه به نمودار مکان - زمان شکل ۳-۱، سرعت متوسط ذره را در بازه زمانی $t_1 = 2$ تا $t_2 = 3$ به دست آورید.
پاسخ : از رابطه ۳-۱ داریم :

$$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2 + m - 4 + m}{3 - 2} = -2 \text{ m/s}$$
 علامت منفی نشان می‌دهد که شیب خط حاصل بین این دو نقطه از نمودار مکان - زمان، منفی است. توجه کنید که بدون محاسبه $v_{\text{متوسط}}$ نیز، با توجه به فهم هندسی‌ای که از منفی بودن شیب خط حاصل دو نقطه نمودار داریم، می‌توانستیم به منفی بودن $v_{\text{متوسط}}$ پی ببریم.

مثال ۳-۲



نمودار مکان - زمان موتورسواری که بر خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل رویه‌رو است. سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه‌های زمانی $t_1 = 1$ تا $t_2 = 2$ ، $t_1 = 2$ تا $t_2 = 3$ ، $t_1 = 3$ تا $t_2 = 4$ محاسبه کنید. نتایج به دست آمده را با هم مقایسه و تفسیر کنید.
پاسخ : با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطه ۳-۱، سرعت متوسط موتورسوار، برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با :

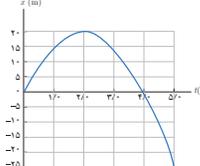
$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{25 + m - 10 + m}{2 - 1} = 15 \text{ m/s}$	بازه زمانی 1 تا 2 : 15 m/s
$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{10 + m - 50 + m}{4 - 2} = 20 \text{ m/s}$	بازه زمانی 2 تا 4 : 20 m/s
$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{125 + m - 25 + m}{5 - 1} = 25 \text{ m/s}$	بازه زمانی 1 تا 5 : 25 m/s

v

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 می‌آید. 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 می‌رفت.

مثال ۳-۳



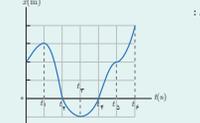
شکل رویه‌رو، نمودار مکان - زمان خودروی را نشان می‌دهد که روی خط راست حرکت می‌کند. الف) با استفاده از داده‌های روی شکل، سرعت متوسط خودرو را در هر یک از بازه‌های زمانی $t_1 = 1$ تا $t_2 = 2$ ، $t_1 = 2$ تا $t_2 = 3$ ، $t_1 = 3$ تا $t_2 = 4$ محاسبه کنید. ب) در کدام یک از این بازه‌های زمانی، سرعت متوسط در جهت محور x و در کدام یک در خلاف جهت محور x است؟

پاسخ : الف) با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطه ۳-۱، سرعت متوسط خودرو برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با :

$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2 + m - 10 + m}{2 - 1} = 10 \text{ m/s}$	بازه زمانی 1 تا 2 : 10 m/s
$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{10 + m - 20 + m}{3 - 2} = 10 \text{ m/s}$	بازه زمانی 2 تا 3 : 10 m/s
$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20 + m - 20 + m}{4 - 2} = 10 \text{ m/s}$	بازه زمانی 2 تا 4 : 10 m/s
$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-25 + m - 2 + m}{5 - 2} = -15 \text{ m/s}$	بازه زمانی 3 تا 5 : 15 m/s
$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-25 + m - 10 + m}{5 - 1} = -20 \text{ m/s}$	بازه زمانی 1 تا 5 : 20 m/s

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

پرسش ۳-۱



با توجه به نمودار مکان - زمان شکل رویه‌رو به پرش‌های زیر پاسخ دهید :
 الف) متحرک چند بار از مبدأ مکان عبور می‌کند؟
 ب) در کدام بازه‌های زمانی متحرک در حال دور شدن از مبدأ است؟
 ج) در کدام بازه‌های زمانی متحرک در حال نزدیک شدن به مبدأ است؟
 د) جهت حرکت چند بار تغییر کرده است؟ در چه لحظه‌هایی؟
 ه) شیب جایی کل در جهت محور x است یا خلاف آن؟

A

پرسش ۳-۱

الف) دوبار و در لحظه‌های t_1 و t_2 .

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

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

ت) دوبار و در لحظه‌های 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: حرکت یو شبه راست

تمرین ۱-۳

شکل رو به رو نمودار مکان-زمان دوچرخه‌سواری را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم در حال حرکت است.

الف) در کدام لحظه‌ای دوچرخه‌سوار بیشترین فاصله از مبدأ را دارد؟
 ب) در کدام بازه‌های زمانی دوچرخه‌سوار در جهت محور x حرکت می‌کند؟
 ج) در کدام بازه‌های زمانی دوچرخه‌سوار در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟
 د) در کدام بازه‌های زمانی، دوچرخه‌سوار ساکن است؟
 ه) تندی متوسط و سرعت متوسط دوچرخه‌سوار را در هر یک از بازه‌های زمانی $۰/s$ تا $۲/s$ ، $۲/s$ تا $۴/s$ ، $۴/s$ تا $۶/s$ ، $۶/s$ تا $۸/s$ ، $۸/s$ تا $۱۰/s$ ، $۱۰/s$ تا $۱۲/s$ ، $۱۲/s$ تا $۱۴/s$ حساب کنید.

تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای: تندی متحرک در هر لحظه از زمان را **تندی لحظه‌ای** می‌نامند. اگر هنگام گزاش 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 تندی سنج خودروی شما روی ۱۰۰ km/h باشد (شکل ۱-۴)، 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 و خط راست بررسی می‌شود، سرعت لحظه‌ای متحرک را در حل مسئله‌ها به جای بردار \vec{v} به صورت «به صورت» یا «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».

پوستی ۱-۴

از روی نمودار مکان-زمان توضیح دهید در چه صورت سرعت لحظه‌ای متحرک همواره با 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 ۱-۵ دیده می‌شود اگر Δt به تدریج کوچک و کوچک‌تر شود، نقطه A به نقطه A' نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود؛ به طوری که اگر Δt به سمت صفر میل کند (A' به A) 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 برابر 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 ۱-۴ یک کوچک شدن تدریجی A' به نقطه A به نقطه A' نزدیک می‌شود. در این صورت خط واصل بین این دو نقطه، در حالی که بازه زمانی Δt خیلی خیلی کوچک شود، به خط مماس بر نمودار در نقطه A میل می‌کند. این نسبت، نسبت این خط مماس به خط واصل بین دو نقطه A و 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 تندى 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 v یا $|\vec{v}|$ 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.

مثال ۲-۱

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

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

تمرین ۳-۱

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

الف) از لحظه صفر تا لحظه t_1 سرعت متحرک رو به افزایش است یا کاهش؟
ب) اگر در لحظه t_1 خط مماس بر منحنی موازی محور زمان باشد، سرعت متحرک در این لحظه چقدر است؟

تمرین ۴-۱

شکل رویه‌رو نمودار مکان-زمان متحرکی را نشان می‌دهد. خط مماس بر منحنی در لحظه $t = 4$ و رسم شده است. سرعت متحرک را در این لحظه پیدا کنید.

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای: در علوم سال نهم دیدیم که هرگاه سرعت جسمی تغییر کند حرکت آن شتاب‌دار است. با توجه به اینکه بردار سرعت در هر نقطه از مسیر، و مسیر حرکت مماس است تغییر سرعت جسم در نقاط مختلف مسیر حرکت می‌تواند به دلیل تغییر در اندازه بردار سرعت (تندی) جسم باشد (شکل ۸-۱ الف). با می‌تواند به دلیل تغییر در جهت بردار سرعت آن باشد (شکل ۸-۱ ب). با همین می‌تواند به دلیل تغییر در اندازه و جهت بردار سرعت متحرک باشد (شکل ۸-۱ ج).

مثال ۸-۱ الف: وقتی سرعت جسمی (الف) به دلیل تغییر اندازه آن، (ب) به دلیل تغییر جهت آن و (ج) به دلیل تغییر اندازه و جهت آن تغییر کند، حرکت جسم شتاب‌دار است.

۱- توجه کنید که مماس بودن بردار سرعت و مسیر حرکت تفاوتی از برای سرعت یا شیب خط مماس بر نمودار مکان-زمان است که پیش از این دیدیم.

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 مبحث سرعت متوسط و سرعت لحظه‌ای، در اینجا نیز شتاب متوسط ابتدا برای حالت کلی تعریف شده است و سپس با حل یک مثال برداری بر خط راست، موضوع دنبال شده است. در ادامه چون صرفاً حرکت بر خط راست بررسی می‌شود. با کنار گذاشتن نمادگذاری برداری، با توجه به علامت‌های جبری سرعت در لحظه‌های مختلف، می‌توان شتاب متوسط را در هر دو 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 به‌دست 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 ۹-۱ و نتیجه آن اهمیت دارد. زیرا در بخش حرکت با شتاب ثابت، از نتیجه این مثال برای بررسی این نوع حرکت استفاده شده است.

فصل ۱، حرکت بر خط راست

شتاب متوسط متحرک در هر بازه زمانی دلخواه t_1 تا t_2 به صورت رابطه ۵-۱ تعریف می‌شود که در آن v_1 سرعت متحرک در لحظه t_1 و v_2 سرعت متحرک در لحظه t_2 است. همان‌طور که دیده می‌شود شتاب متوسط (\bar{a}_{av}) کمیتی برداری و هم‌جهت با بردار تغییر سرعت (Δv) است. یکای SI شتاب متوسط، متر بر مربع ثانیه (m/s^2) است.

$$\bar{a}_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (5-1) \quad (\text{شتاب متوسط})$$

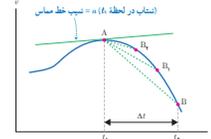
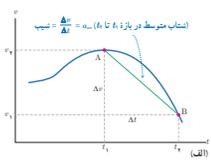
مثال ۵-۱

خودروی از حال سکون در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند. پس از 1.2 s، سرعت خودرو به 22 m/s در جهت محور x می‌رسد. شتاب متوسط خودرو را در این بازه زمانی به‌دست آورید.



پاسخ: از رابطه ۵-۱، داریم:

$$\bar{a}_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{(22 \text{ m/s}) - 0 \text{ m/s}}{1.2 \text{ s} - 0 \text{ s}} = (18.3 \text{ m/s}^2) \hat{i}$$
 همان‌طور که دیده می‌شود، اندازه شتاب متوسط خودرو 18.3 m/s^2 و شتاب در جهت محور x است.



شکل ۵-۱ الف) شتاب متوسط بین دو لحظه t_1 و t_2 (ب) شتاب متوسط متحرک در لحظه t_1

اگر متحرک در یک راستا حرکت کند رابطه ۵-۱ را می‌توان به صورت زیر به کار برد ولی با توجه به ماهیت برداری v_1 و v_2 باید به علامت‌های جبری آنها که نشان‌دهنده جهت آنهاست توجه کنید.

$$\bar{a}_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (5-1) \quad (\text{شتاب متوسط در حرکت بر خط راست})$$

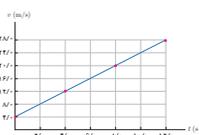
تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت - زمان: در شکل ۹-۱ الف، نمودار سرعت - زمان متحرکی نشان داده شده است که روی خط راست حرکت می‌کند. با توجه به تعریف شتاب متوسط، معلوم می‌شود که شتاب متوسط بین دو لحظه برابر شیب خطی است که نمودار سرعت - زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۹-۱ ب دیده می‌شود، اگر Δt به سمت صفر میل کند ($\Delta t \rightarrow 0$) خط واصل بین نقطه‌های A و B، به خط مماس بر نمودار در نقطه A میل می‌کند. در این حالت، شیب خط مماس برابر شتاب متحرک در لحظه t_1 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که: شتاب در هر لحظه دلخواه t_1 برابر شیب خط مماس بر نمودار سرعت - زمان در آن لحظه است. در کتاب‌های فیزیک برای سادگی، شتاب لحظه‌ای را شتاب می‌نامند و آن را با a نشان می‌دهند.

۱- آموزش مسائلی که دانش‌آموزان را در محاسبه $\bar{a}_{av} = \Delta v / \Delta t$ ، درگیر عملیات برداری می‌کند، در صفحه ۱۰۹ با فضای بزرگ می‌کند خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

پرسش ۶-۱

در این پرسش دانش‌آموزان باید در لحظه‌های خواسته شده، خطی بر 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.

مثال ۹-۱



نمودار سرعت-زمان موتورسواری که در امتداد محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی 0 s تا 4 s مطابق شکل رویه‌رو است. شتاب متوسط موتورسواری و جهت آن را در هر یک از بازه‌های زمانی t_1 تا t_2 یا 0 s تا 2 s ، 2 s تا 4 s ، 1 s تا 3 s بیابید.
 پاسخ: با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطه ۶-۱، شتاب متوسط موتورسواری، برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با:

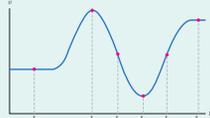
$$\bar{a}_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{A/\text{m/s} - 0 \text{ m/s}}{2/\text{s} - 0 \text{ s}} = 2/\text{m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 0 \text{ s تا } 2 \text{ s}$$

$$\bar{a}_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{20/\text{m/s} - 10/\text{m/s}}{4/\text{s} - 2/\text{s}} = 5/\text{m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 2 \text{ s تا } 4 \text{ s}$$

$$\bar{a}_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{10/\text{m/s} - 0 \text{ m/s}}{3/\text{s} - 1/\text{s}} = 5/\text{m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 1 \text{ s تا } 3 \text{ s}$$

با توجه به علامت مثبت a در هر سه بازه زمانی، شتاب متوسط در جهت مثبت محور x است. اگر در هر بازه زمانی دلخواه دیگری نیز شتاب متوسط موتورسواری را حساب کنید با توجه به ثابت بودن شیب نمودار سرعت - زمان، اندازه و جهت یکسانی برای شتاب به‌دست می‌آید.

پرسش ۶-۱



شکل رویه‌رو نمودار سرعت - زمان دو چرخه‌سوار را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. جهت شتاب دو چرخه‌سوار را در هر یک از لحظه‌های t_1 ، t_2 ، t_3 و t_4 تعیین کنید.

تمرین ۳-۱



نمودار سرعت-زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی 0 s تا 4 s مطابق شکل رویه‌رو است. الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟ ب) شتاب خودرو را در لحظه $t = 4 \text{ s}$ به‌دست آورید.

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 $t = ۸/۰s$ 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:

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

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

فصل ۱ حرکت یو خط راست

تمرین ۵-۱

نمودار سرعت - زمان خودرویی که در راستای محور حرکت می‌کند در بازه زمانی صفر تا $۱۴/۰s$ مطابق شکل رویارو است.

الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟
 ب) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t = ۲/۰s$ ، $t = ۸/۰s$ و $t = ۱۱/۰s$ به دست آورید.

۳-۱ 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 شتاب 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:

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

شکل ۱-۱ حرکت با سرعت ثابت، هم جهت سرعت و هم اندازه آن (مثبت) ثابت است.

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

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

یا:

$$x_2 = vt_2 + x_1 \quad (۱-۱)$$

(معادله مکان - زمان در حرکت با سرعت ثابت)

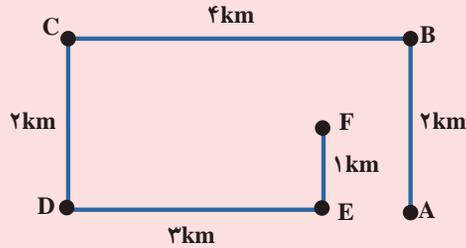
در معادله ۱-۱ معمولاً $x_1 = 0$ را که مکان متحرک در لحظه $t_1 = 0$ است مکان اولیه متحرک می‌نامند. توجه کنید که مکان‌های x_1 و x_2 می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند. سرعت متحرک هم بدلیل ماهیت برداری آن، در صورتی که حرکت در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این صورت منفی است.

شکل ۱-۱ الف مکان مکان یک خودرو در هر لحظه معادله $x = vt$ به نمودار مکان-زمان تبدیل می‌شود. با سرعت ثابت می‌آید.

جهت حرکت

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

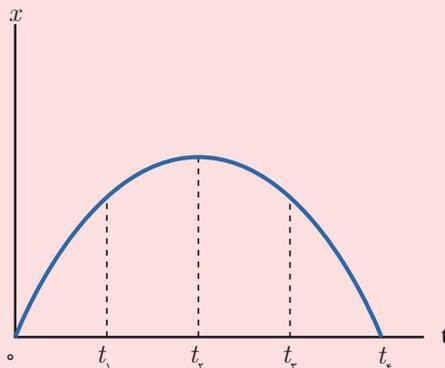
اولیه خود برسد؟ شکل مناسبی از مسئله رسم کنید.

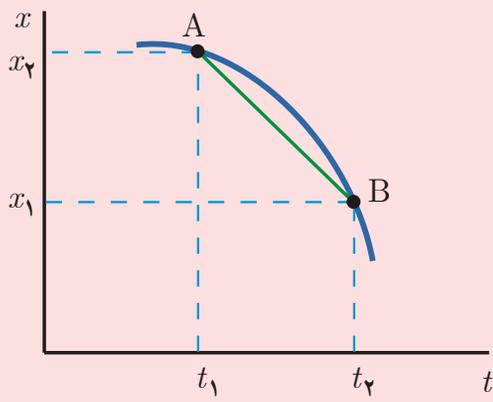
۵) دونه‌ای در لحظه $t = 0$ (مبدأ زمان) در مکان -12 m و در لحظه $t = 4 \text{ s}$ در مکان $+24 \text{ m}$ قرار دارد.

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

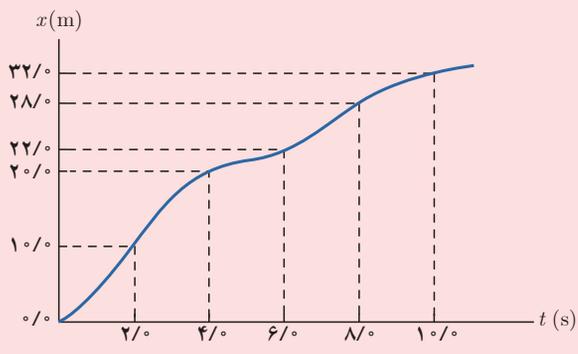
ب) بردار جابه‌جایی دونه را رسم و اندازه آن را پیدا کنید.

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

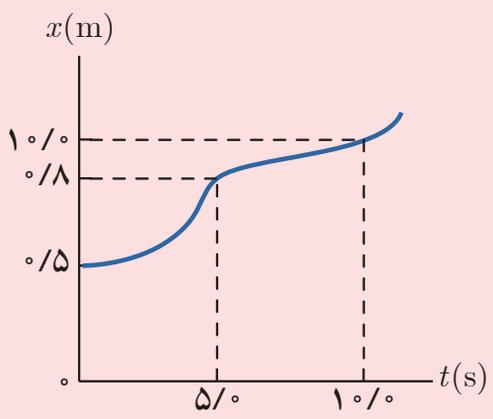




۷ شکل زیر نمودار $x - t$ متحرکی را نشان می‌دهد. شیب خط AB در این نمودار را برحسب کمیت‌های روی محورهای x و t به دست آورید و بگویید که مقدار به دست آمده نماینده چه کمیتی است؟



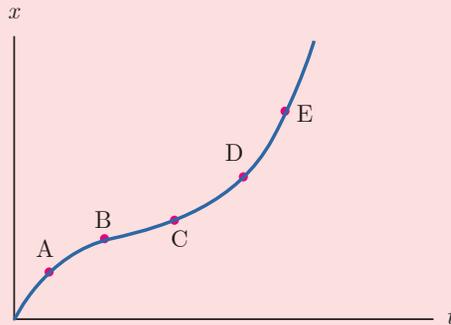
۸ نمودار مکان-زمان متحرکی مطابق شکل روبه‌رو است. الف) در بازه‌های زمانی ۲ ثانیه، جابه‌جایی متحرک را در جدولی بنویسید. ب) سرعت متوسط متحرک در هر یک از بازه‌های زمانی ۲s، و همچنین سرعت متوسط در بازه زمانی ۱۰s چقدر است؟ پ) در کدام بازه زمانی سرعت متوسط متحرک بیشینه و در کدام بازه کمینه است؟



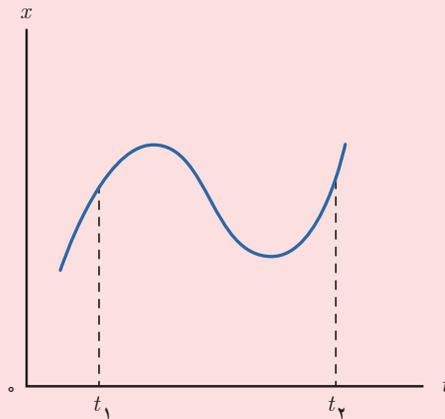
۹ نمودار مکان - زمان متحرکی که روی خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. نسبت سرعت متوسط متحرک در ۵ ثانیه دوم حرکت به سرعت متوسط آن در ۵ ثانیه اول حرکت کدام است؟

- 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 ب) 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 ۰، ۱، ۲، ۳ ثانیه روی محور x 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؟

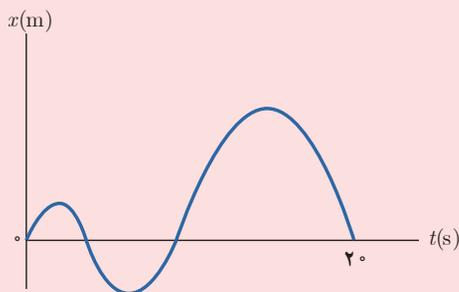
۱۳ معادله مکان- زمان ذره‌ای که در امتداد محور x حرکت می‌کند به صورت $x = At^2 - Bt^3$ است، که در آن x بر حسب متر

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؟

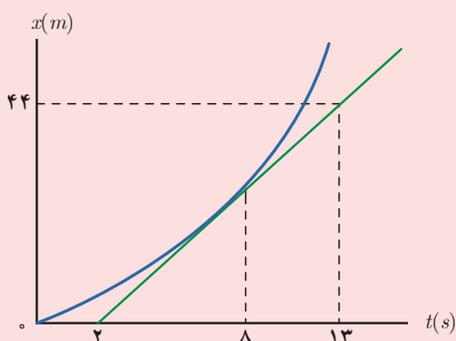
۱۴ شکل زیر نمودار مکان- زمان ذره‌ای را به مدت ۲۰s نشان می‌دهد که برخط راست حرکت می‌کند. با توجه به این نمودار،



در بازه زمانی ۲۰ ثانیه :

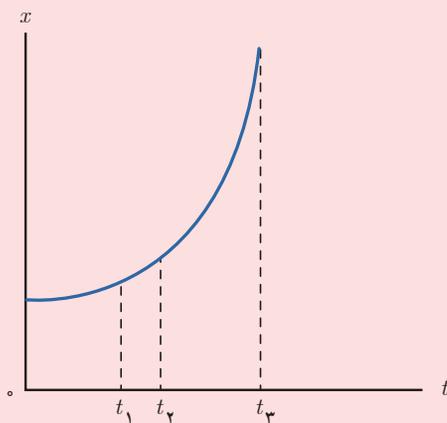
- الف) سرعت متوسط ذره مثبت بوده است.
- ب) سرعت متوسط ذره منفی بوده است.
- پ) سرعت متوسط ذره صفر بوده است.
- ت) بدون اطلاع از مقدارهای عددی روی محور x نمی‌توان سرعت متوسط را تعیین کرد.

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



نشان داده شده است، سرعت لحظه‌ای آن را در $t = 8$ s پیدا کنید.

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

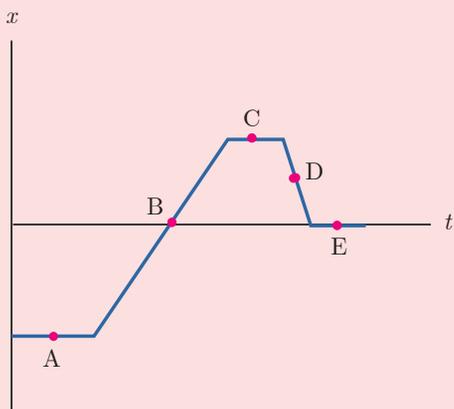


روبه‌رو است. سرعت متوسط متحرک در کدام بازه زمانی بیشتر است؟

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

ت) به اندازه بازه‌های زمانی بستگی دارد.

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



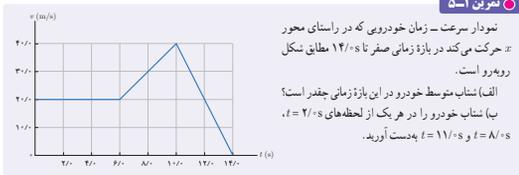
با توجه به این نمودار جاهای خالی را در جدول صفحه بعد کامل کنید.

..... 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

شکل ۱: حرکت در خط راست



تمرین ۱-۱

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

۲-۱- 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 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 جهت سرعت و هم اندازه آن (صافی) ثابت است.

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

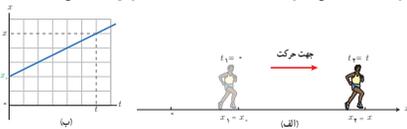
$$x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1)$$

یا:

$$x = vt + x_0 \quad (۲-۱) \quad (\text{معادله مکان - زمان در حرکت با سرعت ثابت})$$

در معادله ۲-۱ 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.

شکل ۱-۱: الف) مکان یک دونه در دو لحظه متفاوت. ب) نمودار مکان - زمان دونه‌ای که در جهت محور x با سرعت ثابت می‌دود.



تمرین ۱-۶

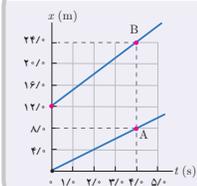
با توجه به شیب هر یک از نمودارها، دانش‌آموزان به سادگی می‌توانند سرعت هر یک از متحرک‌های A و B را پیدا کنند.

$$v_A = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{24 - 0}{4} = 6 \text{ m/s} \quad \text{و} \quad v_B = \frac{(24 - 0) - (14 - 0)}{4} = 2.5 \text{ m/s}$$

با توجه به رابطه ۲-۱ معادله مکان - زمان هر متحرک را به طور جداگانه می‌نویسیم.

$$x_A = v_A t + x_{A,0} = (6 \text{ m/s})t + 0 = (6 \text{ m/s})t \quad \text{و} \quad x_B = v_B t + x_{B,0} = (2.5 \text{ m/s})t + 14 \text{ m}$$

تمرین ۱-۶



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.

تمرین 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 به دست 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، جابه‌جایی وی را در این مدت به دست آورید. **پاسخ:** (الف) با توجه به نمودار مکان - زمان، در $t=0$ فرار دارد. (ب) با توجه به داده‌های روی نمودار و قرار دادن داده‌های یک لحظه دلخواه (رای مثل $t=200$ و $x=400$ در رابطه $x=vt$) داریم: $400 = v \cdot 200 \Rightarrow v = 2 \text{ m/s}$ به دست 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 $t=300$ توجه کنید که فاصله از مبدأ مکان $|x|$ است و نه خود x . (د) با قرار دادن $x=500$ در رابطه $x=vt$ داریم: $500 = 2t \Rightarrow t = 250 \text{ s}$

تمرین ۱-۲

شکل مغالی 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.

تمرین ۱-۳

شکل الف، مکان دو کفش دوزک A و B 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. (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 و مکان هررسی کفش دوزک‌ها را پیدا کنید.

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. پستی از این و در مثال ۸-۱ دیدیم در این شرایط، شتاب متوسط $(a_{avg} = \Delta v / \Delta t)$ در بازه‌های زمانی مختلف یکسان است. در چنین حرکتی شتاب متوسط در هر بازه زمانی برابر شتاب لحظه‌ای متحرک است، یعنی $a_{avg} = a$.

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 سرانگیزی در حال لغزیدن است، یا جسمی که در حال سقوط است و اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد دارای حرکت با شتاب ثابت است. همچنین خودرویی که پس از سبز شدن چراغ، شروع به حرکت می‌کند یا هواپیمایی که روی پدال پرواز حرکت می‌کند یا به شرایط لازم برای برخاستن رسید مثال‌هایی از حرکت با شتاب تقریباً ثابت است. به دلیل 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 ۱۳-۱ را برای حرکت با شتاب ثابت $(a = a_0)$ در امتداد خط راست می‌توانیم به‌صورت زیر بنویسیم کنیم:

$$v = at + v_0 \quad (13-1)$$

همان‌طور که دیده می‌شود تغییرات v نسبت به t در معادله ۱۳-۱ 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:

$$v_{avg} = \frac{v_0 + v}{2} \quad (13-1)$$

تمرین ۱-۷

(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 ($x = 0/5 \text{ m}$). همچنین خطی که از محل برخورد دو نمودار، موازی محور x رسم می‌شود و محور زمان را قطع می‌کند زمان هم‌رسی تقریبی کفش دوزک‌هاست ($t = 3/5 \text{ s}$).

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

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

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

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

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

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

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

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

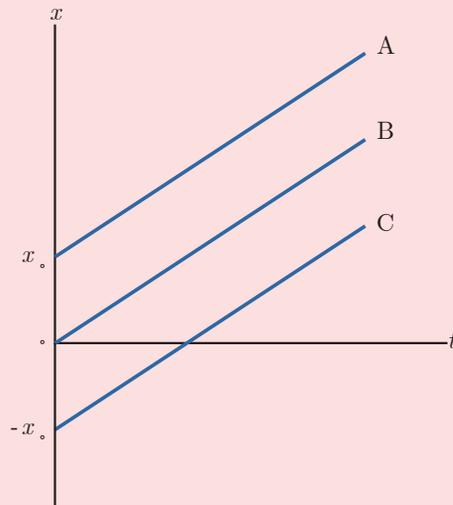
با جای گذاری t در یکی از معادله‌های مکان - زمان

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؟

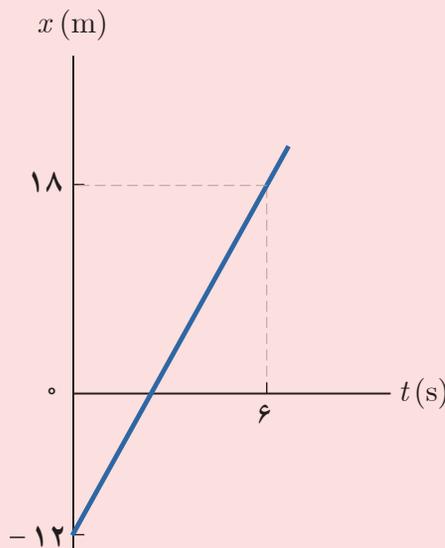
پ) نمودار مکان زمان متحرک را رسم کنید.

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؟

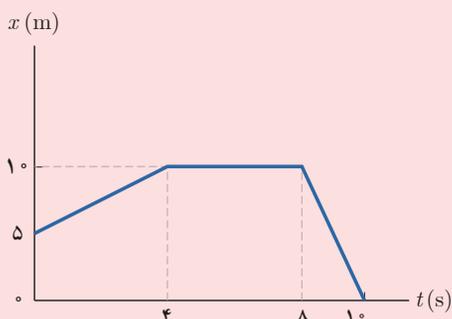


۷ جسمی با سرعت ثابت در امتداد خط راست در حرکت است. اگر این جسم در لحظه $t = 4\text{ s}$ در فاصله 22 m از مبدأ مکان و ۲ ثانیه بعد در فاصله 34 m از آن مبدأ باشد، سرعت جسم چقدر است؟ معادله مکان - زمان جسم را بنویسید.

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.

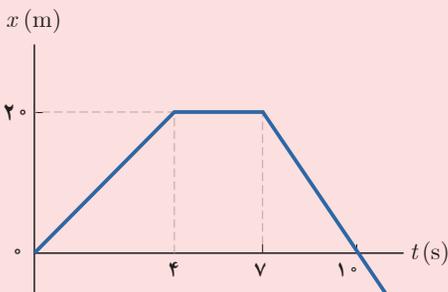
۱۱ ذره‌ای با سرعت ثابت روی محور x ها به حرکت درمی‌آید و پس از $۲s$ به مبدأ می‌رسد و $۲s$ بعد به نقطه $x = -۶m$ می‌رسد. معادله حرکت آن در SI کدام است؟

الف) $x = -۳t - ۶$ ب) $x = -۳t + ۶$ پ) $x = ۳t - ۶$ ت) $x = ۳t + ۶$

۱۲ قطاری با سرعت ثابت $۳۰ m/s$ از روی پلی به طول $۴۰۰m$ در مدت $۲۰s$ 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 $۱۰s$ پس از شروع حرکت چند m/s است؟



الف) صفر

ب) $۹ m/s$ در جهت مثبت محور x

پ) $۹ m/s$ در جهت منفی محور x

ت) $\frac{۲}{۳} m/s$ در جهت مثبت محور x

ث) $\frac{۲}{۳} m/s$ در جهت منفی محور x

۱۴ معادله سرعت- زمان متحرکی در SI به صورت $v = ۴t + v_0$ و سرعت متوسط آن در ۵ ثانیه اول حرکت $۲۰ m/s$ بوده است.

الف) مقدار v_0 چقدر است؟ ب) در صورتی که در $t = ۰$ متحرک در $x_0 = -۲m$ 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

$۱۰۸۰ km/h$ و تندی پرواز هواپیمای دوم $۹۰۰ km/h$ است. اگر هواپیمای اول پس از ۲ ساعت به مقصد برسد،

الف) فاصله بین دو فرودگاه چقدر است؟

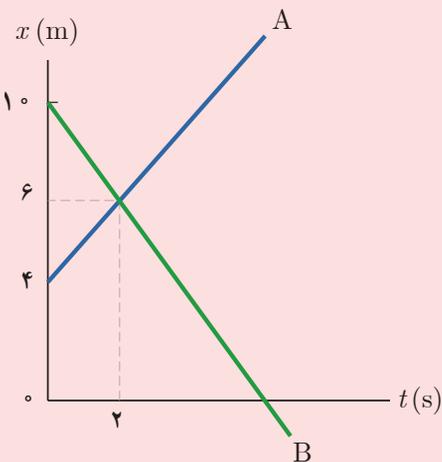
ب) هواپیمای دوم چند دقیقه پس از هواپیمای اول به مقصد

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.

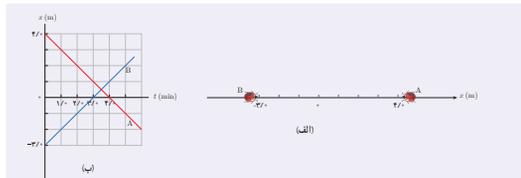


۳-۱- حرکت با شتاب ثابت

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 ۱۲-۱ 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.

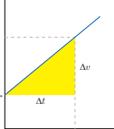
شکل ۱۱: حرکت بر خط راست



۳-۱-۱ حرکت با شتاب ثابت

شکل ۱۲-۱ 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 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 سر و کار داریم. جسمی که روی سطح هموار یک سرانگشتی در حال لغزیدن است، یا جسمی که در حال سقوط است و اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد دارای حرکت با شتاب ثابت است. همچنین خودرویی که پس از سبز شدن چراغ، شروع به حرکت می‌کند یا هواپیمایی که روی پلانه پرواز حرکت می‌کند تا به شرایط لازم برای برخاستن برسد مثال‌هایی از حرکت با شتاب تقریباً ثابت است. به دلیل اهمیت و رایج بودن حرکت‌های با شتاب ثابت، در ادامه با معادلات این نوع حرکت آشنا می‌شویم.



شکل ۱۳-۱ نمودار سرعت-زمان در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن a و v_0

معادله سرعت-زمان در حرکت با شتاب ثابت : اگر مانند نمودار شکل ۱۲-۱ $a = +$ سرعت اولیه متحرک v_0 و در لحظه t ، سرعت متحرک برابر v باشد در این صورت معادله ۸-۱ را برای حرکت با شتاب ثابت $(a = a_{av})$ در امتداد خط راست می‌توانیم به‌صورت زیر بازنویسی کنیم :

$$(۸-۱) \quad (معادله سرعت-زمان در حرکت با شتاب ثابت) \quad v = at + v_0$$

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 :

$$(۹-۱) \quad (معادله سرعت متوسط در حرکت با شتاب ثابت) \quad v_{av} = \frac{v_0 + v}{2}$$

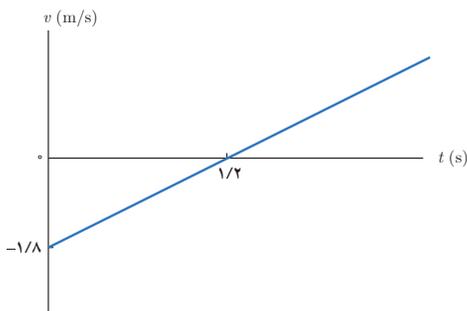
تمرین ۸-۱ (الف)

$$\begin{aligned} v &= (-1/8 \text{ m/s}^2)t + 2/2 \text{ m/s} \\ &= (-1/8 \text{ m/s}^2)(4/0 \text{ s}) + 2/2 \text{ m/s} \\ &= -5/0 \text{ m/s} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} v_0 &= 2/2 \text{ m/s} \\ v_{av} &= \frac{v_0 + v}{2} = \frac{2/2 \text{ m/s} + (-5/0 \text{ m/s})}{2} = -1/4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

چون حرکت جسم با شتاب ثابت است، داریم :



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

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

مثال ۱۱-۱

شکل رویارو هواپیما را نشان می‌دهد که از حال سکون و با شتاب ثابت روی باله 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) جاهایی هواپیما در این مدت چقدر است؟

پاسخ: الف) با توجه به ثابت بودن شتاب حرکت هواپیما روی باله پرواز، داده‌های روی شکل را می‌توان در معادله $Ax = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ جای‌گذاری کرد. به این ترتیب داریم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow 9.5 \text{ m/s} = (2.2 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 4.32 \text{ s}$$

در اولین فرصتی که سوار هواپیما نندید، نتیجه یادست آمده را وارسی کنید!

ب)

$$v_{\text{avg}} = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{0 \text{ m/s} + 9.5 \text{ m/s}}{2} = 4.75 \text{ m/s}$$

ج) از رابطه $Ax = v_0t + \frac{1}{2}at^2$ داریم:

$$v_{\text{avg}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v_{\text{avg}} \Delta t = (4.75 \text{ m/s})(4.32 \text{ s}) = 20.5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

تعریف ۱۱-۱

معادله سرعت - زمان متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند در SI به صورت $v = -1/Ax + v_0$ است. الف) سرعت متحرک در لحظه $t = 4.32 \text{ s}$ چقدر است؟ ب) سرعت متوسط متحرک و جاهایی آن در بازه زمانی صفر تا $t = 4.32 \text{ s}$ چقدر است؟ ج) نمودار سرعت - زمان این متحرک را رسم کنید.

فعالیت ۱۱-۱

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 $v = f(t)$ توصیف می‌شود؟ همچنین توضیح دهید تندی کدام خودرو در حال افزایش (حرکت تندشونده) و تندی کدام خودرو در حال کاهش (حرکت کندشونده) 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 دوردست می‌بیند و با شتاب ثابت، تندی خود را کاهش می‌دهد (حرکت کند شونده).

فصل ۱ حرکت بر خط راست

معادله مکان - زمان در حرکت با شتاب ثابت: اگر جسمی که با شتاب ثابت و در امتداد محور x حرکت می کند در $t=0$ در مکان x_0 و دارای سرعت v_0 باشد، در این صورت از رابطه های ۱-۱ و ۱-۲ داریم:

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

با قرار دادن رابطه ۱-۲ در معادله بالا داریم:

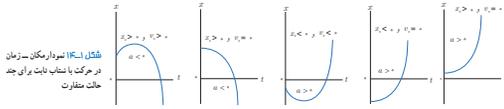
$$x = \left(\frac{at + v_0}{2}\right)t + x_0$$

با ساده سازی این رابطه خواهیم داشت:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \quad (۱-۱)$$

(معادله مکان - زمان در حرکت با شتاب ثابت)

همان طور که دیده می شود در این نوع حرکت، مکان متحرک تابعی درجه دوم از زمان است. با رسم تابع های درجه دوم در ریاضی ۱ پایه دهم آشنا شدید. شکل ۱-۲ نمودار $x=f(t)$ را برای چند حالت مختلف نشان می دهد.



شکل ۱-۲ نمودار مکان - زمان در حرکت با شتاب ثابت برای چند حالت مختلف

مثال ۱-۱

شکل رویه رو نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می دهد که با شتاب ثابت در امتداد محور x حرکت می کند. الف) شتاب متحرک را پیدا کنید. ب) معادله سرعت - زمان متحرک را بنویسید و نمودار آن را رسم کنید. ج) جابه جایی 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 برابر جابه جایی در آن بازه است، جابه جایی 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 خط چین مماس بر منحنی در $t = 1/8$ برابر است و نشان دهنده این است که سرعت متحرک در این لحظه صفر است ($v = 0$ m/s). با توجه به داده های روی نمودار و معادله ۱-۱ داریم:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow 0 = \frac{1}{2}a\left(\frac{3}{8}\right)^2 + v_0\left(\frac{3}{8}\right) + (-9) \Rightarrow a = 20 \text{ m/s}^2$$

ب) از معادله ۱-۱ داریم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow v = (20 \text{ m/s}^2)t + 0 \Rightarrow v = (20 \text{ m/s}^2)t$$

نمودار این معادله در شکل رویه رو رسم شده است.

ادامه راهنمای تدریس: از آنجا که دانش آموزان در ریاضی سال دهم با معادله $y = ax^2 + bx + c$ و نحوه رسم آن برای حالت های مختلف آشنا شده اند، لذا در این قسمت از آموخته های قبلی دانش آموزان در درس ریاضی برای رسم معادله مکان - زمان متحرک که دارای حرکت با شتاب ثابت است استفاده کرده ایم. معادله مکان - زمان برای چند حالت خاص در شکل ۱-۴ و مثال ۱-۲ در کتاب درسی رسم شده است. حالت های دیگر را نیز همکاران محترم می توانند به کمک دانش آموزان مورد بررسی قرار دهند.

تمرین ۱-۱

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

$$x = 0$$

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

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

$$\Delta x = 300 \text{ m}$$

$$v = ?$$

از آنجا که هنوز معادله سرعت - جابه جایی معرفی نشده است، هدف این تمرین استفاده از معادله هایی است که تاکنون دانش آموزان با آنها آشنا شده اند. ابتدا از معادله ۱-۱، مدت زمان حرکت خودرو را به دست می آوریم:

مثال ۱-۱

ب) با توجه به نمودار مکان - زمان، جابه جایی متحرک در بازه زمانی $(0, 3/8)$ برابر 9 m است. $\Delta x = v_0t + \frac{1}{2}at^2 = 0 + \frac{1}{2}(20)\left(\frac{3}{8}\right)^2 = 9 \text{ m}$ است که با نتیجه قسمت ب سازگار است.

توجه کنید که می توانیم سرعت متوسط در این بازه زمانی را از رابطه $v_{avg} = \frac{v + v_0}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می رسد.

تمرین ۱-۱

خودروی با سرعت 18 km/h در امتداد مسیری مستقیم از چهارراهی می گذرد. تندی آن با شتاب 1 m/s^2 افزایش می یابد. سرعت خودرو پس از 300 m جابه جایی چقدر است؟

معادله سرعت - جابه جایی در حرکت با شتاب ثابت: اگر هنگام بررسی حرکت جسمی، زمان t معلوم باشد، می توان از معادله سرعت - جابه جایی برای پیدا کردن یکی از کمیت های جابه جایی Δx ، سرعت اولیه v_0 ، سرعت v ، شتاب a متحرک استفاده کرد. برای بدست آوردن این معادله از رابطه های ۱-۱ و ۱-۲ شروع می کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام بدست آوردن معادله مکان - زمان دیدیم می توان 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:

$$v^2 = v_0^2 + 2ax \quad (۱-۱)$$

(معادله سرعت - جابه جایی در حرکت با شتاب ثابت)

اگرچه این رابطه را برای بازه زمانی صفر تا t بدست آوردیم، برای هر بازه زمانی دلخواه t_1 تا t_2 نیز می توانیم از رابطه زیر استفاده کنیم که در آن v_1 و v_2 منطقی با لحظه t_1 و همچنین v_2 و v_1 منطقی با لحظه t_2 هستند.

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

مثال ۱-۲

محیطبان یک بک پارک حفاظت شده هنگام گشت شبانه، با تندی 4 km/h در جاده ای مستقیم در حرکت است که ناگهان گوزن بدون حرکتی را در جلوی خود می بیند و ترمز می گیرد (شکل رویه رو). حرکت خودرو با شتابی به اندازه 3 m/s^2 کند می شود تا سرانجام متوقف شود. اگر لحظه ای که محیطبان ترمز می گیرد، گوزن در فاصله 22 m تری از خودرو باشد.

الف) خودرو در چه فاصله ای از گوزن متوقف می شود؟
ب) چه مدت طول می کشد تا خودرو متوقف شود؟

ادامه راهنمای حل تمرین ۹-۱

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow$$

$$30 \text{ m} = \frac{1}{2}(10 \text{ m/s}^2)t^2 + (50 \text{ m/s})t + 0$$

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

$$t^2 + 10t - 60 = 0$$

پاسخ قابل قبول این معادله درجه دوم $t = 20 \text{ s}$ است. به این ترتیب از معادله ۸-۱ داریم :

$$v = at + v_0 = (10 \text{ m/s}^2)(20 \text{ s}) + 50 \text{ m/s}$$

$$\Rightarrow v = 250 \text{ m/s}$$

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 ۱۴

در لحظه $t_1 = 2 \text{ s}$ داریم :

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow x_1 = \frac{1}{2}(-2 \text{ m/s}^2)(2 \text{ s})^2 + (-2 \text{ m/s})(2 \text{ s}) + 0 \Rightarrow x_1 = -6 \text{ m}$$

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 برابر است با :

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

در نتیجه متحرک در لحظه $t_2 = 4 \text{ s}$ در مکان $x_2 = 4 \text{ m} + x_1 = 4 \text{ m} - 6 \text{ m} = -2 \text{ m}$ 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 :

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

در نتیجه متحرک در لحظه $t_3 = 5 \text{ s}$ در مکان $x_3 = 4 \text{ m} + 1 \text{ m} = 5 \text{ m}$ قرار دارد.

توجه: در شکل زیر جابه جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان حرکت نشان داده شده است. مسافت کل پیموده شده برابر $10 \text{ m} + 5 \text{ m} = 15 \text{ m}$ است.

بردار جابه جایی کل که برابر $\vec{r} = 15\hat{i} \text{ m}$ است.

ج 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 :

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

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

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 = -2 \text{ m} + 2 \text{ m} + 2 \text{ m} + 1 \text{ m} = 3 \text{ m}$$

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

فصل ۱۱ حرکت دو بعدی

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 محطایان ترمز گرفته و در نتیجه $v_0 = 0 \text{ m/s}$ و $x_0 = 0 \text{ m}$ 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 :

$$v^2 - v_0^2 = a(x - x_0) \Rightarrow 0 - 0 = (-10 \text{ m/s}^2)(x - 0) \Rightarrow x = 0 \text{ m}$$

در نتیجه $x = 0 \text{ m}$ و خودرو در فاصله $\Delta x = 0 \text{ m} - 10 \text{ m} = -10 \text{ m}$ از گوزن متوقف می شود و خوشبختانه برخوردی بین خودرو و گوزن صورت نمی گیرد.

ب) از رابطه ۸-۱ داریم :

$$v = at + v_0 \Rightarrow 0 = 10 \text{ m/s}^2 t + 10 \text{ m/s} \Rightarrow t = 1 \text{ s}$$

مثال ۱۴

متحرکی که در راستای محور x حرکت می کند در لحظه $t = 0$ از مکان $x_0 = 0 \text{ m}$ می گذرد. نمودار سرعت-زمان این متحرک مطابق شکل 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 لحظاتی جهت حرکت متحرک تغییر کرده است؟

ج) با توجه به نمودار سرعت-زمان توضیح دهید در کدام بازه های زمانی حرکت جسم تندشده و با کندشده است.

د) مکان متحرک را در هر یک از لحظه های $t_1 = 1 \text{ s}$ ، $t_2 = 2 \text{ s}$ ، $t_3 = 3 \text{ s}$ ، $t_4 = 4 \text{ s}$ ، $t_5 = 5 \text{ s}$ و $t_6 = 6 \text{ s}$ پیدا کنید و روی محور x نشان دهید. (تا 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 $v-t$ را حساب کنید و مقدار آن را با جابه جایی متحرک در قسمت قبل مقایسه کنید. مساحت بخشی از سطح را که زیر محور 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 $t_1 = 1 \text{ s}$ علامت سرعت و در نتیجه جهت حرکت متحرک تغییر کرده است.

ج) در بازه زمانی صفر تا $t_1 = 1 \text{ s}$ ، متحرک در حال کاهش و در نتیجه حرکت کندشده است. در بازه زمانی $t_1 = 1 \text{ s}$ تا $t_2 = 2 \text{ s}$ ، متحرک با سرعت ثابت حرکت کندشده 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 کندشده است. در بازه زمانی $t_4 = 4 \text{ s}$ تا $t_5 = 5 \text{ s}$ ، حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب از معادله ۸-۱ داریم :

$$v = at + v_0 \Rightarrow (2 \text{ m/s}) = a(2 \text{ s}) + (-2 \text{ m/s}) \Rightarrow a = 2 \text{ m/s}^2$$

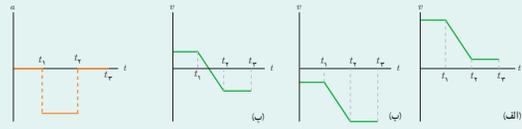
در این صورت با توجه به معادله ۸-۱، در لحظه $t_1 = 1 \text{ s}$ داریم :

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow x_1 = \frac{1}{2}(-2 \text{ m/s}^2)(1 \text{ s})^2 + (-2 \text{ m/s})(1 \text{ s}) + 0 \Rightarrow x_1 = -1 \text{ m}$$

فصل ۱: حرکت بر خط راست

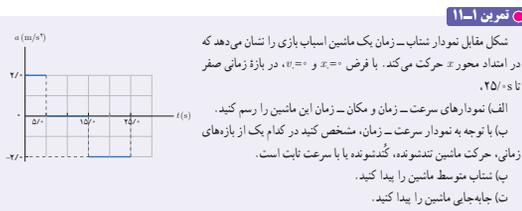
پرسش ۷-۱

نمودار شتاب - زمان متحرکی 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.



نمونه 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.



نمونه ۱۱-۱

شکل مقابل نمودار شتاب - زمان یک مانسین اسباب بازی را نشان می دهد که در امتداد محور x حرکت می کند. با فرض $v_0 = 0$ و $x_0 = 0$ در بازه زمانی صفر تا $2.5/s$. (الف) نمودارهای سرعت - زمان و مکان - زمان این مانسین را رسم کنید. (ب) با توجه به نمودار سرعت - زمان، مشخص کنید در کدام یک از بازه های زمانی، حرکت مانسین تندشونده، کندشونده یا با سرعت ثابت است. (پ) شتاب متوسط مانسین را پیدا کنید. (ت) جابه جایی مانسین را پیدا 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). جسمی 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 :

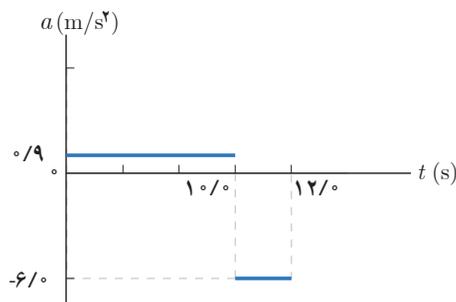
نمودار سرعت - زمان شکل (الف) : خودرویی با سرعت ثابت و در جهت مثبت محور x در حال حرکت است که مانعی را در دوردست می بیند و با شتاب ثابت، تندی خود را کاهش می دهد و سپس با تندی کمتری در همان جهت اولیه، به حرکت خود ادامه می دهد.

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

همان طور که در مثال ۱-۱۲ اشاره شده است (جمله آبی رنگ)، سطح بین نمودار سرعت - زمان و محور زمان در هر بازه زمانی برابر جابه جایی در آن بازه است، دانش آموزان به سادگی می توانند قسمت های الف و ب را پاسخ دهند. دانش آموزان باید توجه کنند که با توجه به نمودار سرعت - زمان، در بازه زمانی صفر تا $۱۲/۰$ 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 جابه جایی آهو برابر است. (الف و ب) به این ترتیب با توجه به سطح زیر نمودار سرعت - زمان مسافت پیموده شده و جابه جایی آهو هر کدام برابر ۸۷ m است. (پ) ابتدا شتاب آهو را در هر یک از بازه های زمانی ۰ تا ۱۰ s و همچنین ۱۰ s تا ۱۲ s به دست می آوریم. اگر این شتاب ها را به ترتیب a_1 و a_2 نام گذاری کنیم، خواهیم داشت:



$$a_1 = \frac{(12/0 - 3/0) \text{ m/s}}{10/0 \text{ s}} = 0.9 \text{ m/s}^2$$

$$a_2 = \frac{(0 - 12/0) \text{ m/s}}{(12/0 - 10/0) \text{ s}} = -6.0 \text{ m/s}^2$$

تمرین ۱-۱۱

الف) ابتدا سرعت متحرک را در هر یک از لحظه های $t = 5/0$ s و $t = 15/0$ s و همچنین $t = 25/0$ s به دست می آوریم. از معادله ۱-۷ دیدیم.

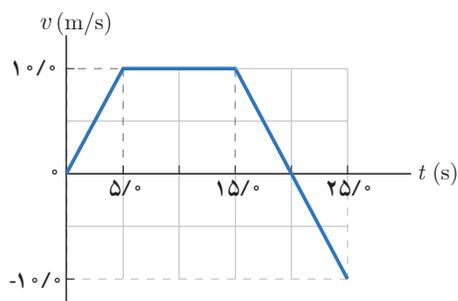
$$v = at + v_0 = (2 \text{ m/s}^2)(5/0 \text{ s}) + 0 = 10/0 \text{ m/s} \quad \text{در لحظه } t = 5/0 \text{ s}$$

چون شتاب ماشین اسباب بازی در بازه زمانی $5/0$ s تا $15/0$ s صفر است، در نتیجه، سرعت ماشین اسباب بازی در لحظه $t = 15/0$ s برابر سرعت آن در لحظه $t = 5/0$ s است:

$$v = at + v_0 = (-2/0 \text{ m/s}^2)(10/0 \text{ s}) + 10/0 \text{ m/s} = -10/0 \text{ m/s} \quad \text{در لحظه } t = 25/0 \text{ s}$$

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

برای رسم نمودار مکان - زمان، مکان متحرک را در هر یک از لحظه های $t = 5/0$ s، $t = 15/0$ s، $t = 20/0$ s و $t = 25/0$ s پیدا می کنیم. از معادله $x = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)\Delta t + x_0$ داریم:



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

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:

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

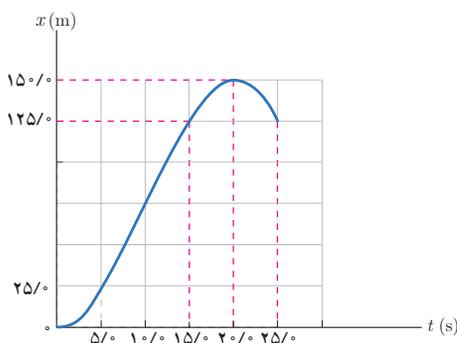
یعنی 5 s پس از لحظه 15 s که متحرک با شتاب منفی به حرکت خود ادامه می‌دهد سرعت آن صفر می‌شود و باید شیب خط مماس بر منحنی مکان - زمان آن نیز صفر شود. به این ترتیب اکنون باید در لحظه $t = (5 + 15) \text{ s} = 20 \text{ s}$ مکان متحرک را پیدا کنیم.

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

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

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

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.

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{(-10 - 0) \text{ m/s}}{(25 - 20) \text{ s}} = -2 \text{ m/s}^2 \quad \text{(ب)}$$

(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

راهبردهای حل مسئله در حرکت با شتاب ثابت قبل از مسئله ۱۴ پایان فصل آمده است. این راهبردها را می‌توانید با دانش آموزان 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؟

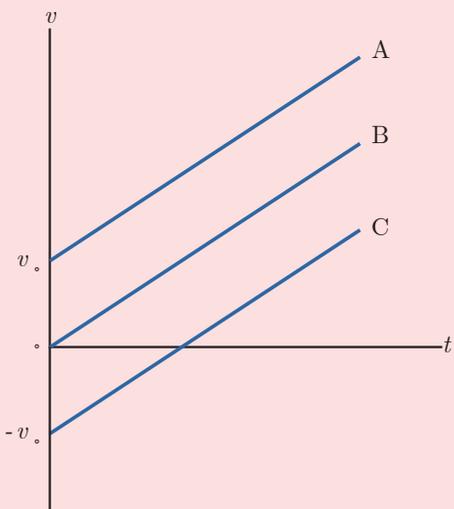
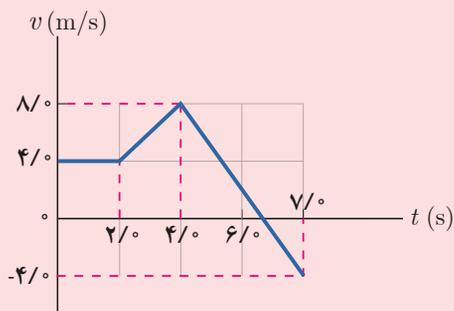
- الف) ۸ ب) ۱۰ پ) ۱۲ ت) ۱۴

۲ دو متحرک به طور 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 معادلهٔ 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.

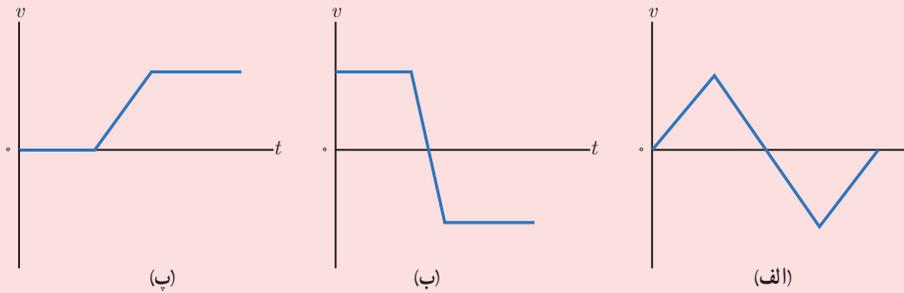
۷ مارهای زنگی قادرند هنگام شکار، سر خود را با شتاب 50 m/s^2 به حرکت درآورند. اگر خودرویی می توانست این شتاب را بگیرد، چقدر طول می کشید تا با حرکت بر خط راست، از حال سکون به سرعت 108 km/h برسد؟
 ۸ قطاری با سرعت 96 km/h و در امتداد محور x حرکت می کند. چند ثانیه باید با شتاب 2 m/s^2 ترمز کند تا به سرعت 24 km/h برسد؟

الف) ۵ (ب) ۱۰ (ب) ۱۵ (ب) ۲۰ (ت)

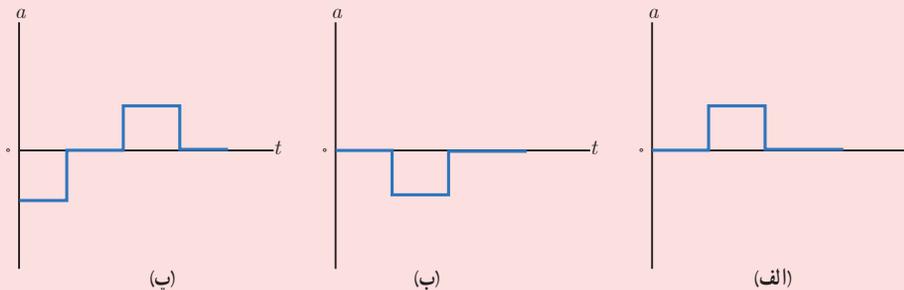
۹ سرعت متوسط خودرویی که از حال سکون با شتاب $1/6 \text{ m/s}^2$ در امتداد محور x به حرکت درمی آید در ۵ ثانیهٔ اول حرکت چند m/s است؟

الف) ۴ (ب) ۸ (ب) ۶ (ب) ۱۰ (ت)

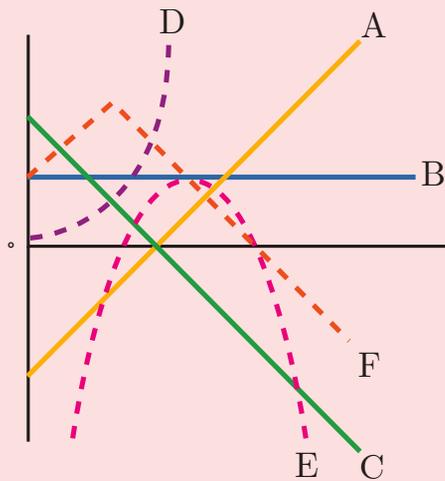
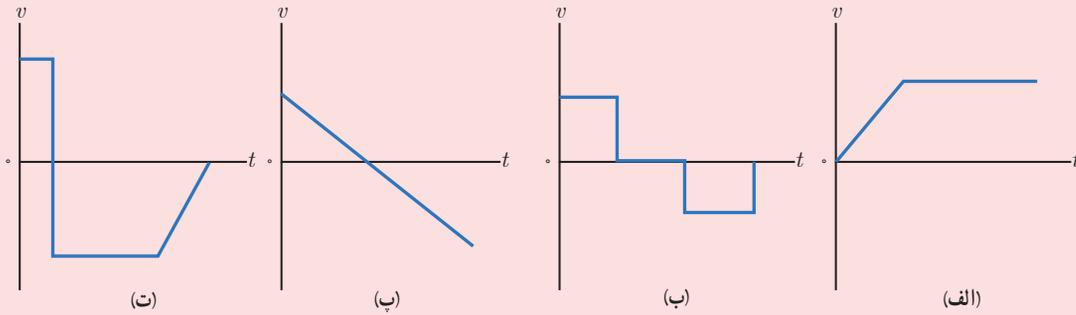
۱۰ در شکل زیر سه نمودار سرعت - زمان سه متحرک که در امتداد محور x در حرکت اند رسم شده است. برای هر نمودار: الف) نمودار شتاب - زمان نظیر آن را رسم کنید. ب) شرح کوتاهی برای نوع حرکت هر یک بنویسید.



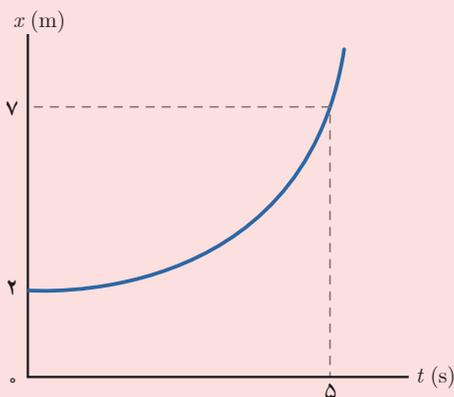
۱۱ در شکل زیر سه نمودار شتاب - زمان رسم شده است. برای هر کدام، الف) نمودار سرعت - زمان نظیر آن را رسم کنید. فرض کنید حرکت جسم در امتداد محور x و $v_0 = 0$ است. ب) شرح کوتاهی برای نوع حرکت هر یک بنویسید.



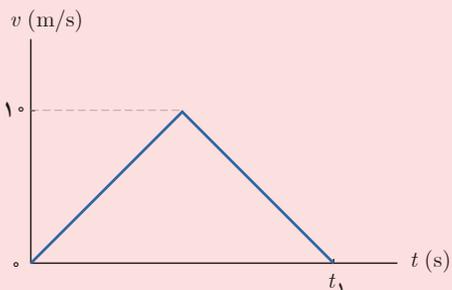
۱۲ در شکل زیر چهار نمودار سرعت - زمان رسم شده است. برای هر نمودار الف) نمودار شتاب - زمان نظیر آن را رسم کنید. ب) شرح کوتاهی برای نوع حرکت هر یک بنویسید. فرض کنید حرکت جسم در امتداد محور x و $x_0 = 0$ است.



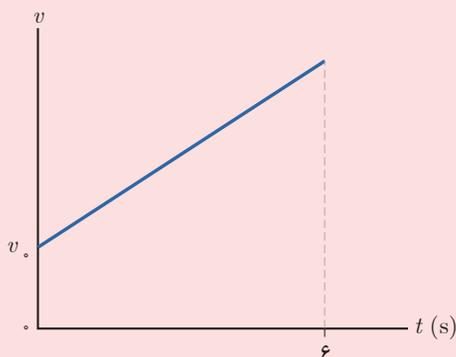
۱۳ شکل روبه‌رو چند نمودار را با محورهای بدون علامت نشان می‌دهد. الف) کدام نمودار سرعت بر حسب زمان را برای جسمی که با سرعت ثابت و در امتداد محور x در حرکت است بهتر نشان می‌دهد. ب) کدام نمودار مکان بر حسب زمان را برای جسمی که با شتاب منفی ثابت و در امتداد محور x در حرکت است بهتر نشان می‌دهد؟ پ) اگر نمودار E مکان بر حسب زمان را نشان دهد، کدام نمودار سرعت بر حسب زمان آن را بهتر نشان می‌دهد؟



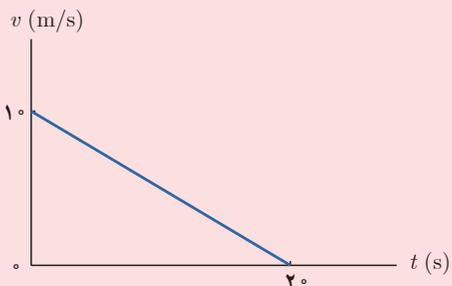
۱۴ نمودار مکان - زمان متحرکی که از حال سکون با شتاب ثابت بر خط راست به حرکت درمی‌آید مطابق شکل روبه‌رو است: الف) سرعت متحرک را در لحظه $t = 5$ s چقدر است؟ ب) نمودار سرعت - زمان این متحرک را رسم کنید.



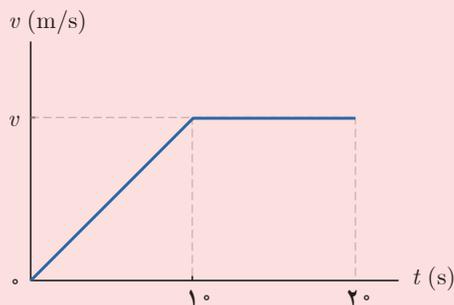
۱۵ نمودار سرعت - زمان متحرکی که بر خط راست حرکت می کند مطابق شکل روبه‌رو است : اگر مسافت پیموده شده توسط متحرک تا لحظه t_1 برابر ۵۵m باشد، t_1 چقدر است؟



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 می کند مطابق شکل روبه‌رو است : اگر سرعت متوسط متحرک در مدت ۲۰ ثانیه برابر ۱۸m/s باشد، v چقدر است؟

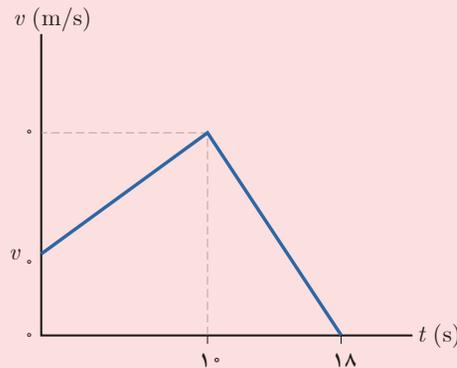
۱۹ سرعت متحرکی در یک مسیر مستقیم در مکان $x_1 = 4\text{m}$ برابر ۸m/s است. اگر شتاب حرکت $\frac{9}{4}\text{m/s}^2$ باشد، در چه مکانی سرعت متحرک برابر ۱۰m/s است؟

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؟

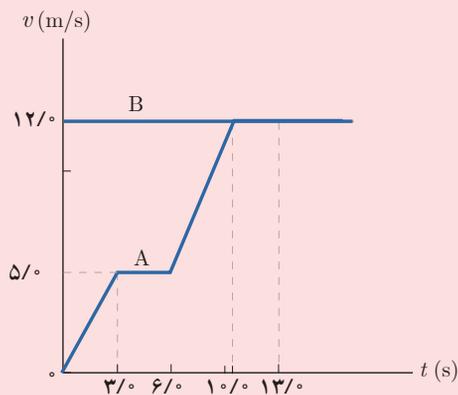
۲۱ معادله مکان-زمان متحرکی در SI به صورت $x = -t^2 + 4t + 2$ است. حرکت آن از مبدأ زمان تا لحظه $t = 8 \text{ s}$ چگونه است؟
 الف) همواره کندشونده (ب) همواره تندشونده (پ) ابتدا کندشونده و سپس تندشونده (ت) ابتدا تندشونده و سپس کندشونده
 ۲۲ جسمی با سرعت اولیه 4 m/s و شتاب ثابت 1 m/s^2 از مکان $x_0 = -8 \text{ m}$ در امتداد محور x به حرکت درمی آید. این متحرک پس از 1 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 5 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.

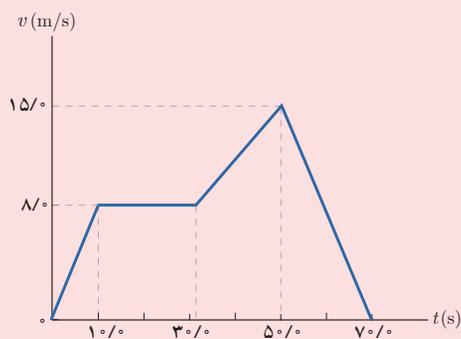
۲۴ شکل زیر نمودار $v-t$ متحرکی را در مسیری مستقیم نشان می دهد. اگر سرعت متوسط متحرک در مدت 18 ثانیه برابر $\frac{20}{3} \text{ m/s}$ باشد، v_0 چقدر است؟



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 1 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 $t = 20$ s چقدر است؟

پ) 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. به‌طور کلی سقوط آزاد و معادله‌های آن را، برای حرکت هر جسمی که روبه بالا یا روبه پایین به‌طور آزادانه و صرفاً تحت تأثیر گرانش زمین در حرکت است می‌توان در نظر گرفت. همان‌طور که اشاره شد آموزش و ارزشیابی این کتاب برای حالت خاصی از سقوط آزاد است و حالت‌های دیگر جزء 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 گرفته‌ایم.

فیزیک ۳

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 توپ به افزایش بین تصویرها نشان می‌دهد که سرعت توپ به‌طور پیوسته در حال افزایش است؛ یعنی توپ به طرف پایین شتاب می‌گیرد.

حرکت سقوط آزاد، افزون بر رها کردن جسم، شامل تریاب کردن جسم رو به پایین یا رو به بالا نیز می‌شود. در هر 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.

شکل ۱۶-۱ تصویری از یک توپ در حال سقوط آزاد که در بازه‌های زمانی مساوی و متوالی رسم شده است.

شکل ۱۶-۱ تجربه‌ای ساده برای مقایسه اثر مقاومت هوا روی حرکت سقوط آزاد توپ. برکه کافه و برکه کافه بیجا شده

سقوط آزاد بدون سرعت اولیه: با توجه به اینکه در این کتاب تنها سقوط آزاد بدون سرعت اولیه بررسی می‌شود، معادله‌های مورد استفاده برای حل مسئله‌های این حرکت، با فرض اینکه جهت رو به بالا را مثبت بگیریم، با قرار دادن $v_0 = 0$ ، $y_0 = 0$ و $t_0 = 0$ به جای y و t در معادله‌های حرکت با شتاب ثابت بر مسیر مستقیم به‌دست می‌آید. به این ترتیب معادله‌های سقوط آزاد بدون سرعت اولیه به‌صورت زیر است:

$$v = -gt \quad (16-1)$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \quad (16-2)$$

$$v^2 = -2g(y - y_0) \quad (16-3)$$

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

مثال ۱۵-۱

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که از بالای دیواری بلند، گلوله‌ای را رها می‌کند. (الف) پس از $1/8$ ثانیه چه مسافتی را طی می‌کند و سرعت آن به چقدر می‌رسد؟ (ب) اگر ارتفاع دیوار $1/4$ متر 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 (۱۶-۳) داریم:

$$v^2 = -2g(y - y_0) \Rightarrow v^2 = -2(9.8 \text{ m/s}^2)(0 - 1/4) \Rightarrow v = \pm 2.2 \text{ m/s}$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow 1/4 = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)t^2 + 0 \Rightarrow t = \pm 0.22 \text{ s}$$

مثال ۱۶-۱

شکل ۱۶-۱ حرکت بر شتاب راست

جاه‌جایی گلوله در این مدت $\Delta y = y - y_0 = -4/9 \text{ m}$ و مسافت طی شده $4/9 \text{ m}$ است. همچنین با استفاده از معادله (۱۶-۱) سرعت گلوله پس از $1/3$ برابر است با:

$$v = -gt = -(9.8 \text{ m/s}^2)(1/3) = -3.27 \text{ m/s}$$

حرکت سقوط آزاد، حرکتی با شتاب ثابت $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ است، لذا با توجه به مفهوم شتاب، تندی گلوله در هر ثانیه 9.8 m/s افزایش می‌یابد. به‌طوری 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:

$$v^2 = -2g(y - y_0) = -2(9.8 \text{ m/s}^2)(-1/4) \Rightarrow v = \pm 2.2 \text{ m/s}$$

چون جهت بالا را مثبت فرض کردیم، علامت منفی برای سرعت برخورد گلوله با سطح زمین قابل قبول است، یعنی $v = -2.2 \text{ m/s}$

به دو روش می‌توان زمان کل را به‌دست آورد. از معادله‌های (۱۶-۱) و (۱۶-۳) داریم:

$$v = -gt \Rightarrow -1.47 \text{ m/s} = -(9.8 \text{ m/s}^2)t \Rightarrow t = 1/6.7 \text{ s}$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 = -1/4 \text{ m} = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)t^2 \Rightarrow t = \pm 0.22 \text{ s}$$

مثال ۱۶-۱

سنگی از صخره‌ای به ارتفاع $112/5 \text{ m}$ نسبت به سطح زمین آزادانه سقوط می‌کند. (الف) زمان سقوط آزاد سنگ را به‌دست آورید. (ب) سرعت متوسط سنگ را در حین سقوط آزاد پیدا کنید. (ج) جاه‌جایی سنگ را بین دو لحظه $t_1 = 3 \text{ s}$ و $t_2 = 7 \text{ s}$ به‌دست 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:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow -112/5 \text{ m} = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)t^2 + 0 \Rightarrow t = 5 \text{ s}$$

(ب) رابطه (۱۶-۱) برای امتداد قائم می‌توان بصورت $v_{av} = \Delta y / \Delta t$ به نظر گرفت. به این ترتیب داریم:

$$v_{av} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{-112/5 \text{ m}}{5 \text{ s}} = -22.4 \text{ m/s}$$

(ج) ابتدا با استفاده از رابطه (۱۶-۱) جاه‌جایی سنگ را تا هر یک از لحظه‌های $t_1 = 3 \text{ s}$ و $t_2 = 7 \text{ s}$ پیدا می‌کنیم. سپس با کم کردن این دو جاه‌جایی از یکدیگر، جاه‌جایی سنگ بین این دو لحظه به‌دست می‌آید.

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

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow y_2 = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(7^2) + 0 \Rightarrow y_2 = -240.1 \text{ m}$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 = -240.1 \text{ m} - (-44.1 \text{ m}) = -196 \text{ m}$$

تمرین ۱۲-۱

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 بر رسم شده است.

شکل مقابل اسباب انجام آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان شتاب گرانش را در محل آزمایش اندازه گرفت. (نکته: به نظر شما این وسیله آزمایش چگونه کار می‌کند؟) (ب) در یک آزمایش نوعی، داده‌های زیر به دست آمده است: $t = 2.3 \text{ s}$ و $h = 27 \text{ m}$ یا توجه به این داده‌ها، اندازه شتاب گرانش در محل آزمایش چقدر به دست می‌آید؟ (نکته: 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 27 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.

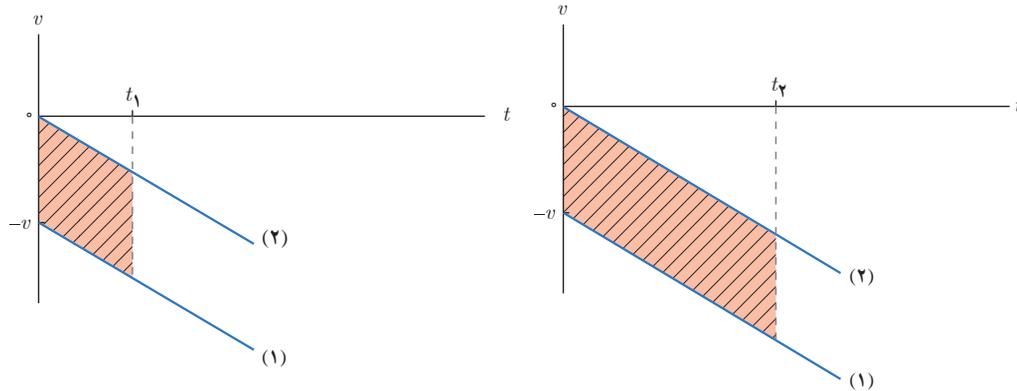
تمرین ۱-۱۲ الف) لحظه قطع جریان در آهنربای الکتریکی و رها شدن گلوله، تا لحظه برخورد آن به حسگر، توسط زمان‌سنج حساس اندازه‌گیری می‌شود. با خواندن t از روی زمان‌سنج و اندازه‌گیری h ، به سادگی می‌توان g را در محل انجام آزمایش اندازه‌گیری کرد.

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

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow -27 \text{ m} = \frac{1}{2}g(2.3 \text{ s})^2 + 0 \Rightarrow g = 10.2 \text{ m/s}^2$$

تمرین ۱-۱۳ به چندین روش می‌توان این تمرین را بررسی و پاسخ داد. به کمک شکل ۱-۱۶: هر دو گلوله متوالی در این شکل، نماینده گلوله دوم و اول هستند که در بی 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 8° 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 1° به زمین برسد؟ سرعت گلوله در نیمه راه و همچنین در لحظه برخورد به زمین چقدر است؟
- ۳ سنگی از ارتفاع 5° 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 ساختمانی مقایسه کنید.
- ۴ جسمی را در شرایط خلأ از یک بلندی رها می‌کنیم و پس از مدتی با سرعت 3°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 45m 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 $\frac{h}{4}$ بدون سرعت اولیه رها می‌کنیم. نسبت سرعت گلوله A به سرعت گلوله B در لحظه رسیدن به زمین کدام است؟
 الف) $\frac{2}{3}$ (ب) ۱ (پ) ۲ (ت) $\frac{9}{4}$
- ۸ گلوله کوچکی از ارتفاعی بالای سطح زمین بدون سرعت اولیه رها می‌شود و 8° 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 6° متر را طی کند، ارتفاع ساختمانی چند متر است؟
 ب) سرعت سنگ درست پیش از برخورد به زمین چقدر است؟
- ۱۰ گلوله‌ای از ارتفاع 8° متری بدون سرعت اولیه و در شرایط خلأ از بالای برجی به طرف زمین رها می‌شود. در لحظه‌ای که گلوله به 2° متری سطح زمین می‌رسد، سرعت آن چه کسری از سرعت آن در لحظه رسیدن به زمین است؟

راهنمای پاسخ‌یابی پرسشی‌ها و مسئله‌های فصل ۱

۱-۱ شناخت حرکت

الف

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

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

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.

پرسشی‌ها و مسئله‌های فصل ۱

۱-۱ شناخت حرکت

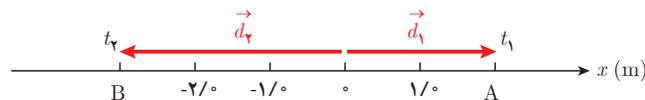
الف) با توجه به داده‌های نقشه شکل زیر،
 الف) تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید.
 ب) مفهوم فیزیکی این دو کمیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟
 ب) در چه صورت تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط می‌توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشد؟

ب) در بازه زمانی ۰ تا ۳ ثانیه جابه‌جایی این سه متحرک را پیدا کنید.
 الف) شکل زیر نمودار سرعت-زمان متحرکی را که در امتداد محور x حرکت می‌کند در مدت ۳ ثانیه نشان می‌دهد.

الف) شتاب در هر یک از مرحله‌های AB، BC و CD چقدر است؟
 ب) شتاب متوسط در بازه زمانی صفر تا ۳ ثانیه چقدر است؟
 ب) جابه‌جایی متحرک را در این بازه زمانی پیدا کنید.
 الف) نمودار سرعت-زمان متحرکی مطابق شکل زیر است.
 الف) نمودار شتاب-زمان این متحرک را رسم کنید.
 ب) اگر $m = -1$ باشد نمودار مکان-زمان متحرک را رسم کنید.

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 محاسب بردار یک‌نویسید.
 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.
 الف) در شکل زیر نمودار سرعت-زمان سه متحرک نشان داده شده است.
 الف) شتاب سه متحرک را به‌طور کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.
 ب) شتاب هر متحرک را به دست آورید.

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.)



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

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

(در SI)

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

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.

$$\Delta x_B = (v_{av})_B \Delta t = (2 \text{ m/s})(1 \text{ s}) = 2 \text{ m}$$

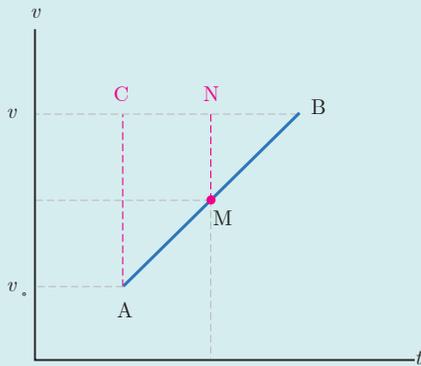
از آنجا که دانش‌آموزان در درس ریاضی پایه یاددهم با پیدا کردن نقطه وسط یک پاره خط آشنا شده‌اند به سادگی می‌توانند برای

متحرک‌های A و C، از رابطه $v_{av} = \frac{v_0 + v}{2}$ استفاده کنند. به این ترتیب داریم :

$$\Delta x_A = (v_{av})_A \Delta t = \left(\frac{0 + 1 \text{ m/s}}{2} \right) (1 \text{ s}) = 0.5 \text{ m}$$

$$\Delta x_C = (v_{av})_C \Delta t = \left(\frac{0 + 2 \text{ m/s}}{2} \right) (1 \text{ s}) = 1 \text{ m}$$

اثبات رابطه ۹-۱



نقطه M وسط پاره خط AB قرار دارد.

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

$$\frac{NM}{AC} = \frac{BM}{BA} = \frac{BM}{2BM} \Rightarrow \frac{NM}{v + v_0} = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow NM = \frac{v + v_0}{2}$$

از طرفی NM برابر میانگین v_0 تا v است.

۴ الف) مشابه مثال ۹-۱ است.

ب) با استفاده از رابطه ۹-۱ داریم :

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{6 \text{ m/s} - 0}{2 \text{ s} - 0} = 3 \text{ m/s}^2$$

پ) مشابه مثال قبل قسمت پ) است.

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 ۵s تا ۱۵s

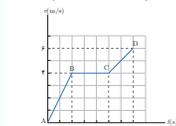
$$a = \frac{(1 - 0) \text{ m/s}}{5 \text{ s}} = 0.2 \text{ m/s}^2$$

دربازه زمانی ۱۵s تا ۲۰s

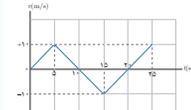
$$a = \frac{(-1 - 1) \text{ m/s}}{5 \text{ s}} = -0.4 \text{ m/s}^2$$

بررسی‌ها و مسئله‌های فصل ۱

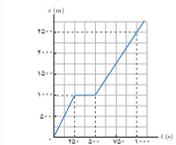
۱-۱ شتاب حرکت
با توجه به داده‌های نقشه شکل زیر،
الف) تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید.
ب) مفهوم فیزیکی این دو کمیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟
ج) در چه صورت تندی متوسط و اندازه سرعت متوسط می‌توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟



۱-۲ شتاب در هر یک از مرحله‌های AB، BC، CD چقدر است؟
ب) شتاب متوسط در بازه زمانی صفر تا ۸ ثانیه چقدر است؟
ج) جاهای متحرک را در این بازه زمانی پیدا کنید.
د) نمودار سرعت - زمان متحرک مطابق شکل زیر است.
الف) نمودار شتاب - زمان این متحرک را رسم کنید.
ب) اگر $m = 1$ ، $\Delta x = 1$ باشد نمودار مکان - زمان متحرک را رسم کنید.



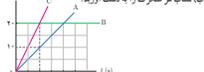
۱-۳ شکل زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دودانه دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.



۱-۴ متحرک مطابق شکل در لحظه ۱ در نقطه A، در لحظه ۲ در نقطه B و در لحظه ۳ در نقطه C قرار دارد.

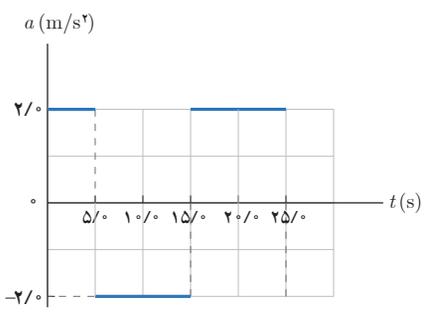
الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌های دوی محور رسم کنید و بحسب بردار بگنجانید.
ب) بردار جاهایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی ۱ تا ۲، ۲ تا ۳، و ۳ تا ۴ بدست آورید.
ج) در شکل زیر نمودار سرعت - زمان سه متحرک نشان داده شده است.

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



دربازه زمانی ۱۵s تا ۲۵s

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



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

دربازه صفر تا ۵s

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

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

دربازه ۱۰s تا ۱۵s

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

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

دربازه ۱۰s تا ۱۵s

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

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

دربازه ۱۵s تا ۲۰s

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

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

دربازه ۲۰s تا ۲۵s

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

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

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

برسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱

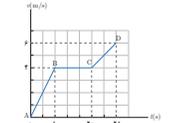
۱-۱- شناخت حرکت
 الف) با توجه به داده‌های نقشه شکل زیر، نمودار سرعت متوسط خودروه را پیدا کنید.
 ب) مفهوم فیزیکی این دو کسب چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟
 ج) در چه صورت تندی متوسط و اعزازة سرعت متوسط می‌توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟

۱-۲- شتاب در حرکت
 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؟
 ج) جابه‌جایی متحرک را در این بازه زمانی پیدا کنید.
 د) نمودار سرعت - زمان متحرک مطابق شکل زیر است.
 الف) نمودار شتاب - زمان این متحرک را رسم کنید.
 ب) اگر $x = -1^{\circ}m$ باشد نمودار مکان - زمان متحرک را رسم کنید.

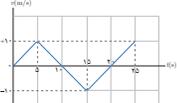
۱-۳- شتاب در حرکت
 الف) متحرک مطابق شکل در لحظه t_1 در نقطه A، در لحظه t_2 در نقطه B و در لحظه t_3 در نقطه C قرار دارد.
 الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور رسم کنید و بررسی بردار بکنید.
 ب) بردار جابه‌جایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی t_1 تا t_2 ، t_2 تا t_3 و t_1 تا t_3 به دست آورید.
 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.

برش‌ها و مسئله‌های فصل ۱

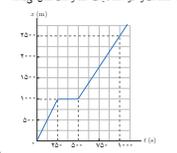
۱-۱. **مشاهده حرکت**
 الف) با توجه به داده‌های نقشه شکل زیر، (الف) تندی متوسط و اعزاز سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید. (ب) مفهوم فیزیکی این دو کسب چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟ (ب) در چه صورت تندی متوسط و اعزاز سرعت متوسط می‌توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟



۱-۲. **مشتری مطابق شکل در لحظه t_1 در نقطه A، در لحظه t_2 در نقطه B و در لحظه t_3 قرار دارد.**
 الف) برای راه‌های مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور رسم کنید و محاسبه برآورد کنید. (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. (ج) در شکل زیر نمودار سرعت - زمان سه متحرک نشان داده شده است. (الف) نشان دهید کدام یک از متحرک‌ها با یکدیگر مقابله کنید. (ب) نشان دهید هر متحرک را به دست آورید.



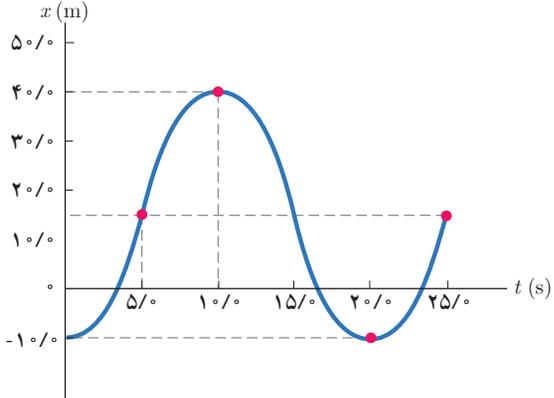
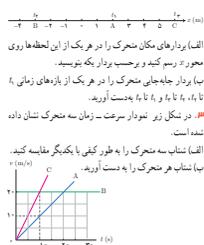
۱-۳. **نشان زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوره دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.**



۱-۴. **نشان زیر نمودار سرعت - زمان متحرکی را که در امتداد محور حرکت می‌کند در مدت ۲۸ ثانیه نشان می‌دهد.**



۱-۵. **نشان زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوره دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.**



- ۶ الف) در بازه‌ای که شیب نمودار سرعت - زمان بیشتر است؛ یعنی بازه صفر تا ۲۵ s.
 ب) در بازه‌ای که شیب نمودار سرعت - زمان صفر است؛ یعنی بازه ۲۵ s تا ۵۰ s.
 پ) مشابه مثال ۱-۵
 ت) مشابه مثال ۱-۵

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

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

۹ برای آنکه سرعت اولیه متحرک در جهت محور x باشد، دانش‌آموزان باید به زاویه‌ای که خط مماس بر منحنی مکان - زمان در لحظه $t=0$ با محور زمان می‌سازد 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 در خصوص شکل ۱-۱۴ داده شد، باید گودی یا تقعر منحنی روبه پایین باشد (مانند شکل الف). البته دانش‌آموزان می‌توانند به چگونگی تغییرات سرعت متحرک در بازه زمانی مورد نظر نیز توجه کنند.

۱-۱. **مشاهده حرکت**
 الف) با توجه به داده‌های نقشه شکل زیر، (الف) تندی متوسط و اعزاز سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید. (ب) مفهوم فیزیکی این دو کسب چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟ (ب) در چه صورت تندی متوسط و اعزاز سرعت متوسط می‌توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشند؟

۱-۲. **مشتری مطابق شکل در لحظه t_1 در نقطه A، در لحظه t_2 در نقطه B و در لحظه t_3 قرار دارد.**
 الف) برای راه‌های مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور رسم کنید و محاسبه برآورد کنید. (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. (ج) در شکل زیر نمودار سرعت - زمان سه متحرک نشان داده شده است. (الف) نشان دهید کدام یک از متحرک‌ها با یکدیگر مقابله کنید. (ب) نشان دهید هر متحرک را به دست آورید.

۱-۳. **نشان زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوره دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.**

۱-۴. **نشان زیر نمودار سرعت - زمان متحرکی را که در امتداد محور حرکت می‌کند در مدت ۲۸ ثانیه نشان می‌دهد.**

۱-۵. **نشان زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوره دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.**

۱-۶. **نشان زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوره دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.**

۱-۷. **نشان زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوره دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.**

۱-۸. **نشان زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوره دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.**

۱-۹. **نشان زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوره دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.**

۱-۱۰. **نشان زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوره دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.**

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 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.

۳۱. الف) در کدام بازه زمانی دوطرفه سرعت بر دوطرفه است؟
 ب) در کدام بازه زمانی، دوطرفه ایستاده است؟
 ج) با سرعت دوطرفه را در بازه زمانی $0 \leq t \leq 15$ حساب کنید.
 د) با سرعت دوطرفه را در بازه زمانی $0 \leq t \leq 50$ حساب کنید.
 ه) با سرعت متوسط دوطرفه را در بازه زمانی $0 \leq t \leq 100$ حساب کنید.
 ۲. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان-زمان شکل زیر می‌تواند نشان‌دهنده نمودار $x = x(t)$ یک متحرک باشد.

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

۳۳. الف) در چه لحظه‌هایی دو خودرو از کنار یکدیگر می‌گذرند؟
 ب) در چه لحظه‌ای تندی دو خودرو تقریباً یکسان است؟
 ج) با سرعت متوسط دو خودرو را در بازه زمانی t_1 تا t_2 مقایسه کنید.
 د) یک از شتاب‌های زیر مکان یک خودرو را در لحظه‌های $t = 0, T, 2T, 3T, 4T, 5T$ حساب کنید. هر دو خودرو در لحظه $t = 3T$ شتاب می‌گیرند. توضیح دهید.

۳۴. الف) سرعت اولیه کدام خودرو بیشتر است.
 ب) سرعت نهایی کدام خودرو بیشتر است.
 ج) کدام خودرو شتاب بیشتری دارد.

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

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

$$v_{rA} + v_{lA} < v_{rB} + v_{lB}$$

۳۵. الف) معادله حرکت جسمی در SI بصورت $x = 4t^2 - 2t + 1$ است. الف) مکان متحرک را در $t = 0$ و $t = 2$ بدست آورید. ب) با سرعت متوسط جسم را در بازه زمانی صفر تا t_1 پایه پیدا کنید. ج) نمودار سرعت-زمان شکل زیر نشان داده شده است. همین‌گونه در کدام بازه‌های زمانی و در کدام جهت محور x در کدام بازه‌های زمانی در خلاف جهت محور x است.

۳۶. الف) مکان متحرک را در $t = 0$ و $t = 2$ بدست آورید. ب) با سرعت متوسط جسم را در بازه زمانی صفر تا t_1 پایه پیدا کنید. ج) نمودار سرعت-زمان شکل زیر نشان داده شده است. همین‌گونه در کدام بازه‌های زمانی و در کدام جهت محور x در کدام بازه‌های زمانی در خلاف جهت محور x است.

۳۷. الف) جاه‌جایی و مسافت طی‌شده توسط متحرک در کل زمان حرکت چقدر است؟
 ب) با سرعت متوسط متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $0 \leq t \leq 10$ ، $10 \leq t \leq 20$ ، $20 \leq t \leq 30$ ، $30 \leq t \leq 40$ ، $40 \leq t \leq 50$ حساب کنید. زمان حرکت بدست آورید.
 ج) با معادله حرکت متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $0 \leq t \leq 10$ ، $10 \leq t \leq 20$ ، $20 \leq t \leq 30$ ، $30 \leq t \leq 40$ ، $40 \leq t \leq 50$ حساب کنید. متحرک را در کدام جهت محور x در حرکت می‌دهد؟

۳۸. الف) جاه‌جایی و مسافت طی‌شده توسط متحرک در کل زمان حرکت چقدر است؟
 ب) با سرعت متوسط متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $0 \leq t \leq 10$ ، $10 \leq t \leq 20$ ، $20 \leq t \leq 30$ ، $30 \leq t \leq 40$ ، $40 \leq t \leq 50$ حساب کنید. زمان حرکت بدست آورید.
 ج) با معادله حرکت متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی $0 \leq t \leq 10$ ، $10 \leq t \leq 20$ ، $20 \leq t \leq 30$ ، $30 \leq t \leq 40$ ، $40 \leq t \leq 50$ حساب کنید. متحرک را در کدام جهت محور x در حرکت می‌دهد؟

۱۲ الف) با جای‌گذاری لحظه‌های داده شده در معادله مکان-زمان، به سادگی مکان متحرک $x = 4m$ 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.

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:

$$x_1 = vt_1 + x_0 \Rightarrow 6/0 \text{ m} = v(5/0 \text{ s}) + x_0$$

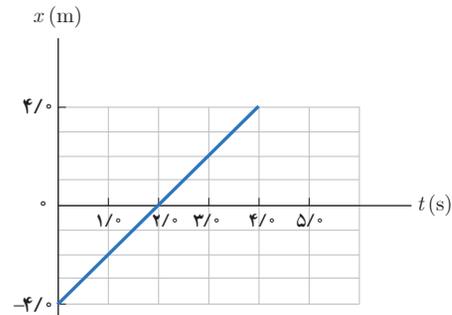
$$x_2 = vt_2 + x_0 \Rightarrow 36/0 \text{ m} = v(2/0 \text{ s}) + x_0$$

با حل دو معادله بالا داریم:

$$x_0 = -4/0 \text{ m}, \quad v = 2/0 \text{ m/s}$$

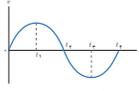
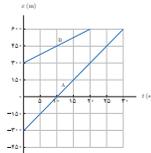
$$\Rightarrow x = 2t - 4$$

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



شکل ۱-۱: حرکت با سرعت ثابت

۱۱. معادله حرکت جسمی در SI به صورت $x = 4t^2 + 2t + 1$ است. (الف) مکان متحرک را در $t = 0$ و $t = 2$ s بدست آورید. (ب) سرعت متوسط جسم را در بازه زمانی صفر تا ۲ ثانیه پیدا کنید. **۱۲.** نمودار سرعت-زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. همین کتب در کدام بازه های زمانی بردار شتاب در جهت منفی و در کدام بازه های زمانی در خلاف جهت محور x است.



شکل ۲-۱: حرکت با سرعت ثابت

۱۳. جسمی با سرعت ثابت بر مسیری مستقیم در حرکت است. اگر جسم در لحظه $t_1 = 5$ s در مکان $x_1 = 20$ m و در لحظه $t_2 = 10$ s در مکان $x_2 = 30$ m باشد.

(الف) معادله مکان-زمان جسم را بنویسید.

(ب) نمودار مکان-زمان جسم را رسم کنید.

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



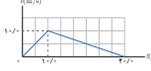
۱۷. داشتن محل قرارگیری یک ماهواره در ماهواره های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت های کارشناسان فضایی است. چنین منظور ژئوهای الکترومغناطیسی را که با سرعت نور در فضا حرکت می کنند، به طرف ماهواره مورد نظر می فرستند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می شود. اگر زمان رفت و برگشت یک پب ۰.۲۴ ثانیه باشد، فاصله ماهواره از ایستگاه زمینی تقریباً چقدر است؟

شکل ۳-۱: حرکت با شتاب ثابت

۱۸. نمودار $a-t$ متحرکی که در امتداد محور x حرکت می کند

مطابق شکل زیر است. سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی

$0 \leq t \leq 5$ تا $0 \leq t \leq 10$ چند برابر سرعت متوسط آن در بازه زمانی $0 \leq t \leq 5$ است؟



$$\Delta x_1 = 1/0 \text{ m} - 5/0 \text{ m} = 5/0 \text{ m}$$

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

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

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

به جای این کار می توانستیم به طور ساده، مکان متحرک را در لحظه $t = 1/0 \text{ s}$ از مکان متحرک در شروع حرکت ($t = 0$) کم کنیم در این صورت

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

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

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

(ب) از رابطه ۲-۱ استفاده شود. برای مثال در بازه $0 \leq t \leq 1/0 \text{ s}$ داریم:

$$v_{av} = \frac{-1/0 \text{ m}}{1/0 \text{ s} - 0 \text{ s}} = -5 \text{ m/s}$$

۱۵ (الف) در بازه صفر تا $4/0 \text{ s}$

در بازه $4/0 \text{ s}$ تا $8/0 \text{ s}$

در بازه $8/0 \text{ s}$ تا $10/0 \text{ s}$

به این ترتیب جابه جایی کل برابر است با

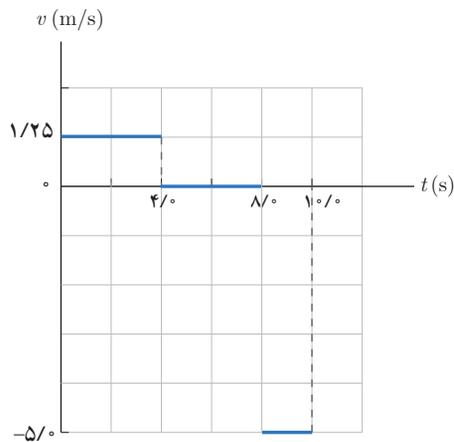
پ) مشابه قسمت الف تمرین ۱۴ است. برای مثال در بازه صفر تا ۴/s داریم :

$$10^\circ/m = v(4/s) + 5^\circ/m \Rightarrow v = 1/2 m/s$$

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

$$\begin{cases} x = 1/25t + 5 \\ x = 10 \\ x = -5t + 10 \end{cases}$$

ت)



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

$$x_A = 3t - 300$$

$$x_B = 15t + 300$$

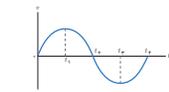
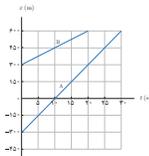
ب) با توجه به شرط $x_A = x_B$ ، زمان هم رسی در متحرک را به سادگی می توان به دست آورد ($t = 4s$). با قراردادن زمان هم رسی در یکی از معادله های حرکت، مکان هم رسی به دست می آید ($x = 900 m$).

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

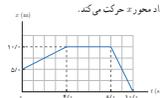
$$\Delta x = v \Delta t = (3 \times 10^8 m/s)(1/2 s) = 3/6 \times 10^8 m$$

فصل ۱ حرکت یک بعدی

۱۱. معادله حرکت جسی در SI به صورت $x = 4 - 2t + t^2$ است. الف) مکان متحرک را در $t = 8$ و $t = 4$ به دست آورید. ب) سرعت متوسط جسو را در بازه زمانی صفر تا ۲ ثانیه پیدا کنید. ۱۲. نمودار سرعت - زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. همین کنید در کدام بازه های زمانی بردار شتاب در جهت محور x در کدام بازه های زمانی در خلاف جهت محور x است.

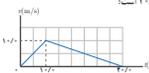


۱۳. حرکت با سرعت ثابت الف) جسی با سرعت ثابت و مسیری مستقیم در حرکت است. اگر جسم در لحظه $t = 0$ در مکان $x = 300 m$ و در لحظه $t = 10 s$ در مکان $x = 360 m$ باشد. الف) معادله مکان - زمان جسم را رسم کنید. ب) نمودار مکان - زمان جسم را رسم کنید. ۱۴. شکل زیر نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می دهد که در امتداد محور x حرکت می کند.



۱۵. دانشن 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. بین منظور شب های الکترومغناطیسی را که با سرعت نور 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 پیک ۰.۲۴ ثانیه باشد، فاصله ماهواره از ایستگاه زمینی، تقریباً چقدر است؟

۱۶. حرکت با شتاب ثابت الف) نمودار ۱-۳ متحرکی که در امتداد محور x حرکت می کند مطابق شکل زیر است. سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی ۰ تا ۵ s و ۵ تا ۱۰ s چند برابر سرعت متوسط آن در بازه زمانی ۰ تا ۱۰ s است؟



۱-۳- 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, v_0, a, 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 ۱-۸ تا ۱-۱۱ 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 و ارسای کنید که آیا منطقی‌اند یا خیر. آیا آنها در گستره کلی مقدارهایی 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 ۱-۹ داریم.

در بازه صفر تا $10/s$

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

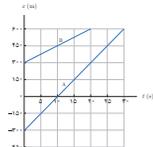
در بازه $10/s$ تا $40/s$

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

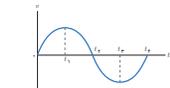
به این ترتیب نسبت سرعت متوسط متحرک در بازه‌های داده شده برابر ۱ است.

شکل ۱-۱ حرکت یکنواخت

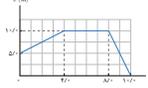
۱۷ معادله حرکت جسی در $t=0$ بصورت $x = 2t^2 + 4t - 3$ است. الف) مکان متحرک را در $t = 0, 1, 2, 3, 4$ s بدست آورید. ب) سرعت متوسط جسی را در بازه زمانی صفر تا ۴ ثانیه پیدا کنید. ج) نمودار سرعت-زمان متحرک در شکل زیر نشان داده شده است. تعیین کنید در کدام بازه‌های زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه‌های زمانی در خلاف جهت محور x است.



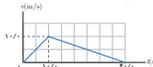
۱۸ داشتن محل قرارگیری یک ماهواره در موقعیت‌های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش‌بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت‌های کارشناسان فضایی است. بین منظور تپه‌های الکتریکی را که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند، به طرف ماهواره نمودن می‌فرستند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می‌شود. اگر زمان رفت و برگشت یک تپه 0.124 ثانیه باشد، فاصله ماهواره از ایستگاه زمینی تقریباً چقدر است؟



۱۹ حرکت با شتاب ثابت
جسی با سرعت ثابت و مسیری مستقیم در حرکت است. اگر جسی در لحظه $t = 0$ در مکان $x_0 = 20$ m و در لحظه $t = 2$ s در مکان $x = 34$ m باشد، الف) معادله مکان-زمان جسی را بنویسید. ب) نمودار مکان-زمان جسی را رسم کنید. ج) شکل زیر نمودار مکان-زمان متحرک را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند.



۲۰ حرکت با شتاب ثابت
الف) نمودار $a-t$ متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل زیر است. سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی $0 \leq t \leq 2$ s و $2 \leq t \leq 4$ s را تعیین کنید. ب) در هر یک از بازه‌های زمانی $0 \leq t \leq 2$ s و $2 \leq t \leq 4$ s و همچنین در کل زمان حرکت بدست آورید.



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

۱۹ الف) از رابطه ۴-۱ داریم :

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

ب) با توجه به اینکه در $t=1/0s$ شیب خط مماس بر منحنی صفر است، لذا سرعت متحرک در این لحظه برابر صفر است. در نتیجه داریم :

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

از طرفی در همین لحظه داریم $x = -2/0m$ و $t = 1/0s$. با جای گذاری در معادله مکان زمان داریم (در SI) :

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

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

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

پ) از رابطه ۴-۴ $v = 4t - 4$ ، داریم (در SI) :

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

ت)

۳۸

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

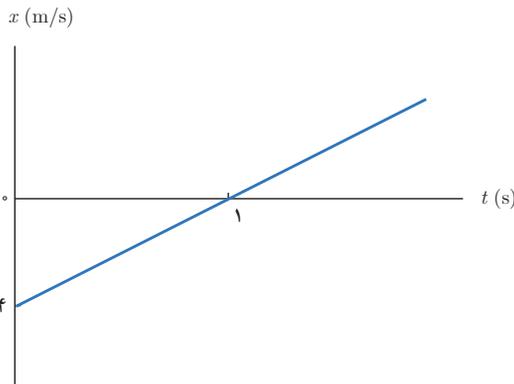
الف) شتاب متوسط متحرک در بازه زمانی صفر تا ۳/۰ ثانیه، چند متر بر ثانیه است؟
 ب) معادله مکان - زمان متحرک را بنویسید.
 ج) سرعت متحرک را در لحظه $t=3/0s$ پیدا کنید.
 د) نمودار سرعت - زمان متحرک را رسم کنید.

۲۰ الف) متحرکی در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت است. در مکان $x=+1m$ سرعت متحرک $v=+2m/s$ و در مکان $x=+9m$ سرعت متحرک $v=+4m/s$ است.
 الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟
 ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از $+2m/s$ به سرعت $+4m/s$ می رسد؟
 ج) خودروی 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 $4km/h$ 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.
 ج) نمودار سرعت - زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.
 د) شکل نشان داده نمودار سرعت - زمان خودروی را

۲۱ الف) نشان می دهد که روی سری مستقیم حرکت می کند. در امتداد محور x با شتاب ثابت در حرکت است.

الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه های $t=0s$ ، $t=1s$ و $t=2s$ تا $t=5s$ به دست آورید.
 ب) شتاب متوسط در بازه زمانی $t=0s$ تا $t=4s$ را به دست آورید.
 ج) در هر یک از بازه های زمانی $t=0s$ تا $t=1s$ ، $t=1s$ تا $t=2s$ ، $t=2s$ تا $t=3s$ ، $t=3s$ تا $t=4s$ و $t=4s$ تا $t=5s$ خودروی چاه جا شده است؟
 د) شتاب متوسط خودرو در بازه های $t=0s$ تا $t=1s$ و $t=1s$ تا $t=5s$ را به دست آورید.

۲۲ الف) حرکت معلوم آزاد
 گلوله ای را بلافاصله از بالای برج که ارتفاع آن $20m$ است به زمین برسد؟ سرعت گلوله در نیمه راه و همچنین در لحظه برخورد به زمین چقدر است؟ مقارنت هوا را نادیده بگیرید.
 ب) الف) گلوله A را در شرایط خلا از ارتفاع $40m$ بدون سرعت اولیه رها می کنیم. سه ثانیه بعد گلوله B را از ارتفاع $80m$ بدون سرعت اولیه رها می کنیم. نسبت سرعت گلوله A به سرعت گلوله B در لحظه رسیدن به زمین چقدر است؟
 ج) اگر دو گلوله همزمان به زمین برسند، مدت زمان سقوط هر گلوله و ارتفاع آن را پیدا کنید.
 د) سنگی از بالای ساختمانی بدون سرعت اولیه و در شرایط خلا به طرف زمین رها می شود.
 الف) اگر سنگ در 2 ثانیه آخر حرکت خود $60m$ طی کند، ارتفاع ساختمان چقدر متر است؟
 ب) سرعت سنگ درست پیش از برخورد به زمین چقدر است؟



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 $4s$ 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) :

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

$$x_2 = vt + x_0 = 1 \cdot t$$

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

$$x_1 = x_2 \Rightarrow t = 1 \cdot 0s$$

زمان هم رسی

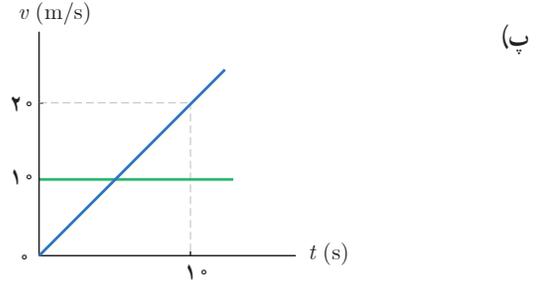
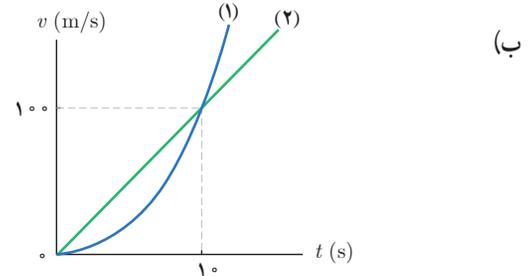
مکان هم‌رسی $x_p = 10 \times 10 = 100 \text{ m}$

۲۱. نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند. در امتداد محور x با شتاب ثابت در حرکت است.

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

۲۳. نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند. در امتداد محور x با شتاب ثابت در حرکت است.

۲۴. نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند. در امتداد محور x با شتاب ثابت در حرکت است.



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

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

(ب)

$$a_{av} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(15-5)\text{m/s}}{10\text{s}} = 1\text{m/s}^2$$

(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

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

در بازه 10s تا 11s $\Delta x = 135\text{m}$

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

۱-۴ حرکت سقوط آزاد

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

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 :

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

۳۲. نشان می دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می کند.

۳۳. شتاب متوسط خورده را در هر یک از لحظه های $t=0s$ ، $t=1s$ و $t=2s$ به دست آورید.

۳۴. شتاب متوسط در بازه زمانی $t=0s$ تا $t=2s$ را به دست آورید.

۳۵. در هر یک از بازه های زمانی $t=0s$ تا $t=1s$ و $t=1s$ تا $t=2s$ شتاب متوسط خورده را به دست آورید.

۳۶. شتاب متوسط خورده در بازه های $t=0s$ تا $t=1s$ و $t=1s$ تا $t=2s$ را به دست آورید.

۳۷. شتاب متوسط خورده در بازه زمانی صفر تا $3s$ باشد.

۳۸. چقدر متر می تانه است؟

۳۹. با معادله مکان - زمان متحرک را بنویسید.

۴۰. با سرعت متحرک را در لحظه $t=3s$ پیدا کنید.

۴۱. با نمودار سرعت - زمان متحرک را رسم کنید.

۴۲. متحرکی در امتداد محور y و با شتاب ثابت در حرکت است. در مکان $+1 \text{ m}$ با سرعت متحرک $+2 \text{ m/s}$ و در مکان $+19 \text{ m}$ با سرعت متحرک $+1 \text{ km/h}$ است.

۴۳. شتاب حرکت آن چقدر است؟

۴۴. با پس از چه مدتی سرعت متحرک از $+2 \text{ m/s}$ به سرعت $+1 \text{ km/h}$ می رسد؟

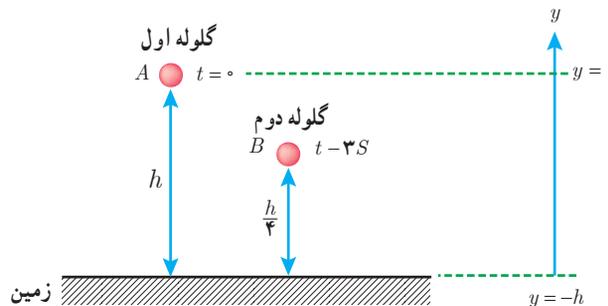
۴۵. خودرویی پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب 1 m/s^2 شروع به حرکت می کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت 3 km/h از آن سبقت می گیرد.

۴۶. 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.

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

۴۷. شکل نشان داده نمودار سرعت - زمان خودرویی را



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

از رابطه ۱-۴ داریم :

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

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

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

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

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

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

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

الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t=3s$ ، $t=4s$ و $t=6s$ به دست آورید.
 ب) شتاب متوسط در بازه زمانی $t=0s$ تا $t=3s$ را به دست آورید.
 ج) در هر یک از بازه‌های زمانی $t=0s$ تا $t=3s$ و $t=3s$ تا $t=6s$ شتاب متوسط خودرو در بازه‌های $t=0s$ تا $t=3s$ و $t=3s$ تا $t=6s$ را به دست آورید.

شکل نشان می‌دهد که روی سری مستقیم حرکت می‌کند.

الف) سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی صفر تا $3s$ ثانیه چند متر بر ثانیه است؟
 ب) معادله مکان - زمان متحرک را بنویسید.
 ج) سرعت متحرک را در لحظه $t=3s$ پیدا کنید.
 د) نمودار سرعت - زمان متحرک را رسم کنید.

متحرکی در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت است. در مکان $x=+1m$ در $t=0s$ و در مکان $x=+9m$ در $t=3s$ است.
 الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟
 ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از $2m/s$ به سرعت $18m/s$ می‌رسد؟
 ج) خودروی پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب $2m/s^2$ شروع به حرکت می‌کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت $36km/h$ از آن سبقت می‌گیرد.
 الف) در چه لحظه و در چه مکانی خودرو به کامیون می‌رسد؟
 ب) نمودار مکان - زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.
 ج) نمودار سرعت - زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.
 الف) اگر سنگ در 2 ثانیه آخر حرکت خود 60 متر طی کند، ارتفاع ساختمان چند متر است؟
 ب) سرعت سنگ درست پیش از برخورد به زمین چقدر است؟

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.

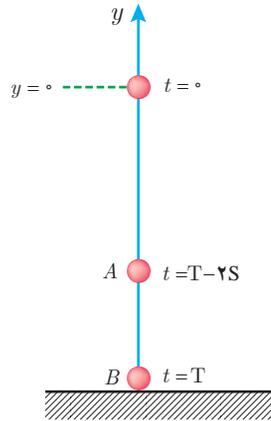
$$h = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(6s)^2 = 176.4 \text{ m}$$

۲۵ الف) ارتفاع ساختمان را h و زمان کل

حرکت سنگ را T فرض می‌کنیم. اگر مبدأ مختصات را محل رها شدن سنگ بگیریم ($y_0=0$) در این صورت معادله حرکت $1-13$ 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 $1-13$ داریم:

$$(1)$$

$$y_B = -h, t = T$$

$$\begin{cases} -h + 60 = -\frac{1}{2}g(T-2)^2 \\ -h = -\frac{1}{2}gT^2 \end{cases}$$

$$(2)$$

با جای‌گذاری (۲) در (۱) داریم

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

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

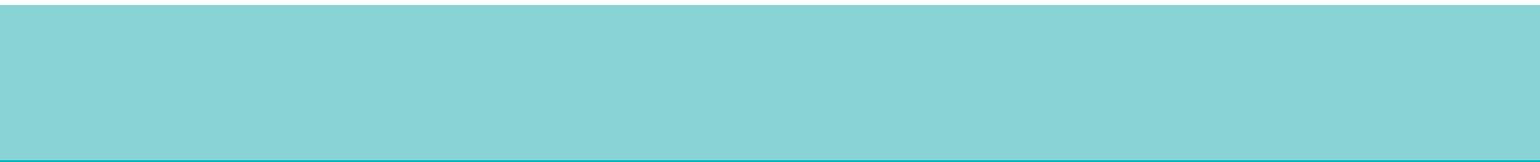
$$(60 + g)^2 = 4gh$$

$$h = \frac{(60 + 9.8)^2}{4 \times 9.8} \approx 80 \text{ m}$$

$$v_B^2 = -2 \times 9.8(-80 - 60) = 1568$$

$$v_B \approx -39.7 \text{ m/s}$$

ب) از رابطه $1-14$ 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 می‌شناسند.
 - با مرکز جرم جسم آشنا می‌شوند.
 - قوانین حرکت نیوتون را می‌شناسند.
 - با حالت متوازن بودن نیروها آشنا می‌شوند.
 - با ویژگی لختی یک جسم آشنا می‌شوند.
 - با رابطه نیرو و شتاب آشنا می‌شوند.
 - با برخی از نیروها مانند وزن، مقاومت شاره، نیروی عمودی سطح، نیروی کشش نخ، نیروی اصطکاک و کشسانی آشنا می‌شوند.
 - نیروهای وارد بر یک جسم را رسم کرده و نیروی خالص وارد بر جسم را محاسبه می‌کنند.
 - با کمک قانون دوم نیوتون، شتاب یک جسم را محاسبه می‌کنند.
 - با تکانه و قانون دوم نیوتون برحسب تکانه آشنا می‌شوند.
 - با کمک نمودار نیرو – زمان، تغییر تکانه یک جسم را تعیین می‌کنند.
 - با حرکت دایره‌ای یکنواخت و نیروی مرکزگرا و شتاب مرکزگرا آشنا می‌شوند.
 - با نیروی گرانشی و قانون گرانش آشنا می‌شوند.
 - وزن را براساس نیروی گرانش می‌شناسند.
 - شتاب گرانشی یک جسم را در اطراف زمین تعیین می‌کنند.

چه شناختی مطلوب است؟

- اثر نیرو را که 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 می‌دهد را می‌توان به مفهوم سرعت ربط داد و آن را به صورت خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می‌تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود.
- مفهوم متوازن بودن نیروهای وارد بر جسم را درک کند و بداند وقتی نیروهای وارد بر جسم متوازن اند، تغییری در سرعت جسم ایجاد نمی‌شود.
- براساس قانون اول نیوتون حالت سکون و سرعت ثابت معادل یکدیگر هستند و یک جسم حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت خود را حفظ می‌کند مگر آنکه نیروی خالصی (غیرصفر) 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.
- $m\bar{a}$ 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 چترباز، 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 است؟
- 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 حرکت 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 بر حسب نیروهای وارد بر جسم، محاسبه شتاب یک جسم بر حسب نیروهای وارد بر جسم، تعیین جهت شتاب یک جسم بر حسب 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٪ 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 داشته‌باشد. این مدارها تقریباً دایره‌ای‌اند و زمین 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 خواهد‌شد؟ 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.

پیش‌نویس‌ها

- ۱- قوانین حرکت نیوتون
- ۲- معرفی برخی از توره‌های جاساس
- ۳- شبکه و قانون دوم نیوتون
- ۴- حرکت دایره‌ای یکترشح
- 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 کنش 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.



در تمام فعالیت های روزانه با نیرو سروکار داریم. راه رفتن، بازی و دسته کردن در و تیرجه، نوشتن، کار با گونی همراه، نشنا کردن 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 مکانگام، تندیس، سرعت و شتاب آشنا شدیم و حرکت یک جسم را به کمک آنها توصیف کردیم اما از علت انواع حرکت، برشش 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...

شکل ۱-۳: هنگام وارد کردن نیرو به تیر، باید جهت و اندازه نیروی وارد بر تیر به گونه ای باشد که تیر به مکان مناسب و مورد نظر بارکنده برخورد کند



وقتی جسمی را می کشیم یا آن را هل می دهیم، به آن نیرو وارد می کنیم. نیرو، حاصل برهم کنش با اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است. نیرو کینتی برداری است که علاوه بر اندازه، جهت نیز دارد (شکل ۱-۳). معمولاً نیرو را با F نشان می دهند. در رسم نیرو از یک پارچه خط چندتا در با مقیاس مناسب استفاده می شود. مثلاً در شکل ۱-۳، بردار وزن دو گلدان را مشاهده می کنید که با مقیاس مناسب رسم شده اند.

شکل ۱-۴: گسیل وای مکانگی فرض می شود که تمام جسم بر یک نقطه متمرکز است. به نام مرکز جرم جسم متمرکز است و به جای آنکه نیرو به قسمت های مختلف جسم وارد شود به این نقطه وارد می شود.

نیرو را به کمک نیرومسن اندازه گیری می کنیم و برای آن، نیوتون است که با نماد N نشان داده می شود. از نیرو بر یک جسم به شکل های مختلف مانند نیروی کشش، نیروی گرانش، نیروی اصطکاک، نیروی شناوری و... استفاده می کنند. تغییر جهت و تغییر 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 برای بحث کنیم. در کتاب علوم نهم با مفهوم نیرو و قوانین نیوتون در باره حرکت آشنا شدیم. در اینجا ضمن مرور و باآوری آنها، مفاهیم فراگرفته شده، را گسترش می دهیم تا توانایی و درک شما 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.

۱-۲- 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 همزمان چند نیرو اثر کند و این نیروها اثر یکدیگر را خنثی کنند، به عبارت دیگر برآیند نیروهای وارد بر جسم صفر شود، می گوئیم نیروهای وارد بر جسم متوازن هستند.

۳-۱- نیرو را با F نشان می دهند. در رسم نیرو از یک پارچه خط چندتا در با مقیاس مناسب استفاده می شود.

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_s ، 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.

فصل ۱۱: دینامیک و حرکت دایره‌ای



پرسش ۱-۱

در شکل رویه‌رو یک کشش در حال حرکت را می‌بینید که نیروهای وارد بر آن متوازن اند. 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 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.

پرسش ۱-۲

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

نکته ۱-۱

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 راننده ترمز کند و شما کمربند خود را بسته باشید، ممکن است به جلو برتاب شوید (امتثالی شوید)، یا اگر اتوبوس ساکن باشد و ناگهان شروع به حرکت کند، به طرف عقب به صندلی خود فشرده می‌شوید. آیا علت آن را می‌دانید؟ بر اساس قانون اول نیوتون، اگر بر جسم نیروی خالصی وارد نشود، جسم ساکن می‌ماند و یا با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. به این خاصیت اجسام که میل دارند وضعیت حرکت خود را هنگامی که نیروی خالص وارد بر آنها صفر است حفظ کنند، «لختی» 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 می‌کنند.

تعریف ارائه شده برای قانون اول نیوتون بر اساس 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 موتورس، به راه خودش با همان سرعت هنگام خاموش شدن موتور ادامه می‌دهد، زیرا بر سفینه نیرویی وارد نمی‌شود.

فصل ۱۸: جنبشها و حرکت کاربردی

پرسش ۱-۱



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

قبل از سال ۱۶۰۰ میلادی دهگانه رایج این بود که هر جسم در حال حرکتی برای ادامه حرکت حتماً نیاز به نیرو دارد. ولی گالیله با طراحی آزمایش‌های 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 ۱-۲

در فیزیکی 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.

نکات ۱-۲

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

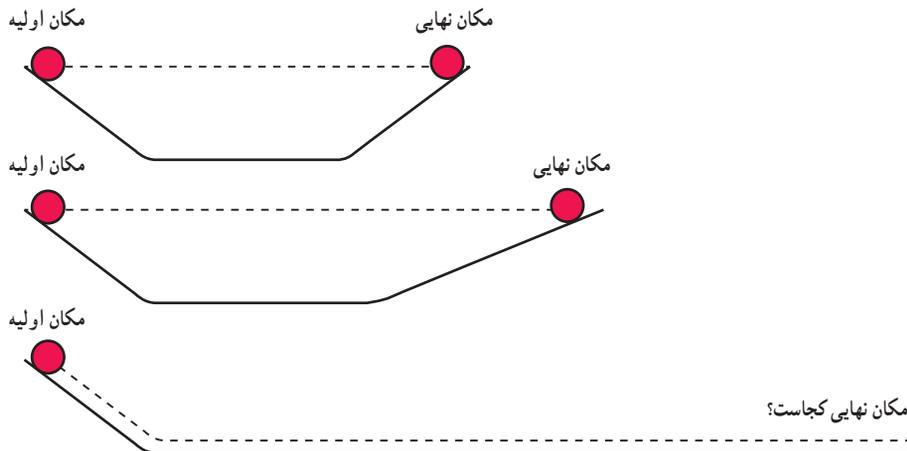
فرض کنید در اتوبوسی نشسته‌اید و اتوبوس در یک جاده مستقیم حرکت می‌کند. اگر ایستاده، ترمز کند و شما کمریند خود را ایستاده بمانید، ممکن است به جلو برتاب شوید (شمالی شوید). یا اگر اتوبوس ساکن باشد و ناگهان ترمز به حرکت کند، به طرف عقب به صندلی خود فشرده می‌شوید. آیا علت آن را می‌دانید؟ بر اساس قانون اول 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.

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 صرف نظر 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 شس 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 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 ۳

پرسش ۳-۲

الف) چرا حرکت سریع مقوا در شکل الف، سبب افتادن سکه در لیوان می‌شود؟
 ب) چرا در شکل ب، اگر بالای گوی نیروی وارد بر گوی سنگین را زیاد کنیم نخ بالای گوی پاره می‌شود، اما اگر ناگهان نخ را بکشیم، نخ پایین آن پاره می‌شود؟

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 ۳-۲

در شکل‌های زیر، قطعه‌ای حاوی 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.

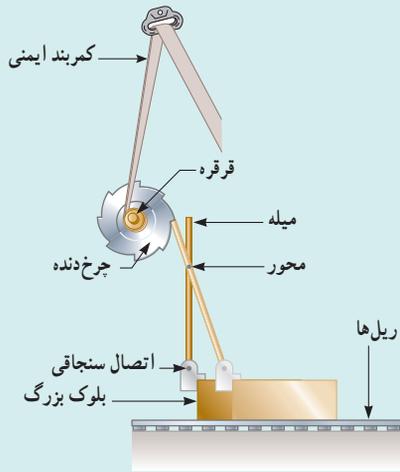
چنین تجربیاتی در تأیید قانون دوم نیوتون است که بیان می‌کند:

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 ۳-۳ شتاب جسم (a) بر جهت نیروی خالص وارد بر آن (F) است

۲۲

کاربرد لختی در طراحی و ساخت دستگاه کمر بند ایمنی



آرایش مکانیکی برای کمر بند ایمنی خودرو

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 نگه‌داشتن 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، چرخ‌دنده 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 میله باعث می‌شود که میله دور مرکزش بچرخد و چرخ‌دنده را درگیر کند. در این مرحله، چرخ‌دنده 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).

فیزیک ۳

پرسش ۲-۴

الف) چرا حرکت سریع متوا در شکل الف، سبب افغان سکه در لیوان می‌شود؟
 ب) چرا در شکل ب، اگر به آرامی نیروی وارد بر گوی سبک را زیاد کنیم، نخ بالای گوی باره می‌شود، اما اگر ناگهان نخ را بکنیم، 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، قطعه‌چهاروی 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 واروی 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 ۳-۱۳ شتاب جسم (a) بر جهت نیروی خالص وارد بر او (F) است.

۴۲

نسبت وارون دارد.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{\text{نت}}}{m}$$

و یا:

$$\vec{F}_{\text{نت}} = m \vec{a} \quad (\text{قانون دوم نیوتون}) \quad (1-2)$$

یکای SI نیرو، نیوتون است. یک نیوتون برابر با مقدار نیروی خالصی است که به جسمی به جرم یک کیلوگرم، شتابی برابر یک متر بر مربع ثانیه می‌دهد.

مثال ۱-۲

نیروی موتور یک قایق موتوری که جرم آن با سرشتیش ۴۰۰ kg است، به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در بازه زمانی معینی، همواره نیروی افقی خالص ۸۰۰ 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 ۱۲۰۰ N باشد، نیروی مقاومت در آن لحظه چقدر است؟

با چقدر طول می‌کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به ۱۵/۰ m/s برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه‌جا می‌شود؟

پاسخ: الف) از قانون دوم نیوتون برای پیدا کردن شتاب قایق استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه قایق در یک مسیر مستقیم حرکت می‌کند، می‌توان رابطه ۱-۲ را برای یک راستا به صورت $a = \frac{F_{\text{نت}}}{m}$ نوشت:

$$a = \frac{F_{\text{نت}}}{m} = \frac{800 \text{ N}}{400 \text{ kg}} = 2/0 \text{ m/s}^2 = 2/0 \text{ m/s}^2$$

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:

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

$$F_{\text{مقاومت}} = 400 \text{ N}$$

ب) از رابطه سرعت - زمان و مسافت - زمان با شتاب ثابت استفاده می‌کنیم.

$$v = at + v_0 = 15/0 \text{ m/s} = (2/0 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 7/5 \text{ s}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(15/0 \text{ m/s})^2 - (0 \text{ m/s})^2}{2(2/0 \text{ m/s}^2)} = 56/25 \text{ m}$$

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

۱-۲ در زمان نگینگی 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

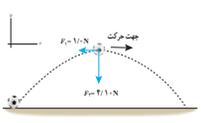
نیرو باعث تغییر حرکت می‌شود. حرکت حتی در نبود نیروها هم صورت می‌گیرد. اما نیروی خالص سبب تغییر حرکت می‌شود.

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.

فیزیک ۳

مثال ۲-۲



شکل روبرو نیروهای وارد بر توپ فوتبال به جرم ۰.۴۲ kg را در بالاترین نقطه مسیرش نشان می‌دهد که در آن نیروی مغناطیس F_1 و وزن توپ F_2 جهت وزنی شتاب توپ در این نقطه را تعیین کند. از نیروهای دیگر وارد بر توپ صرف‌نظر می‌نماید.

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

$\vec{F}_1 = (-4/10 \text{ N}) \hat{i}$ و $\vec{F}_2 = (-1/0 \text{ N}) \hat{j}$

$\vec{F}_{\text{net}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = (-1/0 \text{ N}) \hat{i} + (-4/10 \text{ N}) \hat{j}$

نیروی خالص $\vec{F}_{\text{net}} = (-1/0 \text{ N}) \hat{i} + (-4/10 \text{ N}) \hat{j}$

$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{\text{net}}}{m} = \frac{(-1/0 \text{ N}) \hat{i} + (-4/10 \text{ N}) \hat{j}}{0.42 \times 10^{-3} \text{ kg}} = (-2/7 \text{ N/kg}) \hat{i} + (-9/10 \text{ N/kg}) \hat{j}$

$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(-2/7 \text{ N/kg})^2 + (-9/10 \text{ N/kg})^2} = 1.0 \text{ N/kg} = 1 \text{ m/s}^2$

قانون سوم نیوتون: وقتی نیروی را می‌کشید، فنر نیز شما را می‌کشد. 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 ۲-۲). در این مثال‌ها نیرو اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است.

نیروها همواره به صورت جفت وجود دارند. اگر یکی از این نیروها را **کنش** نامید، نیروی دیگر **واکنش** نامیده می‌شود. قانون سوم نیوتون رابطه‌اش بین نیروهای کنش و واکنش را به صورت زیر بیان می‌کند:

هرگاه جسمی به جسم دیگری 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:

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

توجه داریم مسکن است نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی شود؛ مثلاً هنگام کوبیدن میخ در قطعه‌ای چوب، چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و سبب فرورفتن میخ در چوب می‌شود. نیروی وارد از میخ به چکش حرکت چکش را کند و متوقف می‌کند (شکل ۲-۳).

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

ا- درس‌مناهایی که نیروها هم‌راستا یا هم‌رسانند خارج از رده‌های 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.

بهرتر 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.

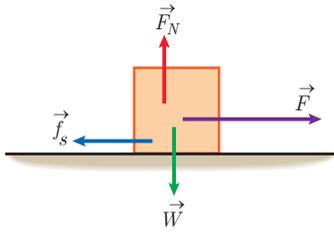
تصویرهای داده شده در شکل ۲-۴ نیروهای کنش و واکنش را برای حالت غیرتماسی نشان می‌دهد، اما شکل ۲-۵ نیروی کنش و واکنش را برای نیروهای تماسی رسم کرده است.

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 قدم‌زدن 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.

مثال ۳-۲

دو شخص به جرم‌های 75 kg و 50 kg با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روبروی 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 نیوتون می‌دانیم نیرویی که شخص اول به دوم وارد می‌کند (F_{12}) ها، اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند (F_{21}). با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

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

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{12}}{m_1} = \frac{(100\text{ N})\vec{i}}{50\text{ kg}} = (2\text{ m/s}^2)\vec{i}$$

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{21}}{m_2} = \frac{-(100\text{ N})\vec{i}}{75\text{ kg}} = -(1.33\text{ m/s}^2)\vec{i}$$

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

پرسش است

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؟

۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

با به قانون دوم نیوتون ($\vec{F}_{net} = m\vec{a}$) برای بررسی حرکت یک جسم باید نیروهای وارد بر آن جسم را تعیین کنیم. به همین دلیل لازم است با انواع نیروها آشنا شویم. در این بخش تعدادی از نیروهایی را که با آنها بیشتر سروکار داریم، معرفی می‌کنیم.

وزن: همان‌طور که در علوم هفتم خواندید وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین و جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۴). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف زمین شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم:

شتاب \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:

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

مثال ۳-۳

شکل ۳-۳: وزن و نیروی اصطکاک در زمین

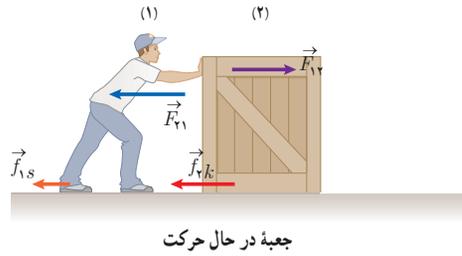
وزن (\vec{W}) وارد می‌کند و نیروی اصطکاک (\vec{f}_{s}) وارد می‌کند.

۳۵

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 $F_{12} > f_{fk}$ باشد، جعبه به طرف راست شتاب می‌گیرد. توجه داریم به شخص در راستای افقی دو نیروی اصطکاک f_{ks} و F_{21} وارد می‌شود و برای آنکه شخص بتواند جعبه را هل دهد باید: $F_{12} \leq f_{ks\max}$ باشد.



پرسش‌پیشنهادی

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 ۳، جرم‌ها و حرکت دایره‌ای

مثال ۳-۲

دو شخص به جرمهای 50 kg و 70 kg با کفشهای چرخ‌دار در یک سطح صاف و صاف روی 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}) همان‌طور که 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:

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

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{12}}{m_2} = \frac{(100\text{ N})\vec{i}}{50\text{ kg}} = (2\text{ m/s}^2)\vec{i}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{21}}{m_1} = \frac{-(100\text{ N})\vec{i}}{70\text{ kg}} = -(1.43\text{ m/s}^2)\vec{i}$$

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

پرسش ۳-۳

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 نیرویی که جعبه به شخص وارد می‌کند هم‌اندازه است، توضیح دهید چگونه جعبه حرکت می‌کند؟

۳-۴ معرفی برخی از نیروهای خاص

بنا به قانون دوم نیوتون $(\vec{F}_{net} = m\vec{a})$ برای بررسی حرکت یک جسم باید نیروهای وارد بر آن جسم را تعیین کنیم. به همین دلیل لازم است با انواع نیروها آشنا شویم. در این بخش تعدادی از نیروهای 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 ۳-۲). 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 نموده، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم:

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:

$$\vec{W} = m\vec{g}$$

(۳-۴) (وزن جسم)

شکل ۳-۲: وزن \vec{W} زمین بر جسم نیروی گرانشی (\vec{F}_g) وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی (\vec{F}_g) وارد می‌کند.

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 هم‌راستا یا عمود برهم هستند و همچنین فقط مسئله‌های تک جسمی را بررسی می‌کنیم. روال زیر فرایند حل مسئله را به مرحله‌های میانی کوچک‌تری تقسیم می‌کند.

- مسئله را حداقل یک بار با دقت می‌خوانیم.
- تصویر جسم مورد بررسی را کشیده و نیروهای وارد بر آن را با پیکان‌هایی نشان می‌دهیم.
- 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 ...
- قانون دوم نیوتون را به کار می‌بریم. می‌توانیم قانون دوم را برای محور x و y جداگانه بنویسیم $(\sum F_x = ma_x)$ و $(\sum F_y = ma_y)$.
- معادله‌ها را برای کمیت‌های مجهول حل می‌کنیم.
- در حالت خاص تعادل، فرایند بالا به علت صفر بودن شتاب ساده می‌شود. $(\sum F_x = 0)$ و $(\sum F_y = 0)$.

توجه داریم اجسامی که ساکن و یا با سرعت ثابت در حال حرکت هستند را در حالت تعادل می‌نامیم. در بخش معرفی برخی نیروها از دانش سال‌های پیش دانش‌آموزان و آنچه در دو فصل قبلی خوانده‌اند استفاده می‌کنیم (بالاخص قانون دوم نیوتون).

فصل ۲، دینامیک و حرکت دایره‌ای



مثال ۳-۲
دو شخص به جرم‌های ۷۵۰ kg و ۵۰۰ kg با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روی‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی ۱۰۰۰ N شخص دوم را به طرف راست هل می‌دهد.
الف) نشانی که شخص دوم می‌گیرد چقدر است؟
ب) نشانی 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:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = 1000 \text{ N}$$

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{12}}{m} = \frac{(1000 \text{ N})\hat{i}}{500 \text{ kg}} = (2 \text{ m/s}^2)\hat{i}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{21}}{m} = \frac{-(1000 \text{ N})\hat{i}}{750 \text{ kg}} = -(1.33 \text{ m/s}^2)\hat{i}$$

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

پرشی ۳-۱

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

۳-۲ 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 نیروهای را که با آنها بیشتر سروکار داریم، معرفی می‌کنیم.

وزن: همان‌طور که در علوم هتم خواندیم وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۳-۲). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم:



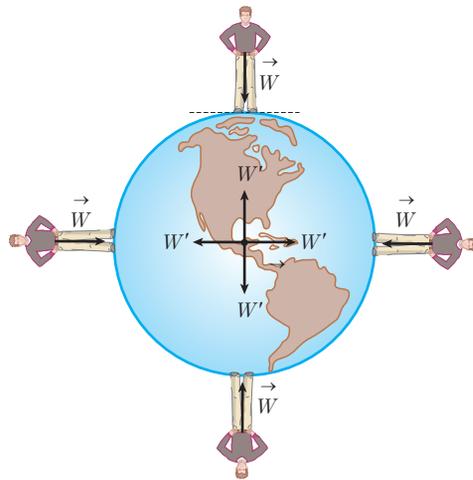
شکل ۳-۲: وزن یک جسم نیروی گرانشی است که از طرف زمین وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی وارد می‌کند.

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:

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

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).



پرشی 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 طلائی ۱۰۰ گرمی را در سطح زمین، ماه و مریخ به دست آورده و با هم مقایسه نمایند.

$$W_{\text{زمین}} = mg_{\text{زمین}} = (0.1 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 0.98 \text{ N} \quad (\text{الف})$$

$$W_{\text{ماه}} = mg_{\text{ماه}} = (0.1 \text{ kg})(1.6 \text{ N/kg}) = 0.16 \text{ N} \quad (\text{ب})$$

$$W_{\text{مریخ}} = mg_{\text{مریخ}} = (0.1 \text{ kg})(3.7 \text{ N/kg}) = 0.37 \text{ N} \quad (\text{پ})$$

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

توجه داریم که جهت وزن و در نتیجه شتاب گرانشی همواره به طرف زمین (مرکز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است، اما وزن آن طبق 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 $g = 9.4 \text{ N/kg}$ است تقریباً 564 N است. شتاب جاذبه در سطح زمین تقریباً 9.8 N/kg است.

تمرین ۳-۲

الف) وزن قطعه‌ای طلا به جرم 100 گرم را روی سطح زمین به دست آورید.
ب) وزن یک جسم در سطح یک سیاره برابر 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 چترباز 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 می‌کنید، 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 نیروی 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 نیروی مقاومت شاره **نیروی مقاومت هوا** می‌گویند.

مثال ۳-۲

چتربازی به جرم 60 kg مدتی پس از یک پرش آزاد، چترش را باز می‌کند. ناگهان نیروی مقاومت هوا به 1140 نیوتن افزایش می‌یابد. شتاب چترباز را در این لحظه به دست آورید و حرکت آن را تحلیل کنید. برای سادگی g را 10 N/kg فرض کنید.

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

$$F_d - W = ma \Rightarrow (1140 \text{ N}) - (60 \text{ kg})(10 \frac{\text{N}}{\text{kg}}) = (60 \text{ kg})a$$

$$\Rightarrow a = \frac{540 \text{ N}}{60 \text{ kg}} = 9 \text{ m/s}^2$$

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید شتاب چترباز در این حالت 9 m/s^2 و رو به بالا، یعنی در خلاف جهت حرکت آن است. پس به تدریج تندی چترباز کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی مقاومت هوا نیز کم می‌شود. نیروی مقاومت شاره، با نیروی سنگینی که از قبل به آن اضافه می‌شد، مقابله می‌کند.

۳-۲ مثال ۳-۲ در کتاب فیزیک ۱، فصل ۳، بخش ۳-۲، مثال ۳-۲

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

$$\frac{W_{\text{زمین}}}{W_{\text{ماه}}} = \frac{mg_{\text{زمین}}}{mg_{\text{ماه}}} = \frac{g_{\text{زمین}}}{g_{\text{ماه}}} = \frac{9.8}{1.6} = 6.125 \quad \text{یا} \quad \frac{W_{\text{زمین}}}{W_{\text{مریخ}}} = \frac{mg_{\text{زمین}}}{mg_{\text{مریخ}}} = \frac{g_{\text{زمین}}}{g_{\text{مریخ}}} = \frac{9.8}{3.7} = 2.65$$

نیروی مقاومت شاره (از جمله هوا) در بسیاری از مسئله‌های دینامیک قابل صرف نظر 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 ۳-۲: در مثال ۳-۲ توجه داریم که وقتی چترباز چترش را باز می‌کند، نیروی مقاومت هوا حدود ۲ برابر وزن چترباز می‌شود. پس در این‌گونه مثال‌ها که نیروی مقاومت شاره تا این حد بزرگ است، صرف نظر 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 چترباز به تندی حدهی می‌رسد این نیرو می‌تواند ثابت و هم‌اندازه با وزن باشد) بنابراین شتاب را باید در

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 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 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:

$$f_D = mg = (0.005 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 4.9 \times 10^{-4} \text{ N} = 0.49 \text{ mN}$$

فصل ۲: 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 نظرات باران حدود 7 m/s است.

مثال ۲-۵

دو گوی هم‌اندازه را که جرم یکی دو برابر دیگری است ($m_1 = 2m_2$) از بالای برجی به ارتفاع h بطور هم‌زمان رها می‌کنیم. با فرض اینکه نیروی مقاومت هوا در طی حرکت دو گوی ثابت و یکسان باشد، تندی برخورد کدام گوی با زمین بیشتر است؟
 پاسخ: بر این گوی‌ها، دو نیروی وزن و مقاومت هوا وارد می‌شود. طبق قانون دوم نیوتون، نیروی حاصله وارد بر گوی برابر با حاصل ضرب 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 به طرف 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:

$$v_1^2 - v_0^2 = 2a_1 h \Rightarrow v_1^2 = 2a_1 h \Rightarrow v_1 = \sqrt{2a_1 h} \Rightarrow v_1 > v_2$$

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

تمرین ۲-۲

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

نیروی عمودی سطح: مطابق شکل ۲-۱، لیبانی را روی سطح افقی میزی در نظر بگیرید. بر لیبانی ساکن روی میز افقی چه نیروهای وارد می‌شود؟ یا توجه به اینکه نیروی وزن و لیبانی وارد می‌شود، چه نیروی سبب خشن شدن آن و سکون جسم می‌شود؟

همان‌طور که می‌دانیم نیروهای وارد بر جسم ساکن، متوازن‌اند، بنابراین در این حالت باید یک نیروی هم‌اندازه و در خلاف جهت وزن از طرف میز (سطح) بر لیبانی وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، نیروی عمودی سطح (کنگه‌گام) می‌گویند و آن را با $F_{D\perp}$ نشان می‌دهند.

شکل ۲-۱ نیروهای وارد بر لیبانی متوازن‌اند.

$$\vec{F}_{D\perp} = W \Rightarrow \vec{F}_{D\perp} = -W \Rightarrow \vec{F}_{D\perp} = -mg \Rightarrow \vec{F}_{D\perp} = -m\vec{g}$$

نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح استغنی یا یک تکیه قرار دهیم تغییر شکل سطح با تکیه به خوبی دیده می‌شود. حتی یک زمین به ظاهر سخت و سخت‌نیز وقتی جسمی روی آن قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل مربوط به نیروهای بین مولکولی است که در فزیک ۱ با آن آشنا شدیم.

مثال ۲-۵: 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 می‌کنند. 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 رو به بالا انتخاب شده است). در شرایط داده شده برای این مسئله ($m_1 = 2m_2$ و $f_{D2} = f_{D1}$) جسم سنگین‌تر با شتاب بیشتری حرکت می‌کند پس با تندی بیشتری به زمین برخورد می‌کند و زمان حرکت آن نیز کمتر است.

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.

۳۱-۱۳. **فیزیک و حرکت دایره‌ای**
 کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن همان‌اندازه و نیروهای وارد بر چترناز متوازن شوند. پس از این چترناز با تندی ثابتی موسوم به **تندی حدی** به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک چترناز نوعی حدود 51 m/s و برای فطرات باران حدود 7 m/s است.

۳۱-۲ سوال
 دو گوی همان‌اندازه را که جرم یکی دو برابر دیگری است ($m_1 = 2m_2$) از بالای برجی به ارتفاع h به‌طور هم‌زمان رها می‌کنیم. با فرض اینکه نیروی مقاومت هوا در طی حرکت دو گوی ثابت و یکسان باشد، تندی برخورد کدام گوی با زمین بیشتر است؟
پاسخ: برای 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 به طرف 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 - جاه‌جایی می‌توانیم بنویسیم:
 $v^2 - v_0^2 = 2a\Delta y \Rightarrow v^2 - 0 = 2ah \Rightarrow v = \sqrt{2ah} \Rightarrow v_1 > v_2$
 یعنی در این مثال تندی برخورد گوی سنگین‌تر، بیشتر از گوی سبک‌تر است.

۳۱-۳ تمرین
 اگر در مثال ۳۱-۲ از مقاومت هوا صرف‌نظر کنیم، سرعت برخورد گوی‌ها با زمین را با هم مقایسه کنید.

نیروی عمودی سطح: مطابق شکل ۳۱-۲، لیبایی را روی سطح افقی میزی در نظر بگیرید. بر لیبایی ساکن روی میز افقی چه نیروهای وارد می‌شوند؟ با توجه به اینکه نیروی وزن بر لیبایی وارد می‌شود، چه نیروی سبب خشن شدن آن و سگونی جسم می‌شود؟
 همان‌طور که می‌بینید نیروهای وارد بر جسم ساکن، متوازن‌اند. بنابراین در این حالت باید یک نیروی همان‌اندازه و در خلاف جهت وزن از طرف زمین (سطح) بر لیبایی وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، **نیروی عمودی سطح** (یکگانه) می‌گویند و آن را F_N نشان می‌دهند.

$$\vec{F}_{\text{net}} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N + \vec{W} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N = -\vec{W} \Rightarrow F_N = W$$

نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح استیجی با یک سنگ قرار دهیم، تغییر شکل استیج با سنگ به خوبی دیده می‌شود. حتی یک زمین سفت و سخت نیز وقتی جسمی روی آن قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل مربوط به نیروهای بین مولکولی است که در فیزیک ۱ با آن آشنا شدید.

نیروی عمودی سطح: می‌توان مثال ۳۱-۲ را با مقدار جرم‌های مشخص، F_D مشخص و... ارائه کرد تا دانش‌آموزان شتاب، تندی، زمان سقوط و... را محاسبه کنند.
 دانش‌آموزان اغلب نمی‌دانند چرا نیروی عمودی سطح به وجود می‌آید. می‌توان از دانش‌آموزان خواست استدلال کنند چرا چنین نیرویی باید وجود داشته باشد.
 توجه داریم به دست آوردن اندازه نیروی عمودی سطح (F_N) با قانون دوم نیوتون امکان‌پذیر است و برای به دست آوردن آن، رابطه مستقلی وجود ندارد.
 در شکل ۳۱-۲ می‌توانیم از دانش‌آموزان بخواهیم نیروهای وارد بر لب‌تاپ و واکنش آنها را مشخص کنند.

۳۲-۱ تمرین
 همانند شکل، جعبه‌ای به جرم 4 kg روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده بدست آورید.

نیروی عمودی یک‌گانه از طرف سطح به جسمی که روی آن قرار دارد وارد می‌شود. بنابراین واکنش این نیرو F_N بصورت عمودی و در خلاف جهت F_N از طرف جسم به سطح وارد می‌شود (شکل ۳۲-۱). همچنین واکنش نیروی وزن (W) نیروی است که از طرف جسم به زمین و در خلاف جهت W وارد می‌شود.

۳۲-۲ سوال
 شخصی درون آسانسور ساکن، روی یک ترازوی فیزی استاندارد است. در این حالت ترازو عدد 500 N را نشان می‌دهد. (الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ (ب) وقتی آسانسور شتاب رو به بالا 2 m/s^2 دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (پ) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین 2 m/s^2 دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (د) اگر ترازو 400 N را نشان می‌دهد ($g = 9.8 \text{ N/kg}$) پارادشود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ($g = 9.8 \text{ N/kg}$)
پاسخ: بر شخصی نیروی وزن به طرف پایین و نیروی عمودی سطح به طرف بالا وارد می‌شود. جهت مثبت محور y را رو به بالا انتخاب می‌کنیم و از قانون دوم نیوتون برای پاسخ به قسمت‌های مختلف استفاده می‌کنیم.
 (الف) در حالتی که آسانسور ساکن است می‌توانیم بنویسیم:
 $F_N - W = ma = 0 \Rightarrow F_N = W = mg$
 توجه داریم نیروی عمودی سطح را در خود شخص F_N و واکنش آن F_N را نشان می‌دهد. پس نیروی عمودی F_N را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.
 $F_N = \Delta m N \Rightarrow F_N = F_N = \Delta m N, F_N = W = mg = \Delta m N = m(9.8 \text{ N/kg}) \Rightarrow m = 50 \text{ kg}$
 (ب)
 $F_N - W = ma \Rightarrow F_N = mg + ma = (50 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) + (50 \text{ kg})(2 \text{ N/kg}) = 600 \text{ N}$
 یعنی در این حالت، ترازو عددی بزرگ‌تر از اندازه وزن را نشان می‌دهد.

پاسخ تمرین ۳۲-۲
 یک جعبه با جرم مشخص بر روی سطح قرار دارد اما بسته به اینکه F چگونه بر جعبه وارد می‌شود (اثر می‌کند) نیروهای عمودی سطح متفاوتی به دست می‌آید. در این شکل‌ها نیز می‌توان از دانش‌آموزان خواست نیروهای واکنش را رسم کنند.
 توجه داشته باشیم که W' را همانند شکل ۳۲-۱ می‌توانیم روی زمین رسم کنیم (به جای آنکه از مرکز زمین رسم کنیم).
 توجه به مکان‌های F_N' و W' در شکل ۳۲-۱ بسیار آموزنده است: شاید رسم یک میز که تلویزیونی روی آن قرار دارد و اینکه از دانش‌آموزان بخواهیم نیروهای وارد بر تلویزیون و واکنش آنها را رسم کنند، مفید باشد. حتی می‌توانیم جرم تلویزیون را بدسیم و از دانش‌آموزان بخواهیم مقادیر F_N ، F_N' ، F_N ، F_N' ، W و W' را به دست آورند.

مثال ۲-۶: همانند شکل، جسمی با جرم 200 kg روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده بدست آورید.

مثال ۲-۷: شخصی درون آسانسور ساکن، روی یک ترازوی فنری ایستاده است. در این حالت ترازو عدد 500 N را نشان می‌دهد. (الف) جرم شخصی چند کیلوگرم است؟ (ب) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین 2 m/s^2 دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (ج) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین 2 m/s^2 دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (د) اگر کابل آسانسور پاره شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ (هـ) $g = 9.8\text{ N/kg}$ پاسخ: بر ششخت 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:

$$F_N - W = ma = 0 \Rightarrow F_N = W = mg$$

توجه داریم نیروی عمودی سطح F_N که واکنش است را نشان می‌دهد. پس نیروی عمودی F_N را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

ب) $F_N = \Delta \Delta N \Rightarrow F_N = \Delta \Delta N, F_N = W = mg = \Delta \Delta N = m(9.8\text{ N/kg}) \Rightarrow m = 500/9.8\text{ kg}$ (ب)

ج) $F_N - W = ma \Rightarrow F_N = mg + ma = (500/9.8\text{ kg})(9.8\text{ N/kg}) + (500/9.8\text{ kg})(2\text{ m/s}^2) = 500\text{ N}$

د) $F_N = 0\text{ N}$

هـ) 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 هر یک از حالت‌های زیر، عددی را که ترازوی فنری نشان می‌دهد یا وزن شخص مقایسه کنید.

الف) آسانسور به طرف بالا 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 بماند، با ملاحظاتی روبه‌رو می‌شویم که به آن نیروی اصطکاک گویند. اگر یک خودروی ساکن بر سطح افقی خیابان را هل دهید، و نتوانید آن را به حرکت درآورید، 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 ۲-۸). این نیرو، نمونه‌ای از نیروی اصطکاک ایستایی است و آن را با F_s نشان می‌دهند. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننداش ترمز کرده و چرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. در این حالت نیز نیروی در خلاف جهت حرکت از طرف سطح به خودرو وارد می‌شود. این نیرو، نمونه‌ای از نیروی اصطکاک جنبشی است و آن را با F_k نشان می‌دهند.

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 ناهمواری‌های محل تماس دو جسم ایجاد می‌شود (شکل ۲-۹). حتی سطحی که بسیار هموار به نظر می‌آید، ناهمواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارد که سبب اصطکاک می‌شود.

نیروی اصطکاک عموماً به عنوان نیروی ایستایی شناخته می‌شود، با وجود این در زنگ روزمره لازم است، نگهداشتن یک قلم در دست، نشستن، راه‌پیمایی، قدم زدن و همین‌طور ترمز کردن و ... بدون اصطکاک ممکن نیست. بدون اصطکاک حتی ایستادن ناممکن است، زیرا کمترین جابه‌جایی 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 بگیرید 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 $f_{s,max} = \mu_s F_N$ ۴-۲ به دست می‌آید و نیروی اصطکاک جنبشی از رابطه $f_k = \mu_k F_N$ ۶-۲ محاسبه می‌شود.

می‌توانیم از دانش آموزان بخواهیم، بگویند نیروی اصطکاک بین دو جسم به چه عواملی بستگی دارد؟ احتمالاً دانش آموزان 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 دانش آموزان تصور نادرستی از مضر بودن نیروی اصطکاک دارند. پاراگراف آخر این صفحه به دانش آموزان کمک می‌کند تا به نقش مثبت نیروی اصطکاک در زندگی پی ببرند.

هدف از پرسش ۷-۲ درگیر کردن دانش آموزان به نقش مثبت اصطکاک در راه رفتن انسان، خودروها و ... است.

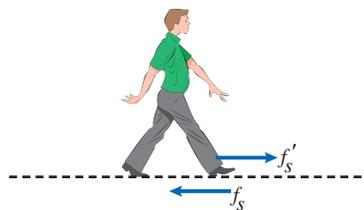
پاسخ پرسش ۷-۲
 هنگام راه رفتن، پا زمین را به عقب هل می‌دهد این برهم کنش به علت اصطکاک بین پا و زمین اتفاق می‌افتد. طبق قانون سوم نیوتون زمین نیز پا را به طرف جلو هل می‌دهد که سبب حرکت و راه رفتن می‌شود. اگر سطح زمین سُر و بدون اصطکاک باشد، نیروی اصطکاک که پا به زمین وارد می‌کند و نیروی اصطکاک که زمین به پا وارد می‌کند بسیار ناچیز است و راه رفتن به سختی ممکن خواهد بود و حتی ممکن است نتوانیم راه برویم.

شکل ۶-۳ با افزایش نیروی اصطکاک ایستایی نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش نیروی اصطکاک ایستایی نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی اصطکاک ایستایی نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی اصطکاک ایستایی نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۶-۳ با افزایش نیروی اصطکاک ایستایی نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش نیروی اصطکاک ایستایی نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی اصطکاک ایستایی نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد.

هدف از پرسش ۷-۲ درگیر کردن دانش آموزان 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.

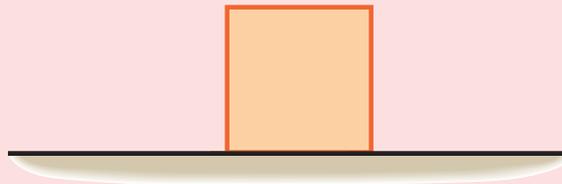


خوب است بدانیم «دیدگاه میکروسکوپی» می‌تواند به درک بیشتر نیروی اصطکاک کمک کند. اشاره به طبیعت الکتریکی نیروی اصطکاک، اشاره به جوش سرد، سطح میکروسکوپی تماس و نسبت 10^4 بار کوچک‌تر بودن آن نسبت به سطح ظاهری تماس و اشاره به تشکیل و پاره شدن جوش‌ها در هنگام حرکت جسم، موارد مهمی هستند که می‌توان به آنها پرداخت.

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) $F_{\text{ا}} - f_{s\text{ا}} = ma = 0, F_{\text{ا}} = 0 \rightarrow f_{s\text{ا}} = 0$

ب) $F_{\text{ب}} - f_{s\text{ب}} = ma = 0 \rightarrow f_{s\text{ب}} = F_{\text{ب}} = 6^\circ\text{N}$

پ) خیر زیرا $F_{\text{پ}} < f_{s,\text{max}}$ است.

$F_{\text{ت}} - f_{s\text{ت}} = ma = 0 \rightarrow f_{s\text{ت}} = F_{\text{ت}} = 10^\circ\text{N}$

ت) بله زیرا $F_{\text{ت}} > f_{s,\text{max}}$ 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_k و μ_s 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 ۴٪ است ولی مقدار آن میان کفش‌های صخره‌نورد و صخره ۱/۲ است.

۳ در این کتاب فرض می‌شود که مقدار μ_k به تنهایی که جسم روی سطح می‌لغزد بستگی ندارد.

۴ در معادله ۲-۵ علامت مساوی فقط وقتی به کار می‌رود که سطوح در آستانه رها شدن و سر خوردن هستند. در دام متداول استفاده از $f_s = \mu_s F_N$ در هر وضعیت ایستا قرار نگیریم.

فصل ۴: دینامیک و حرکت چارچوبی

تمرین 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 صاف 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 با مساوی $f_{s,max}$ است:

$$f_s \leq \mu_s F_N \quad (5-2)$$

تمرین ۲-۴

اگر در شکل ۲-۱۲، جرم جسم 400 g و بزرگی نیروها $F_1 = 40 \text{ N}$ ، $F_2 = 80 \text{ N}$ و $F_3 = 90 \text{ N}$ باشد، الف) بزرگی نیروهای اصطکاک ایستایی در هر حالت چقدر است؟ ب) ضریب اصطکاک ایستایی را پیدا کنید.

آزمایش ۳-۱: اندازه گیری ضریب اصطکاک ایستایی بین دو جسم

وسایل لازم: تروسنج، قطعه چوبی به شکل مکعب مستطیل با وجوه یکنواخت، ترازو، خط‌کش

شرح آزمایش:

۱- مکعب چوبی را از طرف وجه بزرگ آن، روی سطح افقی میز قرار دهید.

۲- تروسنج را مانند شکل به مکعب چوبی وصل کنید و سر دیگر تروسنج را با دست بگیرید و به‌طور افقی بکشید.

۳- نیروی دستتان را به‌آرامی افزایش دهید تا جایی که مکعب چوبی در آستانه لغزیدن قرار گیرد. در این حالت عددی را که تروسنج نشان می‌دهد، در جدول یادداشت کنید (رای آنکه 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:	
		عدد	نیروی نشان می‌دهد (مدت)
۱			

همراه با اعضای گروه خود، نتیجه‌های بدست آمده را تفسیر کنید.

پاسخ تمرین ۲-۴

الف)

$$F_1 - f_s = ma = 0 \rightarrow f_s = F_1 = 40 \text{ N}$$

$$F_2 - f_s = ma = 0 \rightarrow f_s = F_2 = 80 \text{ N}$$

$$F_3 - f_{s,max} = ma = 0 \rightarrow f_{s,max} = F_3 = 90 \text{ N}$$

ب)

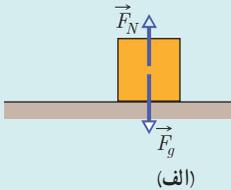
$$f_{s,max} = \mu_s F_N \rightarrow \mu_s = \frac{f_{s,max}}{F_N}, F_N = mg = (40 \text{ N})(9.8 \text{ N/kg}) = 392 \text{ N} \rightarrow \mu_s = \frac{90 \text{ N}}{392 \text{ N}} = 0.23$$

در انجام این آزمایش (۲-۱) 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 اصطکاک که از آن پس با حرکت مخالفت می‌کند، نیروی اصطکاک جنبشی است.

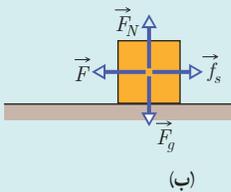
هیچ تلاشی برای لغزاندن نیست. بنابراین، نه اصطکاک و نه حرکت وجود ندارد.



نیروی اصطکاک = 0

(الف)

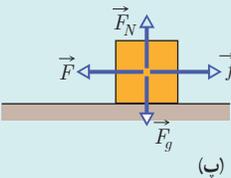
نیروی \vec{F} سعی می‌کند قطعه را بلغزاند، ولی در تعادل با نیروی اصطکاک است. حرکتی نداریم.



نیروی اصطکاک = F

(ب)

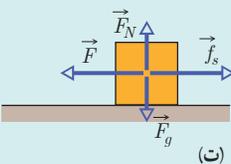
اکنون نیروی \vec{F} قوی‌تر است، ولی همچنان در تعادل با نیروی اصطکاک است. حرکتی نداریم.



نیروی اصطکاک = F

(ب)

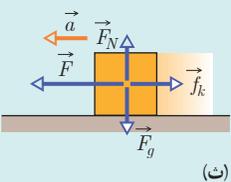
اکنون نیروی \vec{F} بسیار قوی است، ولی همچنان در تعادل با نیروی اصطکاک است. حرکتی نداریم.



نیروی اصطکاک = F

(ت)

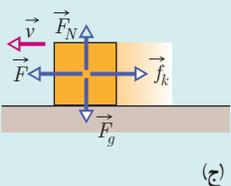
سرانجام نیروی وارد شده بر نیروی اصطکاک ایستایی غلبه می‌کند. قطعه می‌لغزد و شتاب می‌گیرد.



نیروی اصطکاک جنبشی ضعیف

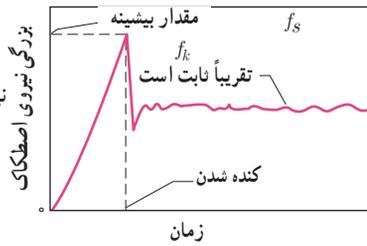
(ث)

برای آنکه تندی ثابت بماند، نیروی ضعیف شده \vec{F} باید برابر نیروی اصطکاک ضعیف باشد.



همان نیروی اصطکاک جنبشی ضعیف

(ج)



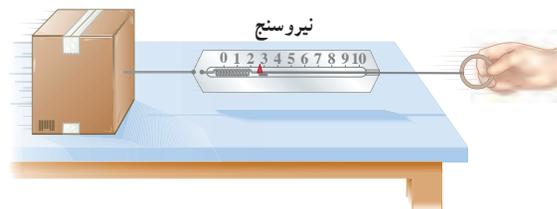
نیروی اصطکاک جنبشی فقط یک مقدار دارد (موازنه‌ای در کار نیست).

(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، تا اینکه 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

آزمایشی طراحی کنید که نشان دهد $f_{s,max}$ 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.

(۴-۲) (نیروی اصطکاک جنبشی) $f_k = \mu_k F_N$

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	۰.۴۷	۰.۳۷
فولاد بر مس	۰.۳۶	۰.۲۶
مس بر چدن	۰.۲۹	۰.۱۵
مس بر نئوپرن	۰.۵۳	۰.۴۸
نئوپرن بر نئوپرن	۰.۴۰	۰.۳۰
لاستیک بر یون تز	۰.۲۵	۰.۲۰
لاستیک بر یون خشک	۰.۸	۰.۱
غزلون بر غزلون	۰.۴	۰.۳

فعالیت 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 اندازه‌گیری و با استفاده از آن μ_k را به دست آورید.

(ب) با بستگی با عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

مسئله ۲-۲

شکل مقابل مشخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبه ۷۵۰ کیلوگرمی با نیروی ۳۰۹۸ نیوتن افقی است. نیروی که مشخص 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) نتایج جعبه در این حالت چقدر است؟ (g = ۹.۸ N/kg)

پاسخ: الف) نیروی وارد بر جعبه را رسم می‌کنیم. چون جسم در امتداد قائم شتاب ندارد از قانون دوم نیوتن نتیجه می‌شود که برابری نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$F - W = 0 \Rightarrow F = W = mg = (750 \cdot 9.8 \frac{N}{kg}) = 7350 N$

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 نیز به همان نسبت افزایش پیدا می‌کند؛ یعنی $f_s \propto F_N$ است. روش‌های دیگری نیز برای انجام این آزمایش وجود دارد.

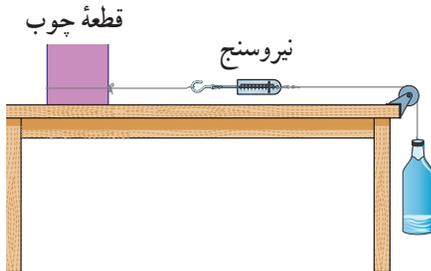
شماره آزمایش	وزن حجم (مکعب‌ها)	نیروی عمودی تکیه‌گاه	عددی که نیروسنج نشان می‌دهد (f_s)
۱			
۲			
۳			

توجه: به زاویه «معمولاً» در ابتدای سطر 1° 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 ۲-۳

(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



تمرین ۳۱



شکل ۳-۹: بر جبهه‌های اسکی نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود.

فعالیت ۲-۳

آزمایشی طراحی کنید که نشان دهد $f_{s, \max}$ متناسب با F_N است.

مبا 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.

$$f_s = \mu_s F_N \quad (\text{نیروی اصطکاک جنبشی}) \quad (6-2)$$

در این رابطه μ_s 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 ۶-۲ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

جدول ۶-۲

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	۰/۲۵
مس بر چدن	۰/۲۹	۰/۱۵
مس بر نشیمن	۰/۵۲	۰/۳۸
نشیمن و نشیمن	۰/۴۰	۰/۳۰
لاستیک بر بتن تر	۰/۷۵	۰/۴۰
لاستیک بر بتن خشک	۰/۸	۰/۶
فلز بر فلز	۰/۴	۰/۳

فعالیت ۲-۳

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_s را بدست 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 جعبه 70 kg کیلوگرمی با نیروی 300 N روی سطح افقی است. نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند افقی و جعبه در حال حرکت است. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جعبه 0.4 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 برآیند نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (70 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2) = 686 \text{ N}$$

و می‌توانیم بنویسیم :



$$T - f_k = ma = 0 \rightarrow f_k = T = \text{عددی که نیروسنج نشان می‌دهد یا وزن بطری محتوی آب}$$

ب) جسم قسمت الف آزمایش را روی سطح‌های مختلف آن قرار داده و هربار عددی که نیروسنج نشان می‌دهد (یا وزن آب) را اندازه‌گیری می‌کنیم. اگر ویژگی‌های سطح‌های مختلف جسم با هم یکسان باشد، عددهایی که به‌دست می‌آوریم تقریباً یکسان خواهند بود که نشان‌دهندهٔ مستقل بودن این نیرو از مساحت سطح تماس دو جسم است.

مثال ۲-۷

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.

دورنگ ۳۰

فعالیت ۲-۲

آزمایشی طراحی کنید که نشان دهد $f_{kinetic}$ متناسب با F_N است.

ب) با 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.

جدول ۱-۲

جنس دو سطح تماس	μ_k	μ_s
فولاد بر فولاد	۰.۰۲۷	۰.۰۲۲
فولاد بر آلومینیوم	۰.۰۲۷	۰.۰۹۱
فولاد بر مس	۰.۰۲۶	۰.۰۵۲
مس بر چدن	۰.۲۹	۰.۱۵
مس بر نئوپن	۰.۵۳	۰.۶۸
نئوپن بر نئوپن	۰.۴۰	۰.۹۲
لاستیک بر بتن تر	۰.۲۵	۰.۳۰
لاستیک بر بتن خشک	۰.۱۸	۰.۱۰
تفلون بر تفلون	۰.۰۴	۰.۰۴

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.

فعالیت ۳-۲

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوانید:

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر جسمی مانند یک تکه چوب در حال لغزش روی سطح را اندازه‌گیری و با استفاده از آن μ_k را به‌دست آورید.

ب) بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

مثال ۲-۳

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبهٔ ۷۵۰ کیلوگرمی با نیروی ۳۰۹۸ 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 به جعبه چقدر است؟
 (ب) نتایج جعبه در این حالت چقدر است؟
 (ج) $g = 9.8 \text{ N/kg}$

پاسخ: الف) نیروهای وارد بر جعبه را رسم می‌کنیم. چون جسم در انحنای قائم‌نصاب عیاره از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برآیند نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (750 \text{ kg})(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}}) = 7350 \text{ N}$

با استفاده از رابطه ۲-۶ داریم:

$$f_s = \mu_s F_N \Rightarrow f_s = 0.7 \times 735 \text{ N} \Rightarrow f_s = 514.5 \text{ N}$$

بنا بر این نیروهای افقی وارد بر جسم برابر با حاصل ضرب جرم در شتاب است.

$$F - f_s = ma \Rightarrow a = \frac{F - f_s}{m} = \frac{735 \text{ N} - 514.5 \text{ N}}{5 \text{ kg}} = 44.1 \text{ m/s}^2$$

تمرین ۵-۲

در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جبهه 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 فرم‌ها اجزای مهمی در فناوری هستند و به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند (شکل ۲-۱۴). همچنین با تأثیر نیرو بر یک فنر آشنا شدیم و می‌دانیم که اگر یک سر فنری را به نقطه‌ای محکم کنیم و سر دیگر آن را بکشیم، طول فنر افزایش می‌یابد. شکل ۲-۱۵ الف، فنری را با طول عادی نشان می‌دهد که در آن، فنر به فنر شده و نه کشیده شده است. اگر فنر را به اندازه s بکشیم یا فنر را بکشیم (شکل ۲-۱۵ ب و ج)، فنر نیروی به طرف نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند. تجربه نشان می‌دهد هر چه فنر را بیشتر بکشیم یا فنر را کمتر بکشیم (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 (s) رابطه مستقیم دارد:

$$F = ks \quad (\text{نیروی کشسانی فنر}) \quad (2-17)$$

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 s 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 اعتدالی، k عددی کوچک (حدود 100 N/m) و برای یک فنر سفت k عددی بزرگ (حدود 10000 N/m) است. نمودار نیروی کشسانی بر حسب تغییر طول برای سه فنر با k های متفاوت در شکل ۲-۱۶ رسم شده است.

قوانین ۲-۳

تعدادی فنر متفاوت تهیه کنید. الف) سختی آنها را مقایسه کنید. ب) با طریقی یک آزمایش ثابت هر فنر را به دست آورید.

د. زومس - در کتاب نیروی کشسانی فنر (F) نیرو از Hooke's Law و سختی کشسانی است.

شکل ۲-۱۵ الف: فنر عادی. ب: فنر کشیده شده. ج: فنر فشرده شده.

شکل ۲-۱۶: هر چه ثابت فنر بیشتر باشد، جعبه نمودار بیشتر و فنر سخت‌تر است.

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:

$$F_{\text{حداقل}} = f_{s,max} = \mu_s F_N, \quad F_N = mg = 735 \text{ N}$$

$$F_{\text{حداقل}} = (0.7)(735 \text{ N}) = 514.5 \text{ N}$$

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 60 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 12 N باشد، آیا قطعه در صورتی که نیروی افقی وارد بر آن 11 N باشد، حرکت خواهد کرد؟ ت) اگر 14 N باشد چطور؟ ث) بزرگی نیروی اصطکاک قسمت پ چقدر است؟

پاسخ: الف) صفر ب) $f_s = 60 \text{ N}$ پ) (خیر) حرکت می‌کند ث) $f_s = 11 \text{ N}$

مثال ۲-۸

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.

مثال ۲-۸

فنری به طول $L_0 = 1.0 \text{ cm}$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنه 2.0 kg گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L = 12.0 \text{ cm}$ می‌رسد.

الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟
ب) اگر وزنه‌ای 3.0 kg 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.

ب)

$$F_s - W = ma \Rightarrow F_s - W = 0 \quad F_s = kz \Rightarrow kz = mg$$

$$k(12.0 \times 10^{-2} \text{ m} - 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}) = (2.0 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})$$

$$k = 9.8 \text{ N/m}$$

$$kz = mg \Rightarrow (9.8 \text{ N/m})z = (3.0 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) \Rightarrow$$

$$z = 3.0 \times 10^{-2} \text{ m} = 3.0 \text{ cm}$$

$$x = L - L_0 \Rightarrow 3.0 \text{ cm} = L - 1.0 \text{ cm} \Rightarrow L = 4.0 \text{ cm}$$

توجه: در حل مسئله‌های دینامیک به کمک قانون دوم نیوتن، معمولاً گویای متناهی نمی‌توانیم در نظر بگیریم که در حل مسائل مربوط به فنرها، فنر را به عنوان یک جسم در نظر بگیریم. بنابراین، فنر را به عنوان یک جسم در نظر نمی‌گیریم. به جای آن، فنر را به عنوان یک جسم در نظر می‌گیریم و نیروهای وارد بر آن را رسم و دستگاه مختصات را تعیین می‌کنیم. در این حالت، فنر را به عنوان یک جسم در نظر می‌گیریم و نیروهای وارد بر آن را رسم و دستگاه مختصات را تعیین می‌کنیم. در این حالت، فنر را به عنوان یک جسم در نظر می‌گیریم و نیروهای وارد بر آن را رسم و دستگاه مختصات را تعیین می‌کنیم.

مثال ۲-۹

در شکل رویه‌بردار، کارگری جعبه‌هایی 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؟

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 ۲-۷ طناب جسم و دست را با نیروی کشش T می‌کشد، حتی اگر جسم و طناب و دست دارای حرکت شتاب‌دار باشند.

مثال ۲-۹

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 گنج فهمی‌های مربوط به درس نیروی اصطکاک و کشش طناب را مشخص می‌کند. در بند پار تباط بین دینامیک و حرکت‌شناسی به وضوح دیده می‌شود.

مثال ۲-۹

فنری به طول $L_0 = 1.0 \text{ cm}$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنه 2.0 kg گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L = 12.0 \text{ cm}$ می‌رسد.

الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟
ب) اگر وزنه‌ای 3.0 kg 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.

ب)

$$F_s - W = ma \Rightarrow F_s - W = 0 \quad F_s = kz \Rightarrow kz = mg$$

$$k(12.0 \times 10^{-2} \text{ m} - 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}) = (2.0 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})$$

$$k = 9.8 \text{ N/m}$$

$$kz = mg \Rightarrow (9.8 \text{ N/m})z = (3.0 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) \Rightarrow$$

$$z = 3.0 \times 10^{-2} \text{ m} = 3.0 \text{ cm}$$

$$x = L - L_0 \Rightarrow 3.0 \text{ cm} = L - 1.0 \text{ cm} \Rightarrow L = 4.0 \text{ cm}$$

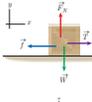
توجه: در حل مسئله‌های دینامیک به کمک قانون دوم نیوتن، معمولاً گویای متناهی نمی‌توانیم در نظر بگیریم که در حل مسائل مربوط به فنرها، فنر را به عنوان یک جسم در نظر بگیریم. بنابراین، فنر را به عنوان یک جسم در نظر نمی‌گیریم. به جای آن، فنر را به عنوان یک جسم در نظر می‌گیریم و نیروهای وارد بر آن را رسم و دستگاه مختصات را تعیین می‌کنیم. در این حالت، فنر را به عنوان یک جسم در نظر می‌گیریم و نیروهای وارد بر آن را رسم و دستگاه مختصات را تعیین می‌کنیم.

مثال ۲-۱۰

در شکل رویه‌بردار، کارگری جعبه‌هایی 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؟

مسئله ۱۸: چگونگی و سرعت خودروی



ب) اگر چرخه حرکت کند، شتاب حرکت آن را حساب کنید.
 (ب) سرعت چرخه را $9/10$ پس از حرکت بدست آورید. ($g = 9/10 \text{ m/s}^2$)
پاسخ: الف) شکل ساده‌ای از جسم مورد نظر (چرخه) رسم و نیروهای وارد بر آن را مشخص می‌کنیم. چون چرخه در راستای قائم حرکت ندارد، می‌توانیم بنویسیم:
 $F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (10 \cdot \text{kg})(9/10 \text{ N/kg}) = 90 \text{ N}$
 برای اینکه جسم شروع به حرکت کند، باید $T > f_{k, \text{max}}$ باشد. پس ابتدا $f_{k, \text{max}}$ را از معادله $f_k = \mu_k F_N$ بدست می‌آوریم:
 $f_{k, \text{max}} = \mu_k F_N = (0/30)(90 \text{ N}) = 27 \text{ N}$
 با توجه به اینکه $T = 31 \text{ N} > 27 \text{ N}$ است، چرخه شروع به حرکت می‌کند.
 (ب) نیرو اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت بر چرخه اثر می‌کند و برابر است با:
 $f_k = \mu_k F_N = (0/30)(90 \text{ N}) = 27 \text{ N}$
 $T - f_k = ma \Rightarrow 31 \text{ N} - 27 \text{ N} = (10 \cdot \text{kg})a \Rightarrow a = 0/4 \text{ m/s}^2$
 (ب) چون شتاب چرخه ثابت است، از رابطه سرعت - زمان در حرکت با شتاب ثابت روی مسیر مستقیم استفاده می‌کنیم:
 $v = at + v_0 \Rightarrow v = (0/4 \text{ m/s}^2)(6/0 \text{ s}) + (0 \text{ m/s}) \Rightarrow v = 2/4 \text{ m/s}$
 سرعت تیز در جهت محور x است.

تمرین ۶-۲



کارگری یک سطل محتوی مصالح به جرم $16/0 \text{ kg}$ را با طناب سبکی به طرف بالا می‌کشد. اگر طناب رو به بالای $1/17 \text{ m/s}^2$ باشد، نیروی کشش طناب چقدر است؟

مسئله ۱۰-۲



در شکل رویه برداشته به جرم $2/0 \text{ kg}$ به دیوار قائم بدون اصطکاک تکیه داده شده است. ضریب اصطکاک ایستایی بین زمین و پای تزیان $0/24$ است. در آستانه شلخوردن تزیان، الف) زمین به تزیان چه نیروی وارد می‌کند؟
 ب) چه نیروی از دیوار به تزیان وارد می‌شود؟
پاسخ: الف) نخست نیروهای وارد بر تزیان را رسم می‌کنیم که عبارتند از:
 نیروی عمودی سطح دیوار (F_N)، نیروی وزن (W)، نیروی عمودی سطح زمین (F_{N_1}) و نیروی اصطکاک ایستایی بین زمین و تزیان ($f_{s, \text{max}}$).

پاسخ تمرین ۶-۲

بر سطل دو نیروی کشش طناب (روبه بالا) و وزن (روبه پایین وارد می‌شود). اگر محور مختصات را روبه بالا انتخاب کنیم، می‌توانیم بنویسیم:

$$T - mg = ma \rightarrow T = mg + ma = m(g + a) = 16/0 \text{ kg} (9/10 \text{ m/s}^2 + 1/17 \text{ m/s}^2) = 176 \text{ N} \approx 1/8 \times 10^2 \text{ N}$$

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

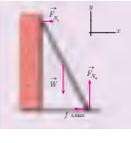
وارد بر جسم جلب کنیم و از آنها بخواهیم در حل مسائل تا آنجا که ممکن است نیروها را با مقیاس درست رسم کنند. می‌توانیم سؤالات مرتبط با این مثال را نیز مطرح کنیم؛ مثلاً اگر سطح افقی اصطکاک نداشته باشد و بین دیوار و نردبان اصطکاک وجود داشته باشد، آیا نردبان می‌تواند در شرایط ساکن باقی بماند؟ یا نیروی سطح دیوار 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، تکانه اش 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.

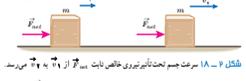
تجزیه ۳



یک دستگاه مختصات انتخاب می‌کنیم. در آنساخته حرکت، تزیان همچنان در حال تعادل است. بنابراین نیروی خالص در راستای قائم و افقی صفر است.
 $F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (20/0 \cdot \text{kg})(9/10 \text{ N/kg}) = 180 \text{ N}$
 $f_{s, \text{max}} = \mu_s F_N = (0/24)(180 \text{ N}) = 40/8 \text{ N} \Rightarrow F_N = 90/17 \text{ N}$
 از طرف زمین بر تزیان دو نیروی عمودی F_{N_1} و افقی $f_{s, \text{max}}$ وارد می‌شود. بنابراین برآیند این دو نیرو که آن را با \vec{R} نشان می‌دهیم، نیروی است که زمین بر تزیان وارد می‌کند:
 $\vec{R} = \vec{F}_{N_1} + \vec{f}_{s, \text{max}}$
 که بزرگی آن برابر است با:
 $R = \sqrt{F_{N_1}^2 + f_{s, \text{max}}^2} = \sqrt{(90/17 \text{ N})^2 + (40/8 \text{ N})^2} = 216 \text{ N}$
 (ب) برآیند نیروهای افقی وارد بر تزیان صفر است، پس:
 $F_{N_1} - f_{s, \text{max}} = 0 \Rightarrow F_{N_1} = f_{s, \text{max}} = 40/8 \text{ N}$
 در نبود نیروی اصطکاک بین تزیان و دیوار، نیروی F_{N_1} همان نیروی وارد از دیوار به تزیان است.

۳-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون

قانون نیوتون به ما امکان حل بسیاری از مسائل مکانیک را می‌دهد. 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:
 $\vec{F}_{\text{net}} = m \vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$



مثال ۳-۲: سرعت جهت‌ناقص نیروی خالص ثابت \vec{F}_{net} از t_1 به t_2 هر چند.
 با فرض ثابت بودن جرم جسم (m) می‌توانیم جرم را در کنار سرعت (\vec{v}) قرار دهیم.
 $\vec{F}_{\text{net}} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$
 حاصل ضرب جرم جسم (m) در سرعت آن (\vec{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.

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2m}(mv)^2 = \frac{P^2}{2m}$$

می‌توانیم از دانش آموزان 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 ۱۸: دینامیک و حرکت دایره‌ای

(۸-۲) (تکانه جسم)
 $\vec{p} = m\vec{v}$
 تکانه کمیتی برداری است زیرا سرعت، یک کمیت برداری و جرم، یک کمیت نرده‌ای است. جهت تکانه همان جهت سرعت است. برای تکانه SI یکای $kg \cdot m/s$ است. با توجه به تعریف تکانه، قانون دوم نیوتون برای نیروی ثابت را می‌توان چنین نوشت:

(۹-۲) (قانون دوم نیوتون برحسب تکانه برای نیروی ثابت)
 $\vec{F}_{net} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$
 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.

(۱۰-۲)
 $\Delta \vec{p} = \vec{F}_{net} \Delta t$

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 $1/10$ با سرعت $\vec{v} = (5/m/s)\hat{i}$ 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:
 $\vec{p} = m\vec{v} = (1/10 \times 10^{-3} kg)(5/m/s)\hat{i}$
 $= (5 \times 10^{-4} kg \cdot m/s)\hat{i} \Rightarrow P = 5 \times 10^{-4} kg \cdot m/s$
 ب) برای بدست آوردن انرژی جنبشی می‌توانیم از رابطه ۸-۲ یا $K = \frac{p^2}{2m}$ استفاده کنیم. در اینجا از رابطه اول استفاده می‌کنیم:
 $K = \frac{p^2}{2m} = \frac{(5 \times 10^{-4} kg \cdot m/s)^2}{2 \times (1/10 \times 10^{-3} kg)} = 1.25 \times 10^{-5} J$

در شرایط واقعی نیروی وارد بر یک جسم به ندرت ثابت است. اگر نیرو ثابت نباشد، معادله‌های داده شده را فقط برای بازه‌های زمانی ای می‌توان به کار برد که بسیار کوچک باشند و بتوان نیرو را در این بازه 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 (۸-۲) چنین می‌شود:
 $\vec{F}_{av} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ (نیروی خالص متوسط برحسب تکانه)
 این نتیجه به کارهای 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:

$$m_2 > m_1 \rightarrow \frac{p_2^2}{p_1^2} > 1 \rightarrow p_2 > p_1$$

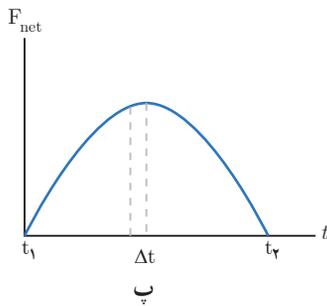
توجه

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

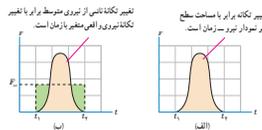
فرصتی را فراهم می‌کند تا در آن دانش‌آموزان تکانه و انرژی جنبشی یک جسم را تعیین کنند و به برداری بودن تکانه و نرده‌ای بودن انرژی جنبشی توجه داشته باشند.

بعد از مثال ۱۱-۲، به شرایط واقعی تر 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: $|\Delta \vec{p}| =$ 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.

تغییر تکانه یک جسم (یعنی $\Delta \vec{p} = \vec{F}_{net} \Delta t$) را می‌توان از مساحت زیر نمودار نیرو - زمان نیز به دست آورد (شکل ۱۹-۳).



شکل ۱۹-۳ تغییر تکانه برای هر دو نمودار نیروی خالص وارد بر یک جسم می‌تواند بر حسب زمان تغییر کند. سبب مقدار نیروی متوسط (F_{av}) خط چین افقی به گونه‌ای است که مساحت مستطیل $(F_{av}\Delta t)$ برابر با مساحت سطح زیر منحنی شکل الف باشد.

مثال ۱۲-۲



شکل رویه‌رو صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم 1200 kg به دیوار برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب 57 km/h و 47 km/h باشد و تصادف 0.85 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.

$$v_1 = +57 \text{ km/h} = +15 \text{ m/s}, v_2 = -47 \text{ km/h} = -13 \text{ m/s}$$

$$p_1 = mv_1 = (1200 \text{ kg})(15 \text{ m/s}) = +1.8 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s} = +1.8 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

$$p_2 = mv_2 = (1200 \text{ kg})(-13 \text{ m/s}) = -1.56 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

$$\Delta p = (-1.56 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}) - (+1.8 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}) = -3.36 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

ب) نیروی متوسط وارد بر اتومبیل با استفاده از رابطه ۱-۲ برابر است با:

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-3.36 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}}{0.85 \text{ s}} = -3.95 \times 10^4 \text{ N}$$

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، برگردد نیروی متوسط وارد بر خودرو کوچک‌تر از مقداری است که اکنون به دست آوردیم.

۴-۲ حرکت دایره‌ای یکپارچه

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 ۴-۲).

نظر دانش‌آموزان را به سطح زیر نمودار $F-t$ و $F_{av}-t$ جلب می‌کنیم. آنها باید به این موضوع برسند که مساحت سطح زیر نمودار $F_{av}-t$ (مستطیل نشان داده شده) برابر با مساحت سطح زیر نمودار $F-t$ است.

توجه داریم در رابطه ۱۱-۲، اگر 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 ($p_1 = p_2$) همچنین در رابطه ۱-۲، اگر 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).

تمرین پیشنهادی

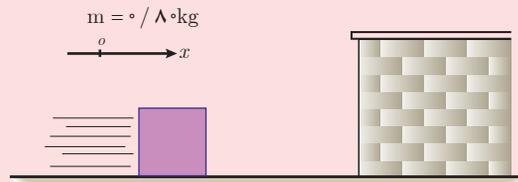
در شکل زیر جسمی با تندی 5 m/s به دیوار برخورد کرده و با تندی 2 m/s برمی‌گردد. اگر زمان برخورد 0.2 s باشد؛

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 ($F_{av} = -(28\text{ N}) \vec{i}$)



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 شاره ضربه‌گیر 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 $10^{-2} \text{ kg} \times 5/0$ ، 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 $2/0 \text{ cm}$ فرض می‌کنیم و با استفاده از رابطه $\Delta t = \frac{\Delta x}{v_{av}}$ زمان را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta t = \frac{2/0 \times 10^{-2} \text{ m}}{22 \text{ m/s}} = 9/1 \times 10^{-4} \text{ s}$$

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{+2/2 \text{ kgm/s}}{9/1 \times 10^{-4} \text{ s}} = +2/4 \times 10^3 \text{ N}$$

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 بر حسب 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 جراحات 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 $0/7 \text{ m}^2$ تا $0/9 \text{ m}^2$ 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 $1/9 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (28 lb/in^2) باشد. فشار ضربه $5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ($3/4 \text{ lb/in}^2$) 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 کمربندهای

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 ۰.۱s متوقف می‌شود. با استفاده $F_{av}\Delta t = mv_f - mv_i$ ، درمی‌یابیم که:

$$F_{av} = \frac{mv_f - mv_i}{\Delta t} = \frac{0 - (75 \text{ kg})(27 \text{ m/s})}{0.1 \text{ s}} = -2 \times 10^5 \text{ N}$$

و شتاب برابر است با:

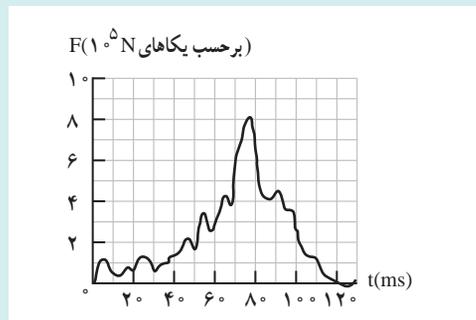
$$a = \left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = \frac{27 \text{ m/s}}{0.1 \text{ s}} = 270 \text{ m/s}^2 = \frac{270 \text{ m/s}^2}{9.8 \text{ m/s}^2} g = 28g$$

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:

$$\frac{F_{av}}{A} = \frac{2 \times 10^5 \text{ N}}{0.5 \text{ m}^2} \approx 4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

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 ۰.۱s 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 برحسب 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 ۱۰ ms تا شخصی را که با سرعت ۲۷m/s در حرکت است پیش از متوقف شدن در برابر میل فرمان در فاصله حدود ۳m/° 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 پر از 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 ۷۵kg را که با سرعت ۲۷m/s در حرکت است، کمربند ایمنی در ۱۵s/° متوقف کند، شخص در معرض نیروی متوسط ۹/۸kN، شتاب متوسط ۱۸g، و فشار تمام بدن $1 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ برای سطح تماس 0.5 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 وسایط 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.

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 ۱۹-۳).

تغییر تکانه برای با سمت سطح زیر نمودار نیرو-زمان است.

تغییر تکانه برای با سمت سطح زیر نمودار نیرو-زمان است.

شکل ۱۹-۳: الف) القای نیروی خالص وارده بر یک جسم می‌تواند موجب تغییر کند. ب) مقدار نیروی متوسط $F_{\text{متوسط}}$ (خط چین افقی) به‌گونه‌ای است که مساحت مستطیل $F_{\text{متوسط}} \Delta t$ برابر با مساحت سطح زیر منحنی شکل الف باشد.

مثال ۱۲-۲

شکل رویه‌رو صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم ۱۲۰۰ kg به دیواری برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب ۵۲/۰ km/h و ۹/۰۰ km/h باشد و تصادف ۰/۱۵ s طول بکشد، القای تغییر تکانه خودرو را پیدا کنید.

ب) اعزاز و جهت نیروی متوسط وارده بر خودرو را تعیین کنید.

پاسخ: الف) جهت محور z را به طرف راست انتخاب می‌کنیم و تکانه‌ها را با استفاده از رابطه ۲-۲ به دست می‌آوریم.

$$v_1 = +52.0 \text{ km/h} = +15.0 \text{ m/s} \quad \text{و} \quad v_2 = -9.00 \text{ km/h} = -2.50 \text{ m/s}$$

$$p_1 = mv_1 = (1200 \text{ kg})(15.0 \text{ m/s}) = +1.8 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s} \quad \text{و} \quad p_2 = +1.8 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

$$p_2 = mv_2 = (1200 \text{ kg})(-2.50 \text{ m/s}) = -3.0 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

$$\Delta p = (-3.0 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m/s}) - (+1.8 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}) = -2.1 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$$

با نیروی متوسط وارده بر اتومبیل با استفاده از رابطه ۲-۲ برابر است با:

$$F_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-2.1 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m/s}}{0.15 \text{ s}} = -1.4 \times 10^5 \text{ N}$$

یعنی نیروی خالص متوسطی که از دیوار به خودرو وارد می‌شود در خلاف جهت محور z (یعنی به طرف چپ) است. توجه داریم اگر خودرو پس از برخورد، برگردد نیروی متوسط وارده بر خودرو کوچک‌تر از مفاداری است که اکنون به دست آوردیم.

۳-۳ 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).

فصل ۱۶: دینامیک و حرکت دایره‌ای



شکل ۲۰-۳ حرکت جسمی مختلف در مسیرهای دایره‌ای

بدین منظور ذره‌ای را در نظر می‌گیریم که روی یک مسیر دایره‌ای با تندی ثابت حرکت می‌کند (شکل ۲۰-۲). به این نوع حرکت، حرکت دایره‌ای یکنواخت می‌گویند. با اینکه تندی جسم در این حرکت ثابت است، حرکت ذره شتاب‌دار است (جرأ!). 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 بسته شده و در یک مسیر دایره‌ای در حرکت است. صرف نظر از آنکه این ذره چه جسمی است، همواره بردار سرعت ذره (\vec{v}) هم‌مسیر بر مسیر حرکت دایره‌ای است.

پرسش ۲۰-۱

جرأ در حرکت دایره‌ای یکنواخت، ذره در بازه‌های زمانی برابر، مسافت‌های یکسانی را طی می‌کند؟

فهره: 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:

$(۱۲-۲)$	(دوره)	$T = \frac{2\pi r}{v}$
----------	--------	------------------------

یکای دوره، ثانیه، (s) است.

پرسش ۲۰-۲

دوره عقربه ثانیه‌شمار، دقیقه‌شمار و ساعت‌شمار یک ساعت عقربه‌ای چیست؟



۲۱

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 $\omega_{\text{دایره}}$ 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.

سوال ۱۳-۲

میل لنگ یک خودرو که قطر محور آن ۲/۰ cm است، در هر دقیقه ۲۴۰۰ دور می‌چرخد (۲۴۰۰ rpm). تندی نقطه‌ای روی لبه محور این میل لنگ چقدر است؟

پاسخ: ابتدا زمان یک دور، یعنی دوره تناوب آن را به روش تبدیل زنجیره‌ای محاسبه می‌کنیم:

$$T = \frac{1 \text{ min}}{2400 \text{ دور}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = \frac{1}{20} \text{ s} = 0.05 \text{ s}$$

با استفاده از رابطه $v = \frac{2\pi r}{T}$ و اینکه $r = 2/0 \text{ cm}$ است، تندی این نقطه برابر است با:

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2(3.14 \text{ rad})(2.0 \times 10^{-2} \text{ m})}{0.05 \text{ s}} = 5.0 \text{ m/s}$$

سوال ۱۴-۲

یوهان با لنگرد با دوره ۰/۲۰ s به طور یکنواخت می‌چرخد. الف) تعداد دور بر دقیقه (rpm) یوهان با لنگرد چقدر است؟ ب) اگر شعاع یوهان ۲/۰۰ m باشد، توک یوهان چه تندی‌ای می‌چرخد؟

پاسخ: الف) یک دور چرخش در زمان T انجام می‌شود، بنابراین تعداد دور در یک دقیقه (۶۰ s) برابر است با:

$$\text{rpm} = \left(\frac{60 \text{ s}}{T(s)} \right) \left(\frac{1 \text{ دور}}{1 \text{ min}} \right) = \left(\frac{60 \text{ s}}{0.20 \text{ s}} \right) \left(\frac{1 \text{ دور}}{1 \text{ min}} \right) = 300 \text{ دقیقه/دور}$$

ب) با توجه به رابطه $v = \frac{2\pi r}{T}$ می‌توان تندی حرکت توک یوهان با لنگرد را همین‌گونه کرد.

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2(3.14 \text{ rad})(2.0 \times 10^{-1} \text{ m})}{0.20 \text{ s}} = 62.8 \text{ m/s}$$

سوال ۱۵-۲

یک دیسک گردان در شهرسازی را در نظر بگیرید که توسط یک موتور الکتریکی در هر دقیقه ۵۰۰ دور می‌چرخد. فرض کنید افرادی در فاصله‌های ۰/۱۰ m، ۲/۰ m و ۳/۰ m از مرکز آن قرار دارند.

تندی این افراد را به دست بیاورید و با هم مقایسه کنید.

پاسخ: ابتدا دوره حرکت را محاسبه می‌کنیم.

$$T = \frac{1 \text{ min}}{500 \text{ دور}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 12/5 \text{ s}$$

برای محاسبه تندی افراد در فاصله‌های مختلف از مرکز دیسک چرخان، از رابطه ۱۳-۲ استفاده می‌کنیم.

عداد دور در دقیقه revolutions per minute

در مثال ۱۳-۲

تعداد دور در دقیقه (rpm) میل لنگ 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:

$$T = \frac{t}{n} = \frac{60 \text{ s}}{2400 \text{ دوره}} = \frac{1}{40} \text{ s} = 0.025 \text{ s}$$

این مثال یک مثال کاربردی در مورد خودروهاست. دانش‌آموزان rpm میل لنگ خودرو را از عقربه‌ای که در جلوی راننده قرار دارد می‌توانند بخوانند.

در مثال ۱۴-۲ دانش‌آموزان با همان رابطه ۱۳-۲ 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

$$T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$r_1 = 1/4 \text{ m} \Rightarrow v_1 = \frac{2\pi(1/4) \text{ rad}(1/4 \text{ m})}{1/2 \text{ s}} = 0.52 \text{ m/s}$$

$$r_2 = 2/4 \text{ m} \Rightarrow v_2 = \frac{2\pi(2/4) \text{ rad}(2/4 \text{ m})}{1/2 \text{ s}} = 1.04 \text{ m/s}$$

$$r_3 = 3/4 \text{ m} \Rightarrow v_3 = \frac{2\pi(3/4) \text{ rad}(3/4 \text{ m})}{1/2 \text{ s}} = 1.57 \text{ m/s}$$

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 حال بالا در مدت ۲/۵ ثانیه طی کرده‌اند محاسبه کنید.

شتاب مرکزگرا و قانون دوم نیوتون: در حرکت دایره‌ای یکنواخت، 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 ($a_{\text{avg}} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$) 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 ج). اندازه شتاب مرکزگرا از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad (\text{اندازه شتاب مرکزگرا}) \quad (22-2)$$

نوشته ۱۰-۳
نشان دهید در حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب مرکزگرا از رابطه $a_c = \frac{2\pi r}{T^2}$ نیز بدست می‌آید که در آن T و r به ترتیب دوره تناوب و شعاع دایره است.

۱۰-۳ (نوشته) در مثال شتاب (۱۰-۳) سرعته v همواره constant به معنای مرکزگرا است.

پاسخ تمرین ۸-۲
به کمک رابطه ۱-۱ می‌توانیم مسافت طی شده توسط افراد را محاسبه کنیم:

$$l_1 = v_1 \Delta t = (0.52 \text{ m/s})(3/5 \text{ s}) = 1.56 \text{ m}$$

$$l_2 = v_2 \Delta t = (1.04 \text{ m/s})(3/5 \text{ s}) = 3.12 \text{ m}$$

$$l_3 = v_3 \Delta t = (1.57 \text{ m/s})(3/5 \text{ s}) = 4.71 \text{ m}$$

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 یکنواخت شتاب‌دار است یا نه؟ چرا؟ اگر شتاب‌دار است جهت شتاب آن در کدام جهت است؟ البته دانش‌آموزان از بخش قبل در مورد شتاب‌دار بودن این حرکت بحث و گفت‌گو کرده‌اند. در اینجا باید بتوانند براساس طرح درس آورده شده در کتاب، جهت آن را بفهمند.

شکل‌های ۲۲-۲ الف، ب و پ صرفاً برای نشان دادن جهت Δv و اینکه در حالتی که Δt خیلی کوچک می‌شود، جهت شتاب با جهت Δv 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 a_c ها هم اندازه ولی جهت آنها در نقاط مختلف متفاوت است و همچنین 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}_2 از \vec{v}_1 است. $(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$

مسئله ۱۶-۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

$T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow v = \frac{2\pi r}{T}$

$v_1 = 1/4 \text{ m} \Rightarrow v_1 = \frac{2\pi(1/4)}{1/2} = \pi \text{ m/s}$

$v_2 = 2/4 \text{ m} \Rightarrow v_2 = \frac{2\pi(2/4)}{1/2} = 2\pi \text{ m/s}$

$v_3 = 3/4 \text{ m} \Rightarrow v_3 = \frac{2\pi(3/4)}{1/2} = 3\pi \text{ m/s}$

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 ۱۳-۲

مسافتی را که هر یک از افراد در مثال بالا در مدت $2/5$ طی کرده‌اند محاسبه کنید.

شکل ۱۳-۲

شتاب مرکزگرا و قانون دوم نیوتون: در حرکت دایره‌ای یکنواخت، اندازه سرعت ثابت است اما جهت آن دائماً تغییر می‌کند. به همین دلیل حرکت دایره‌ای، حرکتی شتاب‌دار است (شکل ۱۳-۲ الف و ب). در فصل ۱ دیدیم که شتاب متوسط، از نسبت تغییر سرعت به زمان تغییر آن بدست می‌آید ($a_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$) 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 $a_{\text{متوسط}}$ به طرف مرکز دایره خواهد بود. پس جهت شتاب لحظه‌ای نیز به طرف مرکز خواهد بود (شکل ۱۳-۲ ب). به همین دلیل به آن شتاب مرکزگرا می‌گویند و آن را با a_c نشان می‌دهند (شکل ۱۳-۲ ج). اندازه شتاب مرکزگرا از رابطه زیر بدست می‌آید:

(۱۳-۲) $a_c = \frac{v^2}{r}$ (اندازه شتاب مرکزگرا)

نوشته ۱۴-۲

نشان دهید در حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب مرکزگرا از رابطه $a_c = \frac{2\pi^2 r}{T^2}$ نیز بدست می‌آید که در آن T و r به ترتیب دوره تناوب و شعاع دایره است.

۵۱

پاسخ پرسش ۲-۱۰

از رابطه دوره و شتاب مرکزگرا استفاده می‌کنیم.

$a_c = \frac{v^2}{r}, T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow a_c = \frac{(\frac{2\pi r}{T})^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2} \Rightarrow a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$

با پاسخ دادن به این پرسش می‌توانیم رابطه بین دوره، شعاع چرخش ذره و شتاب مرکزگرا را پیدا کنیم.

مسئله ۱۶-۲: خودروی

خودروی در یک میدان به شعاع 100 m با تندی 360 km/h در حال دور زدن است. دوره و شتاب مرکزگرای خودرو را محاسبه کنید.

پاسخ: با توجه به داده‌های مسئله یعنی شعاع و تندی، می‌توانیم از رابطه‌های $T = \frac{2\pi r}{v}$ و $a_c = \frac{v^2}{r}$ برای محاسبه دوره و شتاب مرکزگرا استفاده کنیم. نخست تبدیل باگهار را انجام می‌دهیم و سپس کمیت‌های خواسته شده را بدست می‌آوریم:

$v = (360 \frac{\text{km}}{\text{h}}) (\frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}}) (\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}) = 100 \text{ m/s}$

$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(100 \text{ m})}{100 \text{ m/s}} = 6.28 \text{ s}$

$a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(100 \text{ m/s})^2}{100 \text{ m}} = 100 \text{ m/s}^2$

تمرین ۹-۲

شکل زیر به رسم حرکت سوسره ای را در مسابقه المپیک زمستانی نشان می‌دهد. سوسره روی یک سطح افقی در حال حرکت است. اگر تندی حرکت سوسره در کل مسیر 33 m/s باشد، شتاب مرکزگرای آن را در هر یک از بیج‌ها بدست آورید.

دیده‌ایم شتاب جسم در حرکت دایره‌ای یکنواخت در راستای شعاع دایره و جهت آن به طرف مرکز دایره است. از قانون دوم نیوتون می‌دانیم شتاب یک جسم را نیروی خالص وارد بر آن ایجاد می‌کند و شتاب جسم همواره در راستا و جهت نیروی خالص وارد بر جسم است. بنابراین، در حرکت دایره‌ای یکنواخت نیز یک نیروی خالص رو به مرکز، سبب ایجاد شتاب مرکزگرا می‌شود. به این نیروی خالص که منجر به حرکت دایره‌ای می‌شود، نیروی مرکزگرا می‌گوییم. وقتی جسم متصل به نخ را روی سطح افقی بدون اصطکاک می‌چرخانیم، درمی‌یابیم که باید نخ را دائماً بکشیم؛ یعنی نیروی مرکزگرا به آن وارد کنیم (شکل ۱۳-۲). نخ نیروی مرکزگرای را به جسم وارد می‌کند که آن را در مسیر دایره‌ای به حرکت وامی‌دارد. نیروی مرکزگرا نوع جدیدی از نیروی کشنده، نیروهای گرانشی یا الکتریکی می‌توانند نیروهای مرکزگرا را تأمین کنند؛ مثلاً نیروی گرانشی به طرف مرکز زمین، ماه را در مدارش تقریباً دایره‌ای نگه می‌دارد. الکتران‌های مداری اتم‌ها در مدل بور تحت تأثیر نیروی الکتریکی به طرف هسته در مدارهای خود می‌چرخند و ...

قانون دوم نیوتون ($F_c = ma_c$) را در حرکت دایره‌ای یکنواخت به صورت زیر می‌توانیم بنویسیم:

(۱۳-۲) $F_c = m \frac{v^2}{r}$ (قانون دوم نیوتون در حرکت دایره‌ای یکنواخت)

در این رابطه F_c بزرگی نیروی خالص وارد بر جسم در راستای شعاع و به طرف مرکز دایره است.

۵۲

مثال ۲-۱۶

یک تمرین معمولی برای پیدا کردن دوره شتاب مرکزگرای یک خودرو بر حسب کمیت‌های شعاع و تندی است.

تمرین ۲-۹

با حل این تمرین متوجه می‌شویم که شتاب مرکزگرای سوسرته در بیج دوم که شعاع آن کمتر است، بیشتر می‌باشد. پس نیروی مرکزگرای لازم برای چرخیدن در بیج‌های تند بیشتر است و احتمال خارج شدن از مسیر نیز بیشتر است. پس بهترین کار برای داشتن امنیت، آن است که در سر بیج‌ها، بالاخص بیج‌های با شعاع کم (بیج تند)، تندی یا اندازه سرعت را کاهش دهیم.

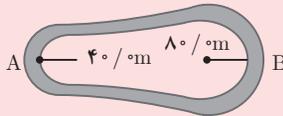
پاسخ:

$a_{c_1} = \frac{v^2}{r_1} = \frac{(34 \text{ m/s})^2}{33 \text{ m}} = 35 \text{ m/s}^2$

$a_{c_2} = \frac{v^2}{r_2} = \frac{(34 \text{ m/s})^2}{24 \text{ m}} = 48 \text{ m/s}^2$

تمرین پیشنهادی

یک پیست اتومبیل‌رانی طوری ساخته شده است که دو کمان به شعاع‌های 8 m در B و 4 m در A را با دو مسیر مستقیم به هم متصل می‌سازد. در یک دور آزمایشی راننده‌ای با تندی 5 m/s یک دور کامل می‌زند. شتاب مرکزگرا را در A و B به دست آورید.



پاسخ:

$$a_B = \frac{(5\text{ m/s})^2}{8\text{ m}} = 31/3\text{ m/s}^2 \quad \text{و} \quad a_A = \frac{(5\text{ m/s})^2}{4\text{ m}} = 62/5\text{ m/s}^2$$

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.

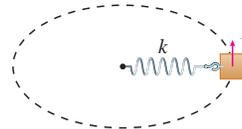
دانستنی

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 زرده و حرکت به طرف مرکز مانند بالا رفتن از یک تپه یا شیب تند است. در واقع، این نیرو به اصطلاح مرکزگرای 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 زرده جدا شده از آن دور می‌شود. شخص سوار در نقطه‌ای دور از مرکز فرود می‌آید نه «با فرار کردن از مرکز» در امتداد خط شعاعی بلکه، عمود بر خط شعاعی حرکت می‌کند و با افزایش جابه‌جایی شعاعی جابه‌جایی زاویه‌ای پیدا می‌کند.

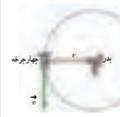
پاسخ مثال ۱۷-۲

در این مثال چهارچرخه روی سطح افقی حرکت می کند و فرض می شود کشش نخ نیز در راستای افقی است. جالب بودن این نوع مثال ها در این است که با داشتن شعاع حرکت، جرم و نیروی مرکزگرا می توانیم تندی حرکت و دوره حرکت را به دست آوریم و این توانایی مهمی برای دانش آموزان محسوب می شود. در این نوع مثال ها می توان به جای طناب از فنر نیز استفاده کرد. با دانستن ثابت فنر و مقدار تغییر طول آن، نیروی مرکزگرا مشخص می شود و طول فنر مساوی شعاع چرخش است. بقیه محاسبات نیز مانند مثال ۱۷-۲ خواهد بود.

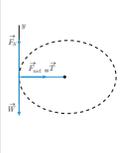


فصل ۱۳، جاذبه و حرکت دایره ای

سوال ۱۷-۲

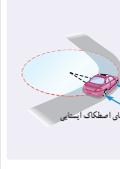


ببری فرزند ۲۰ کیلوگرمی خود را در یک چهارچرخه این ۵/۱ کیلوگرمی قرار می دهد و با یک طناب ۲/۰ متری، چهارچرخه را روی سطح افقی زمین به گونه ای می کشد تا چهارچرخه روی دایره ای حرکت کند. با فرض بیکواخت بودن حرکت چهارچرخه و صرف نظر کردن از اصطکاک و با فرض اینکه نیروی کشش طناب ۱۰۰ N باشد، تندی و دوره چهارچرخه را به دست آورید.



پاسخ: بچه چهارچرخه را به صورت یک ذره فرض می کنیم که در یک مسیر دایره ای با نیروی مرکزگرای ۱۰۰ N حرکت می کند. بر ذره سه نیروی وزن، نیروی عمودی سطح (در راستای عمودی و نیروی کشش نخ (مرکزگرا) به طرف مرکز دایره وارد می شود. نیروی وزن و نیروی عمودی سطح همدیگر را خنثی می کنند و بنابراین تنها نیروی T به عنوان نیروی جاذب در نظر گرفته می شود.
 $m = 20 \text{ kg}, r = 2/0 \text{ m}, F_{net} = T = 100 \text{ N}$
 $F_{net} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{r F_{net}}{m}} = \sqrt{\frac{(2/0)(100)}{20}} = 2/0 \text{ m/s}$
 دوره: $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(2/0)}{2/0} = 2/0 \text{ s}$

تمرین ۱۰-۲



خودرویی به جرم ۱۵۰۰ kg را در نظر بگیرید که می خواهد در یک پیچ مسطح افقی به شعاع ۵/۰ m بدون آنکه بلغزد، دور بزند. اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک و سطح جاده ۱/۰ باشد، حداکثر تندی خودرو چقدر می تواند باشد؟ (افشایی: با اینکه خودرو می خواهد یک چهارم دایره را طی کند، می توانیم خودرو را به صورت یک ذره در نظر بگیریم که در یک یک چهارم دایره، حرکت دایره ای بیکواخت دارد. در راستای عمود سطح، نیروی وزن و نیروی عمودی سطح بر خودرو وارد می شود و نیروی اصطکاک ایستایی که عمود بر راستای حرکت است، مانع از لغزش خودرو شده و به طرف مرکز پیچ بر خودرو وارد می شود. این نیرو شتاب مرکزگرای لازم را برای دور زدن تأمین می کند.)

۵-۲ نیروی گرانشی



وقتی سببی از یک درخت جدا می شود، چه نیروی سبب سقوط آن به طرف زمین می شود؟ وقتی سبب آبی را با پای می کشیم، چه نیروی سبب می شود آب به طرف زمین نشارش کند؟ چرا وقتی یک جسو را به بالا پرتاب می کنیم پس از مدتی به پایین می افتد؟ منشأ نیروی مرکزگرای که سبب چرخش ماه به دور زمین می شود چیست؟ زمین به همراه هفت سیاره دیگر نیز به دور خورشید می چرخد؛ منشأ نیروی مرکزگرای وارد بر زمین و سیارات دیگر چیست؟

شکل ۵-۲۳ اگر بر ماه نیروی وارد شود ماه باید به طور مستقیم حرکت کند که به صورت دایره ای

پاسخ تمرین ۱۰-۲

هدف از این تمرین ارائه یک مثال کاربردی در دور زدن خودروها در پیچ های مسطح و افقی یا میدان های درون شهری است. در این نوع مثال ها نیروی مرکزگرا را نیروی اصطکاک ایستایی بین لاستیک ها و جاده که عمود بر راستای حرکت است، تأمین می کند. اگر این نیرو که باعث شتاب مرکزگرا می شود به طور ناگهانی از بین برود، خودرو در امتداد خط مماس بر حرکت دایره ای به پیش می رفت و از مرکز میدان دور می شد.

$$F_{net} = ma \rightarrow f_s = m \frac{v^2}{r}$$

پاسخ: در حالت کلی:

برای حالتی که f_s بیشینه است و خودرو با تندی حداکثر می تواند حرکت کند:

$$f_{s,max} = m \frac{v_{max}^2}{r}, f_{s,max} = \mu_s F_N = \mu_s mg$$

$$\mu_s mg = m \frac{v_{max}^2}{r} \rightarrow v_{max} = \sqrt{\mu_s r g} = \sqrt{(1/0)(50/0 \text{ m})(10 \text{ m/s}^2)} = 10 \sqrt{5} \text{ m/s} \approx 22 \text{ m/s} = 81 \text{ km/h}$$

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 می تواند با تندی نسبتاً زیاد از پیچ عبور کند. اگر جاده مرطوب یا یخ زده باشد، مقدار μ_s می تواند ۰/۲ یا کمتر شود. در این شرایط نیروی مرکزگرای ناشی از اصطکاک ایستایی برای نگه داشتن خودرو در مسیر دایره ای به اندازه کافی بزرگ نیست و ممکن است خودرو روی خط مماس بر مسیر دایره ای سُر بخورد و از جاده خارج شود.

تمرین پیشنهادی

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؟ شاهکار نیوتون این بود که تشخیص داد همان نیرویی که سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود (نیروی گرانش بین زمین و ماه) سبب سقوط یک سیب به طرف زمین می‌گردد (نیروی گرانش بین زمین و سیب). پس از آموزش این بخش باید دانش‌آموزان بتوانند به سؤالات مطرح شده در 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 ۱۸، جبرئیل و حرکت دایره‌ای

مثال ۱۷-۲

هری فروتن ۲۰ کیلوگرمی خود را در یک چهارچرخهٔ ایمن ۵۰ کیلوگرمی قرار می‌دهد و با یک قطب ۲۰۰ نری، 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 قطب ۱۰۰ N باشد، تندی و دورهٔ چهارچرخه را به دست آورید.

پاسخ: بجه و 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 حاصل در نظر گرفته می‌شود.

$$m = 20 \text{ kg}, r = T \cdot m, F_{\text{net}} = T = 100 \text{ N}$$

$$F_{\text{net}} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{F_{\text{net}} \cdot r}{m}} = \sqrt{\frac{(100 \text{ N})(0.5 \text{ m})}{20 \text{ kg}}} = 1 \text{ m/s}$$

$$T = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{100 \text{ N}}{20 \text{ kg}} = 5 \text{ m/s}^2$$

دوره: $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(0.5 \text{ m})}{1 \text{ m/s}} = \pi \text{ s}$

تمرین ۱۸-۱

خودرویی به جرم 1500 kg را در نظر بگیرید که می‌خواهد در یک پیچ مسطح افقی به شعاع 50 m بدون آنکه بلغزد، دور بزند. اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک و سطح جاده $1/10$ باشد، حداکثر تندی خودرو چقدر می‌تواند باشد؟ (راهنمایی: با اینکه خودرو می‌خواهد یک چهارم دایره را طی کند، می‌توانیم خودرو را به صورت یک ذره در نظر بگیریم که در یک چهارم دایره، حرکت دایره‌ای بکواخت دارد. در راستای عمود بر سطح، نیروی وزن و نیروی عمودی سطح و خودرو وارد می‌شود و نیروی اصطکاک ایستایی که عمود بر راستای حرکت است، مانع از لغزش خودرو نشده 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 سبب از بالای درخت می‌افتد، چه نیرویی سبب می‌شود آن به طرف زمین شتاب بگیرد؟ وقتی سبب از بالای درخت می‌افتد، چه نیرویی سبب می‌شود آن به طرف زمین شتاب بگیرد؟

کدام 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 سیارهٔ دیگر نیز به دور خورشید می‌چرخند؛ منشأ نیروی مرکزگرای وارد بر زمین و سیارات دیگر چیست؟

شکل ۱۸-۲: اگر به ماه نیرویی وارد نشود ماه به دور زمین به صورت مستقیم حرکت کند نه به صورت دایره‌ای

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.

فصل ۱۸، جبرئیل و حرکت دایره‌ای

تا سال ۱۶۸۷ داده‌های زیادی در مورد حرکت ماه و سیارات گردآوری شده بود، اما کسی نتوانست توضیحی از نیروهای مؤثر بر آنها بدهد. در آن سال ایزاک نیوتون، دانشمند انگلیسی، با انتشار کتاب اصول خود را از این معما رهایی داد.

این معما را بیان کرد. از قانون‌های نیوتون می‌دانیم که با فرض اینکه نیروی حاصل بر ماه وارد شود، اگر چنین بود، ماه به جای مدار تقریباً دایره‌ای می‌گردد زمین، باید روی خط راست حرکت می‌کرد. نیوتون استدلال کرد که این نیرو کششی از نیروی جاذبهٔ بین ماه و زمین است و گفت این نیرو همان نیروی است که اجسام نزدیک به سطح زمین به سمت سیب را جذب می‌کند. نیوتون نشان داد هر جسمی در عالم، اجسام دیگری را به خود جذب می‌کند و این الهمبختی اورا برای قانون گرانش عمومی بوده است که بیان می‌دارد:

نیروی گرانشی میان دو ذرهٔ A با حاصل ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصلهٔ آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.

$$F_{12} = -F_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = F$$

اگر مطابق شکل ۱۸-۲، جرم دو ذره m_1 و m_2 و فاصلهٔ آنها از یکدیگر r باشد، اندازهٔ نیروی گرانشی میان دو ذره جی F از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (18-2)$$

در این رابطه، G ثابت گرانش عمومی نام دارد و برابر است با:

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$$

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 رابطه ۱۸-۲، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F_{12} = F_{21} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(7.36 \times 10^{22} \text{ kg})}{(3.84 \times 10^8 \text{ m})^2} = 1.99 \times 10^{20} \text{ N}$$

این نیرو سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود.

اگر فاصلهٔ دو جسم از یکدیگر زیاد باشد، چون از ایستگاه فضا که از جسم به فاصلهٔ آنها بسیار کم است، می‌توان به جسم را دور نظر کرد.

© Hensy Cengage

مثال ۲-۱۸

با حل این مثال دانش آموز متوجه می‌شود، با اینکه فاصله ماه از زمین نسبتاً زیاد است اما نیروی گرانشی همچنان بزرگ بوده و سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود (البته زمین و ماه بر اثر نیروی گرانش وارد بر یکدیگر حول مرکز جرم زمین و ماه که تقریباً در فاصله سه چهارم از مرکز زمین قرار دارد می‌چرخند). نکته دیگری که در این مثال باید به آن توجه کرد این است که؛ فاصله دو کره در این مثال خیلی بزرگ‌تر از قطر کره‌هاست. بنابراین می‌توان کره‌ها را به صورت دو ذره فرض کرد که جرم آنها در مرکز کره‌ها قرار دارند.

تاسل ۱۹۸۷ داده‌های زیادی در مورد حرکت ماه و سیارات گردآوری شده بود، اما کسی نتوانست درستی از نیروهای مؤثر بر آنها نامشود. در آن سال ایزاک نیوتون، دانشمند انگلیسی، با انتشار کتاب اصول خود از این معادرا بیان کرد. از قانون‌های نیوتون می‌دانیم که با نیروی جاذبه و ماه وارد شود. اگر چنین نبود، ماه به جای مدار تقریباً دایره‌ای به گرد زمین پایدوری خط راست حرکت می‌کرد. نیوتون استدلال کرد که این نیروی جاذبه از نیروی جاذبه 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 جاذبه‌ها را برای قانون گرانش عمومی خود است که بیان می‌دارد:

نیروی گرانشی میان دو ذره با حاصل ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصله آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.

اگر مطابق شکل ۲۵۰-۲، 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 بدست می‌آید:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (۱۵-۲)$$

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 آموزشی: ثابت گرانش G را اولین بار هنری کاولنڈر در سال ۱۷۹۸ اندازه‌گیری کرد. در مورد روش اندازه‌گیری G توسط هنری کاولنڈر 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 $7.34 \times 10^{22} \text{ kg}$ 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 می‌کنند پیدا کنید. پاسخ: فاصله دو کره در این مثال خیلی بزرگتر از قطر کره‌هاست. بنابراین می‌توان کره‌ها را ذره فرض کرد. به کمک رابطه ۱۵-۲، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F_g = F_{12} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(7.34 \times 10^{22} \text{ kg})}{(3.84 \times 10^8 \text{ m})^2} = 1.99 \times 10^4 \text{ N}$$

این نیرو سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود.

اگر فاصله جسم از یکدیگر بیان داشته باشد که برای آن واحد هر یک از دو جسم در فاصله آنها مشخص می‌کند، می‌توان در صورت در نظر گرفتن G ، Henry Cavendish

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 نمی‌شود. مثلاً یک فرد کنار یک خودرو ایستاده است، نیروی گرانشی بین شخص و خودرو محاسبه نمی‌شود.

۲- وقتی کره‌ها همگن باشند؛ حتی اگر فاصله آنها زیاد هم نباشند، می‌توان جرم کل کره را در مرکز آن در نظر گرفت و از رابطه نیروی گرانشی بین دو ذره را محاسبه کرد.

فصل ۱۱: جنبش دایره‌ای و حرکت دایره‌ای

مثال ۲-۱۹: دو کره همگن به جرم‌های 800 kg و 1200 kg در نظر بگیرید که فاصله مرکز آنها از یکدیگر 100 m است. نیروی گرانشی را که این دو کره بر یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه کنید. پاسخ: برای محاسبه نیروی که دو کره همگن به هم وارد می‌کنند می‌توانیم فرض کنیم همه جرم‌های دو کره در مرکز آنها قرار دارد. بنابراین کره‌ها را به صورت ذراتی در نظر می‌گیریم که همان جرم کره‌ها را داشته باشند. به کمک رابطه ۱۵-۲، نیروی گرانشی را که دو کره به یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(800 \text{ kg})(1200 \text{ kg})}{(100 \text{ m})^2} = 6.74 \times 10^{-7} \text{ N}$$

همان‌طور که محاسبه این مثال نشان می‌دهد، نیروی گرانشی میان جسم‌های با جرم کوچک قابل ملاحظه نیست.

مثال ۲-۲۰: ماهواره‌ها در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار تقریباً دایره‌ای به دور زمین می‌چرخند. اگر جرم ماهواره 2000 kg و فاصله آن از سطح زمین 2600 km باشد، کمیت‌های زیر را محاسبه کنید: الف) نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین ب) تندی مداری ماهواره ج) دوره گردش ماهواره $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ ، $M_E = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ، $R_E = 6400 \text{ km}$ پاسخ: ماهواره را به صورت ذره و زمین را به صورت کره‌ای همگن که جرم آن در مرکز آن قرار دارد در نظر می‌گیریم و به کمک رابطه ۱۵-۲، نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه می‌کنیم. الف)

$$r = R_E + h = 6400 \text{ km} + 2600 \text{ km} = 9000 \text{ km} = 9.0 \times 10^6 \text{ m}$$

$$F = G \frac{M_E m}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(2000 \text{ kg})}{(9.0 \times 10^6 \text{ m})^2} = 9.85 \text{ N}$$

ب) از رابطه ۲-۱۴، برای پیدا کردن تندی ماهواره استفاده می‌کنیم:

$$F_{\text{نیروی}} = m \frac{v^2}{r} = 9.85 \text{ N} = (2000 \text{ kg}) \frac{v^2}{9.0 \times 10^6 \text{ m}} \Rightarrow v = 6.66 \times 10^3 \text{ m/s}$$

ب) با استفاده از رابطه بین سرعت و دوره یعنی رابطه ۲-۱۳، می‌توانیم دوره را محاسبه کنیم:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi (9.0 \times 10^6 \text{ m})}{6.66 \times 10^3 \text{ m/s}} = 8.4 \text{ s} = 2/23 \text{ h}$$

یعنی این ماهواره در هر $2/23$ یک بار به دور زمین می‌چرخد.

مثال ۲-۲۰

مثال مهمی است که در آن دانش آموزان متوجه می‌شوند:

۱- نیروی مرکزگرای لازم برای چرخش ماهواره به دور زمین را نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین تأمین می‌کند.

۲- با دانستن فاصله ماهواره از زمین، می‌توان تندی ماهواره،

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 ۲-۱۱

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.

$$F = m \frac{v^2}{r} \rightarrow G \frac{M_e m}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \rightarrow \quad \text{(الف)}$$

$$r^3 = \frac{GM_e T^2}{4\pi^2} \rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{GM_e T^2}{4\pi^2}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2)(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(86400 \text{ s})^2}{4(3.14)^2}}$$

$$= 1.05 \sqrt[3]{754979/5974} \text{ m} = 4.23 \times 10^7 \text{ m}$$

(ب)

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi(4.23 \times 10^7 \text{ m})}{86400 \text{ s}} = 3.08 \times 10^3 \text{ m/s}$$

فیزیک ۳

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 $24/0$ یکسان 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

نتوان دهد 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 مطلقاً 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 جرم جسم را با m ، جرم زمین را با M_e و شعاع زمین را با R_e نمایش دهیم، وزن جسم روی سطح زمین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = G \frac{M_e m}{R_e^2} \quad \text{(وزن جسم در سطح زمین) (۲-۱۴)}$$

شکل ۲-۱۴: وزن روی نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند.

تمرین ۱۲-۲

نتوان دهد 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 پرسش ۲-۱۱

متناسب بودن T^2 با r^3 قانون سوم کیپلر است که به کمک قانون 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:

$$W = G \frac{M_e m}{(R_e + h)^2}$$

تاریخ: ۳۰

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 $24/0$ h یکسان باشد. (الف) در چه فاصله‌ای از زمین می‌توان این مدار هنگام با زمین را یافت؟ (ب) تندی مداری این ماهواره چقدر است؟

پوشش ۱۳-۲

تشان دهنده 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 مطلقاً 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 نمایش دهیم، وزن جسم روی سطح زمین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = G \frac{Mm}{R^2} \quad (\text{وزن جسم در سطح زمین}) \quad (۱۴-۲)$$

شکل ۲-۲۴: وزن نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند.

تمرین ۱۲-۲

تشان دهنده شتاب گرانشی روی زمین برابر است با: $g = G \frac{M}{R^2}$

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. ($R = 6380 \text{ km}$)

Obital of Synchronous Satellites

۵۶

پاسخ تمرین ۲-۱۲
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 ۲-۱۳: الف)

$$F = m \frac{v^2}{r} \rightarrow G \frac{M_e m}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \rightarrow v^2 = \frac{GM_e}{r} \rightarrow r = \frac{GM_e}{v^2} \rightarrow$$

$$r = \frac{(6/67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2)(5/98 \times 10^{24} \text{ kg})}{(7560 \text{ m/s})^2} = 698 \times 10^4 \text{ m} = 6/98 \times 10^3 \text{ km}$$

$$r = R_e + h \rightarrow h = r - R_e = 6/98 \times 10^3 \text{ km} - 6400 \text{ km}$$

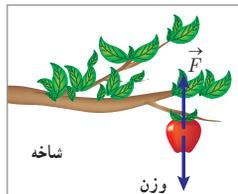
$$h = 580 \text{ km}$$

$$\frac{W}{W_e} = \frac{R_e^2}{(R_e + h)^2} = \left(\frac{6380 \text{ km}}{6980 \text{ km}} \right)^2 = 0/835 \quad (\text{ب})$$

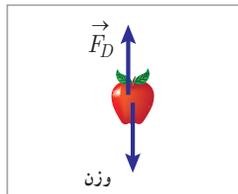
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2 \times 3/14 \times 6/98 \times 10^3 \times 10^3 \text{ m}}{7560 \text{ m/s}} = 5/8 \times 10^3 \text{ s} = 1/6 \text{ h} \quad (\text{پ})$$

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۱ الف) وقتی سیب به شاخه آویزان است، نیرویی از طرف شاخه به طرف بالا به سیب وارد می‌شود و نیروی وزن که از طرف زمین به سیب وارد می‌شود به طرف پایین است. در این حالت این دو نیرو هم اندازه بوده و 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 $\vec{}$).



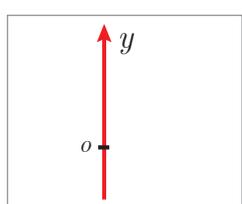
واکنش وزن سیب، نیروی گرانشی است که از طرف سیب به زمین وارد شده و آن را به طرف بالا می‌کشد (\vec{W}').
در حالتی که سیب در حال سقوط کردن است:

۱-۳ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص

۱. سیب را در نظر بگیرید که به شاخه درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.
(الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. (ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟
۲. دانش‌آموزی به جرم 50 kg روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ (الف) $(a=9.8\text{ N/kg})$
(الف) آسانسور ساکن است.
(ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
(پ) آسانسور با شتاب $1/2\text{ m/s}^2$ به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.
(ت) آسانسور با شتاب $1/2\text{ m/s}^2$ به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.
۳. در شکل نشان داده شده، نخس با نیروی 200 N جسم 40 kg کیلوگرمی را هل می‌دهد. اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه 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، نخس با نیروی 200 N جسم را هل دهد، ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

۱-۴ در شکل روبه‌رو وقتی وزنه 2 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 12 cm می‌شود، و وقتی وزنه 5 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.
(پ) قایقی در حال بارو زدن است.
(ت) چرخش‌ری در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.
(ث) هواپیمایی در یک سطح و زاویه افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.
۳. جی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد. (الف) زمانه برخوردی که با سرعت 2 m/s در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دین نامی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت 200 m توقف می‌نماید.
(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؟
۴. جرم خودرو را 1200 kg فرض کنید.
(الف) چرخش‌ری از یک بانکد تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌برد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چرخش‌ری را از لحظه پرتی تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

واکنش نیروی 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.

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = W + ma = mg + ma \quad \text{(الف)}$$

$$a = 0$$

$$F_N = mg + 0 = (50/9.8\text{ kg}) (9.8\text{ N/kg}) = 490\text{ N}$$

(ب) وقتی آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند باز هم شتاب صفر است ($a=0$)

$$F_N = mg + 0 = (50/9.8\text{ kg}) (9.8\text{ N/kg}) = 490\text{ N}$$

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

$$F_N = mg + ma = (50/9.8\text{ kg}) (9.8\text{ N/kg}) + (50/9.8\text{ kg}) (1/2\text{ m/s}^2) = 550\text{ N}$$

$$a = -1/2\text{ m/s}^2 \quad \text{(ت)}$$

$$F_N = mg + ma = (50/9.8\text{ kg}) (9.8\text{ N/kg}) + (50/9.8\text{ kg}) (-1/2\text{ m/s}^2) = 430\text{ N}$$

۳ الف) در هر دو حالت جسم ساکن است و نیروی اصطکاک ایستایی در خلاف جهت نیروی \vec{F} بر جسم وارد می‌شود.

$$F_N = 200 \text{ N}, a = 0, v = 0$$

$$F - f_s = ma \rightarrow f_s = F = 200 \text{ N}$$

$$F_T = 300 \text{ N}, a = 0, v = 0$$

$$F_T - f_{s, \max} = ma \rightarrow f_{s, \max} = F_T = 300 \text{ N}$$

(ب)

$$f_{s, \max} = \mu_s F_N, F_N = mg \rightarrow 300 \text{ N} = \mu_s (90 \text{ kg}) \times (9.8 \text{ N/kg})$$

$$\mu_s = \frac{300 \text{ N}}{(90 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})} = 0.34$$

(پ)

$$f_k = \mu_k F_N = \mu_k (mg) = (0.20)(90 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 176.4 \text{ N}$$

جهت محور افقی را به طرف راست انتخاب می‌کنیم :

پرستش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۳۳. در شکل زیر، وزنه‌ی ۲۰۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم. طول فنر ۱۴۰ cm می‌شود، و وقتی وزنه ۵۰۰ kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر ۱۵۰ cm می‌شود.

الف) ثابت فنر چقدر است؟ (به طول عادی فنر بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

ب) اگر فنر را از نواده 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) کششی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.

ب) تانک‌های در حال پارو زدن است.

ت) چترپازی در هوای آرام و در امداد قائم در حال سقوط است.

ت) هواپیمایی در یک سطح و زاویه افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.

ج) گوی در راستای قائم به زمین می‌خورد می‌کند و برمی‌گردد.

د) راننده خودرویی که با سرعت 72 km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مأمور ایستادن پلیس و خودرو پس از طی مسافت 200 m متوقف می‌شود.

الف) ثابت فنر خودروه در مدت ترمز چقدر است؟

ب) از لحظه ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟

ب) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟

ج) جرم خودرو را 1400 kg فرض کنید.

د) چترپازی از یک بالگرد تقریباً سانی که در ارتفاع نسبتاً زیادی فرار دارد، به بیرون می‌برد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترپاز را از لحظه روشن تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از شدت آن بر حسب زمان رسم کنید.




۴

$$F - f_k = ma \rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} = \frac{200 \text{ N} - 176.4 \text{ N}}{90 \text{ kg}} = 0.26 \text{ m/s}^2$$

$$F_e - mg = ma, a = 0 \Rightarrow F_e = mg$$

$$F_e = kx, x = l_f - l_0 \Rightarrow k(l - l_0) = mg$$

الف)

$$k(1.4 \text{ m} - l_0) = (40 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})$$

$$k(1.5 \text{ m} - l_0) = (50 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})$$

$$k(1.5 \text{ m} - l_0) - k(1.4 \text{ m} - l_0) = 9.8 \text{ N} \rightarrow k = 98 \text{ N/m}$$

(ب) مقدار به دست آمده را در یکی از روابط بالا قرار می‌دهیم :

$$(98 \text{ N/m})(1.4 \text{ m} - l_0) = (40 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})$$

$$l_0 = 1.0 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

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 از زمین نیز چرخ‌ها را به جلو هل می‌دهد که به این نیرو، نیروی پیشران می‌گویند (پیشران \vec{F})).

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

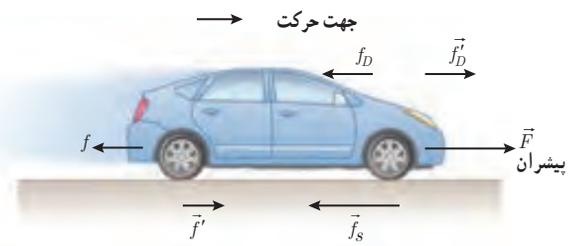
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۱-۳ و ۲-۳ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص
 ۱. سسی را در نظر بگیرید که به شاخه درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.
 الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سسی را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. (با هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟)
 ۲. دالتن آموزی به جرم 5000 kg روی یک ترازوی فیزی در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ (با $g=9.8 \text{ m/s}^2$)
 الف) آسانسور ساکن است.
 ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
 ج) آسانسور با سرعت 1.7 m/s به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.
 د) آسانسور با سرعت 1.7 m/s به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.
 ۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 100 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. وی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آنسأله 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؟
 ج) 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 خواهد بود؟

۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنه 200 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 140 cm می‌شود، و وقتی وزنه 500 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 150 cm می‌شود.
 الف) ثابت فنر چقدر است؟ (با طول عادی فنر بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟
 ب) اگر فنر از نواده زیر نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟
 ج) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.
 الف) کشش‌های با سرعت ثابت در حال حرکت است.
 ب) تانکرهای در حال بار و زدن است.
 ج) چرخ‌های در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.
 د) تانکرهایی در یک سطح و برای افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.
 الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین چرخ و زمین چقدر است؟
 ب) نیروی اصطکاک جنبشی بین چرخ و زمین چقدر است؟
 ج) نیروی اصطکاک ایستایی بین چرخ و زمین چقدر است؟
 د) نیروی اصطکاک جنبشی بین چرخ و زمین چقدر است؟

برخلاف جهت حرکت خودرو از طرف زمین وارد می‌شود (\vec{f}). لاستیک‌ها نیز نیرویی در خلاف جهت \vec{f} به زمین وارد می‌کنند (\vec{f}').

از طرف سطح زمین نیروی عمودی سطح \vec{F}_N روبه بالا بر خودرو وارد می‌شود که واکنش آن از طرف خودرو به طرف پایین به سطح زمین وارد می‌شود. همچنین وزن خودرو از طرف زمین بر آن به طرف مرکز زمین وارد می‌شود (\vec{W}) و واکنش وزن از طرف خودرو به زمین رو به بالا وارد می‌شود (\vec{W}').

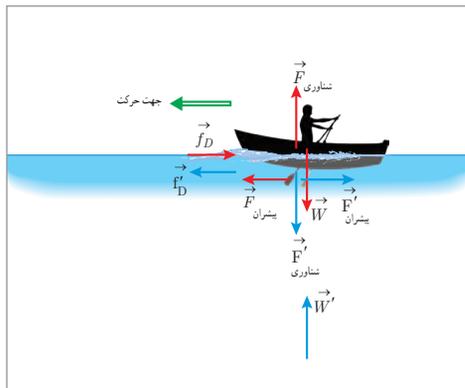
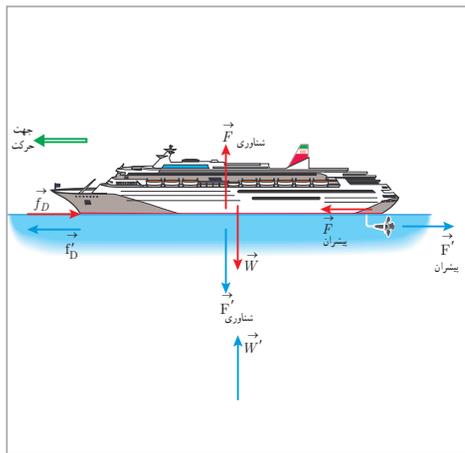


ب) \vec{f}_D : نیروی مقاومت شاره (آب) در خلاف جهت حرکت از طرف شاره بر کشتی وارد می‌شود.

\vec{F} : نیروی شناوری که از طرف شاره (آب) به طرف بالا بر کشتی وارد می‌شود.

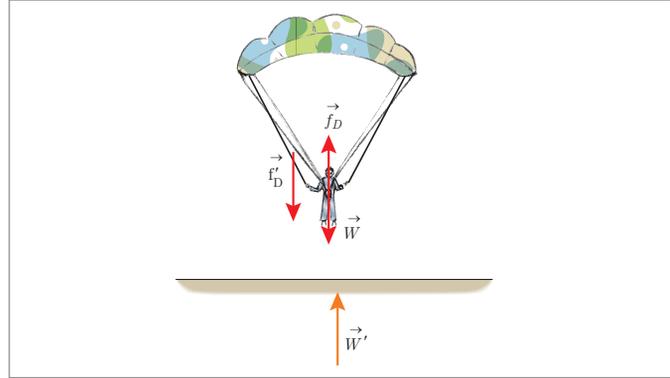
\vec{W} : نیروی وزن که از طرف زمین به جسم به طرف پایین وارد می‌شود.

\vec{F} : 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، شناوری 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.

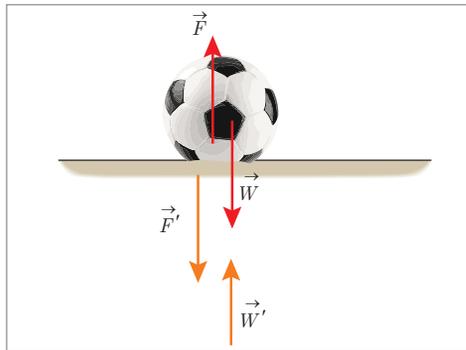
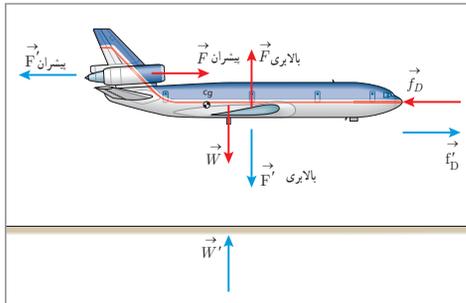


ث) علاوه بر وزن و مقاومت هوا، دو نیروی دیگر نیز بر هواپیما وارد می‌شود. نیروی بالابری (بالبری \vec{F}) که به علت اختلاف فشار لایه هوایی زیر بال و بالای بال به وجود می‌آید و نیروی پیشران وقتی موتور هواپیما روشن بوده و کار می‌کند، مخلوط سوخت و هوا با شدت زیادی به طرف عقب هل داده می‌شود (رانده می‌شود) و 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

۳-۱ و ۳-۲ قوانین حرکت نیوتون و تعریف برخی از نیروهای خاص
 ۱. سعی را در نظر بگیرید که به شناخته‌ی درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌نمود.
 الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سبب را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. (با در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟)
 ۲. دانش‌آموزی به جرم 50 kg روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ ($g = 9.8\text{ N/kg}$)
 الف) آسانسور ساکن است.
 ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
 ج) آسانسور با شتاب 1 m/s^2 به طرف بالا تیراج به حرکت می‌کند.
 د) آسانسور با شتاب 1 m/s^2 به طرف پایین تیراج به حرکت می‌کند.
 ۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 100 kg کلوزگرمی را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آنسأله حرکت قرار می‌گیرد.
 الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟
 ب) ضریب اصطکاک جنبشی بین جسم و سطح چقدر است؟
 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 جسم چقدر خواهد شد؟

۳-۳ در شکل رویه‌ی برفی و قوس 200 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 10 cm می‌شود، و وقتی وزنه 500 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 150 cm می‌شود.
 الف) ثابت فنر چقدر است؟ (با طول عادی فنر بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟
 ب) فنر 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) قایق‌ای در حال پارو زدن است.
 د) جریزایی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.
 ه) هواپیمایی در یک سطح افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.
 ج) آبی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.
 د) راننده خودرویی که با سرعت 72 km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دین ماهی اقدام به تیرز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت 200 m متوقف می‌شود.
 الف) شتاب خودرو در مدت تیرز چقدر است؟
 ب) از لحظه تیرز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟
 ج) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
 د) جرم خودرو را 1200 kg فرض کنید.
 ه) جریزایی از یک پلنگه تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌برد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت جریزایی را از لحظه روشن تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از شدتی آن بر حسب زمان رسم کنید.



الف)
$$v^{\checkmark} = v_0^{\checkmark} + \checkmark a \Delta x \rightarrow a = \frac{v^{\checkmark} - v_0^{\checkmark}}{\checkmark \Delta x} = \frac{-(20\text{ m/s})^{\checkmark}}{\checkmark (20\text{ m})} = -10\text{ m/s}^{\checkmark}$$

ب)
$$\Delta x = \frac{v + v_0}{\checkmark} t \rightarrow t = \frac{v + v_0}{\checkmark \Delta x} = \frac{0 + (20\text{ m/s})}{\checkmark (20\text{ m})} = 0.5\text{ s}$$

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

۱.۳ دو فنکشن حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص
 ۱. کسی را در نظر بگیرید که به شاخه درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.
 الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سبب را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. (با هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟)
 ۲. دانش‌آموزی به جرم 50 kg روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ $(g=9.8\text{ N/kg})$
 الف) آسانسور ساکن است.
 ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
 ج) آسانسور با سرعت 1 m/s به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.
 د) آسانسور با سرعت 1 m/s به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.
 ۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 100 kg را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در مسأله حرکت قرار می‌گیرد.

الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح 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 جسم چقدر خواهد شد؟
 ۴. در شکل زوئی نیروی F_1 به بزرگی 20 N و جرم دارد 1 kg است. اما جبهه همان‌سایک است. اگر در همین حالت زوئی نیروی قائم F_2 که جرمه را به زمین می‌فشارد از مسطر شروع به افزایش کند، کیت‌های زو چگونه تغییر می‌کنند؟
 الف) اجازه تازوی عمودی سطح وارد بر جبهه
 ب) اجازه تازوی اصطکاک ایستایی وارد بر جبهه
 ج) اجازه تازوی کشش نیروی اصطکاک ایستایی
 د) تازوی خالص وارد بر جسم
 ۵. می‌خواهید جسمی جرمه آن 50 kg است، شتاب 20 m/s^2 بدویم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نماید.
 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 نشانش 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.
 ۶. 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 بیرون‌شدن 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 پیونده شده آن چند برابر می‌شود؟

۴. در شکل زوئی نیروی F_1 به بزرگی 20 N و جرم دارد 1 kg است. اما جبهه همان‌سایک است. اگر در همین حالت زوئی نیروی قائم F_2 که جرمه را به زمین می‌فشارد از مسطر شروع به افزایش کند، کیت‌های زو چگونه تغییر می‌کنند؟
 الف) اجازه تازوی عمودی سطح وارد بر جبهه
 ب) اجازه تازوی اصطکاک ایستایی وارد بر جبهه
 ج) اجازه تازوی کشش نیروی اصطکاک ایستایی
 د) تازوی خالص وارد بر جسم
 ۵. می‌خواهید جسمی جرمه آن 50 kg است، شتاب 20 m/s^2 بدویم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نماید.
 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 نشانش 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.
 ۶. 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 بیرون‌شدن 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 پیونده شده آن چند برابر می‌شود؟

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:

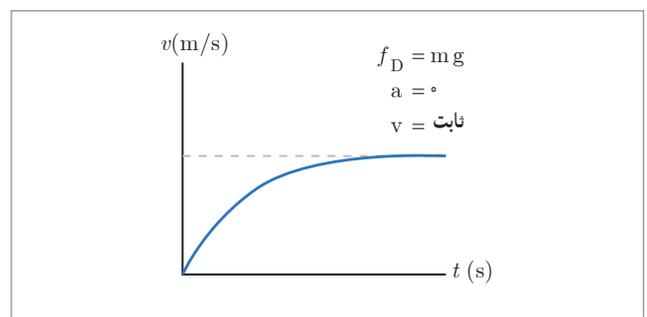
$$-f_{\text{اصطکاک}} = ma \rightarrow -f_{\text{اصطکاک}} = (1200\text{ kg})(-10\text{ m/s}^2)$$

$$f_{\text{اصطکاک}} = 1/20 \times 10^4\text{ N}$$



۷ حرکت چترباز را در سه حالت بحث می‌کنیم. در همه حالت‌ها فرض می‌کنیم چترباز روی مسیر مستقیم حرکت می‌کند و اثر باد و عوامل دیگر را در نظر نمی‌گیریم.

الف) چترباز بلافاصله پس از پرش، چتر خود را باز می‌کند. در این حالت نیروی مقاومت هوا در ابتدا ناچیز است. با افزایش تندی چتر باز این نیرو افزایش پیدا می‌کند تا اینکه اندازه این نیرو با اندازه وزن برابر شود. در این حالت شتاب چترباز صفر شده و چترباز با تندی حدی به حرکت خود ادامه می‌دهد تا به زمین برسد.



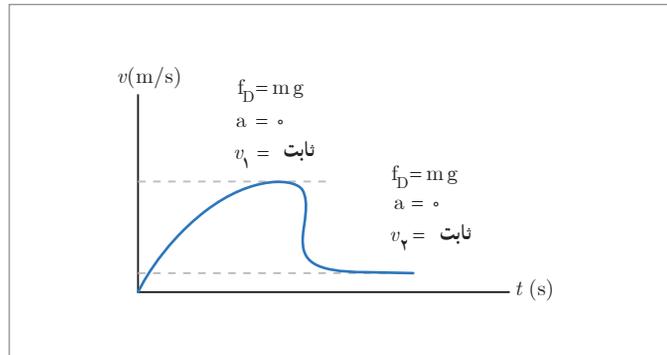
فیزیک ۳

۱. در شکل زوئی نیروی F_1 به بزرگی 20 N و جرم دارد 1 kg است. اما جبهه همان‌سایک است. اگر در همین حالت زوئی نیروی قائم F_2 که جرمه را به زمین می‌فشارد از مسطر شروع به افزایش کند، کیت‌های زو چگونه تغییر می‌کنند؟
 الف) اجازه تازوی عمودی سطح وارد بر جبهه
 ب) اجازه تازوی اصطکاک ایستایی وارد بر جبهه
 ج) اجازه تازوی کشش نیروی اصطکاک ایستایی
 د) تازوی خالص وارد بر جسم
 ۲. می‌خواهید جسمی جرمه آن 50 kg است، شتاب 20 m/s^2 بدویم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نماید.
 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 نشانش 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 برتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.2 است.
 الف) چوب پس از بیرون‌شدن 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 پیونده شده آن چند برابر می‌شود؟

۴. در شکل زوئی نیروی F_1 به بزرگی 20 N و جرم دارد 1 kg است. اما جبهه همان‌سایک است. اگر در همین حالت زوئی نیروی قائم F_2 که جرمه را به زمین می‌فشارد از مسطر شروع به افزایش کند، کیت‌های زو چگونه تغییر می‌کنند؟
 الف) اجازه تازوی عمودی سطح وارد بر جبهه
 ب) اجازه تازوی اصطکاک ایستایی وارد بر جبهه
 ج) اجازه تازوی کشش نیروی اصطکاک ایستایی
 د) تازوی خالص وارد بر جسم
 ۵. می‌خواهید جسمی جرمه آن 50 kg است، شتاب 20 m/s^2 بدویم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نماید.
 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 نشانش 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.
 ۶. 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 بیرون‌شدن 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 پیونده شده آن چند برابر می‌شود؟

۷. در شکل زوئی نیروی F_1 به بزرگی 20 N و جرم دارد 1 kg است. اما جبهه همان‌سایک است. اگر در همین حالت زوئی نیروی قائم F_2 که جرمه را به زمین می‌فشارد از مسطر شروع به افزایش کند، کیت‌های زو چگونه تغییر می‌کنند؟
 الف) اجازه تازوی عمودی سطح وارد بر جبهه
 ب) اجازه تازوی اصطکاک ایستایی وارد بر جبهه
 ج) اجازه تازوی کشش نیروی اصطکاک ایستایی
 د) تازوی خالص وارد بر جسم
 ۸. می‌خواهید جسمی جرمه آن 50 kg است، شتاب 20 m/s^2 بدویم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نماید.
 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 نشانش 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.
 ۹. 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 بیرون‌شدن 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 پیونده شده آن چند برابر می‌شود؟

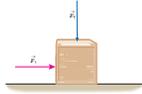
ب) چتر باز مدتی پس از پرش، چترش را باز می‌کند. در این حالت تندی چتر باز زیاد و زیادتر می‌شود و نیروی مقاومت هوا در تندی‌های خیلی زیاد با وزن هم اندازه می‌شود (تندی حدی اولیه). پس از باز کردن چتر، ناگهان نیروی مقاومت هوا به علت افزایش مساحت در آن تندی زیاد به شدت زیاد می‌شود و حرکت چتر باز کند خواهد شد و نیروی مقاومت هوا آن قدر کاهش پیدا می‌کند تا با وزن هم اندازه شود، در این حالت به تندی حدی ثانویه می‌رسد.



۱. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی 20 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، کنت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟

۲. وزنه‌ای به جرم 2 kg را به انتهای تری به طول 11 cm ثابت آن 20 N است می‌بندیم و قدری آن را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول تری را در حالت‌های زیر محاسبه کنید. الف) آسانسور ساکن است. ب) 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.

۳. برای یک راننده داستان 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 بریز گرفتن ترمز می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه
ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه
ج) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی
د) نیروی حاصل وارد بر جعبه

۴. 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 می‌نمایند.

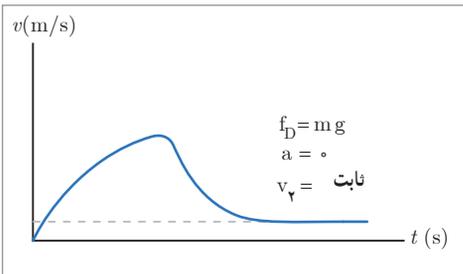
الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک 0.2 به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.
ج) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.
د) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۵. قطعه چوبی را با سرعت افقی 10 m/s روی سطحی افقی برتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.2 است.

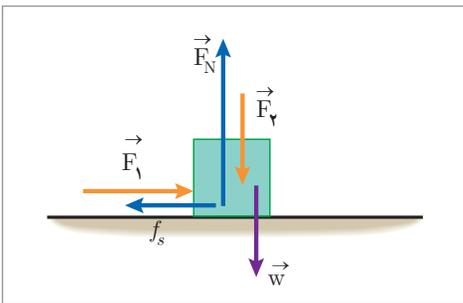
الف) چوب پس از برخورد چه مسافتی می‌پیماید؟
ب) اگر از یک قطعه چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت برتاب شود، مسافت پیوسته آن چند برابر می‌شود؟



۶. دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
ب) زمان واکنش راننده‌ای 0.5 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 10 m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.
ب) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 50 m متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
د) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی حاصل وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را 1500 kg فرض کنید.
۷. یک خودروی باری با شتاب افقی محکم، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 22 N و



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:

$$F_N = W + F_1, F_1 = f_s$$

$$(F_N = F_1 + W) \text{ الف) افزایش می‌یابد}$$

$$(f_s = F_1 = \text{ثابت}) \text{ ب) ثابت می‌ماند}$$

$$(f_{s, \text{max}} = \mu_s F_N = \mu_s (F_1 + W)) \text{ پ) افزایش می‌یابد}$$

ت) ثابت می‌ماند (نیروی خالص در همه حالت‌ها صفر باقی می‌ماند)

$$F - f_k = ma \rightarrow F = ma = (5/0 \cdot \text{kg})(2/0 \cdot \text{m/s}^2) = 10 \text{ N} \text{ الف)}$$

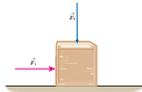
$$F_N = mg = (5/0 \cdot \text{kg})(9/8 \cdot \text{N/kg}) = 49 \text{ N} \text{ ب)}$$

$$f_k = \mu_k F_N = (0/2 \cdot 0)(49 \text{ N}) = 9/8 \text{ N}$$

فصل دوم : دینامیک و حرکت دایره‌ای ۱۰۷

فیزیک ۳

۱. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی 20 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 تدریجاً 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
د) نیروی خالص وارد بر جعبه

۲. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن 5 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 می‌نماید.
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 10 m/s روی سطح افقی برتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.2 است.

۴. وزنه‌ای به جرم 2 kg را به انتهای تری به طول 11 cm ثابت آن 20 Ncm است می‌نیمید و فترا از سقف یک آسانسور آروان می‌کنیم. طول فترا در حالت‌های 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. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، کل مسافت توقف، دو قسمت دارد: مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظه دیدن مانع تا بزرگرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه بزرگرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).



الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
ب) زمان واکنش راننده‌ای 0.75 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.
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.
۶. یک خودروی باری با شتاب افقی محکم، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 22 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)

$$F - mg = ma \rightarrow F = mg + ma = m(g + a) = (5/0\text{ kg})(9/8\text{ m/s}^2 + 2/0\text{ m/s}^2) = 59\text{ N}$$

$$F - mg = ma, a = -2/0\text{ m/s}^2$$

$$F = m(g + a) = (5/0\text{ kg})(9/8\text{ m/s}^2 + (-2/0\text{ m/s}^2)) = 39\text{ N}$$

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 :

$$-f_k = ma \rightarrow -\mu_k F_N = ma \rightarrow -\mu_k mg = ma \rightarrow a = -\mu_k g$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شتاب حرکت مستقل از جرم است.

$$a = 0.2 \times (9/8\text{ m/s}^2) = -1/4\text{ m/s}^2$$

$$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta x \rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - v_0^2}{-2\mu_k g} = \frac{v_0^2}{2\mu_k g}$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مسافت طی شده نیز مستقل از جرم است.

$$\Delta x = \frac{(10\text{ m/s})^2}{2(0.2)(9/8\text{ m/s}^2)} = 25/0\text{ m}$$

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.

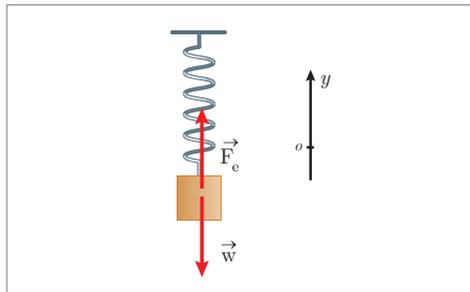
$$F_e - W = ma, a = 0$$

$$F_e = W \rightarrow k(l - l_0) = mg$$

$$(20 \times 10^3\text{ N/m})(l - 12 \times 10^{-2}\text{ m}) = (2/0\text{ kg})(10\text{ m/s}^2)$$

$$l - 12 \times 10^{-2}\text{ m} = 1/0 \times 10^{-2}\text{ m} \rightarrow l = 13 \times 10^{-2}\text{ m}$$

$$l = 13\text{ cm}$$



(پ)

۱۱. وزنه‌ای به جرم 200 kg را به انتهای تری به طول 11 cm که ثابت آن 20 N/cm است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های زیر محاسبه کنید.

(الف) آسانسور ساکن است.

(ب) آسانسور با سرعت ثابت 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.

۱۲. 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 ماع تا بزرگرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).



کل مسافت توقف = مسافت ترمز + مسافت واکنش

(الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.

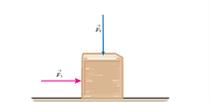
(ب) زمان واکنش راننده‌ای 0.75 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18 m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

(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 محکم، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 22 N و

۱۳. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی 20 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

(د) نیروی خالص وارد بر جعبه

۱۴. 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 می‌نماید.

(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.

۱۵. قطعه چوبی را با سرعت افقی 10 m/s روی سطح افقی رها می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.2 است.

(الف) چوب پس از بیودن چه مسافتی می‌اندازد؟

(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 بیودن آن چند برابر می‌شود؟

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

$$F_e - mg = ma \rightarrow F_e = mg + ma = m(g + a)$$

$$k(l - l_0) = m(g + a) \rightarrow (200 \times 10^3 \text{ N/m})(l - 12 \times 10^{-2} \text{ m}) =$$

$$(200 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2 - 2 \text{ m/s}^2)$$

$$l - 12 \times 10^{-2} \text{ m} = \frac{16 \text{ N}}{200 \times 10^3 \text{ N/m}} = 8 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$l = 12.8 \times 10^{-2} \text{ m} = 12.8 \text{ cm}$$

(ت)

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

$$F_e = m(g + a) \rightarrow k(l - 12 \times 10^{-2} \text{ m}) = (200 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2 + 2 \text{ m/s}^2)$$

$$l - 12 \times 10^{-2} \text{ m} = \frac{24 \text{ N}}{200 \times 10^3 \text{ N/m}} \rightarrow l = 13.2 \times 10^{-2} \text{ m} = 13.2 \text{ cm}$$

۱۲

(الف) اندازه سرعت خودرو و زمان واکنش (طبق رابطه $\Delta x = v\Delta t$)

(ب)

$$\Delta x = v\Delta t \rightarrow v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{18 \text{ m}}{0.75 \text{ s}} = 24 \text{ m/s} = 86.4 \text{ km/h}$$

(پ)

$$\Delta x = \left(\frac{v + v_0}{2}\right)\Delta t = \left(\frac{0 + 24 \text{ m/s}}{2}\right)(0.75 \text{ s}) = 9 \text{ m}$$

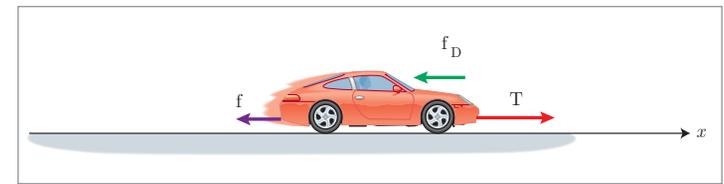
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{\Delta t} = \frac{0 - 24 \text{ m/s}}{0.75 \text{ s}} = -32 \text{ m/s}^2$$

(ت)

$$F_{net} = ma = (1500 \text{ kg})(-32 \text{ m/s}^2) = -48000 \text{ N}$$

علامت منفی نشان می‌دهد جهت نیروی خالص در خلاف جهت حرکت خودرو است.

۱۳



(الف)

$$T - (f + f_D) = ma, a = 0$$

(ب)

$$T = f + f_D = 2200 \text{ N} + 3800 \text{ N} = 6000 \text{ N}$$

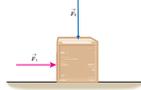
$$T - (f + f_D) = ma \rightarrow T - 6000 \text{ N} = (1500 \text{ kg})(2 \text{ m/s}^2)$$

$$T = 7000 \text{ N}$$

۱. در شکل زیر، نیروی F به بزرگی 200 N بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم F_N که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، گشت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟

(ب) 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.
 (ب) آسانسور با شتاب ثابت 2 m/s^2 از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۲. 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 بزرگرفتن پدالی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه (ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه (ب) اندازه بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی (ب) نیروی حاصل وارد بر جعبه

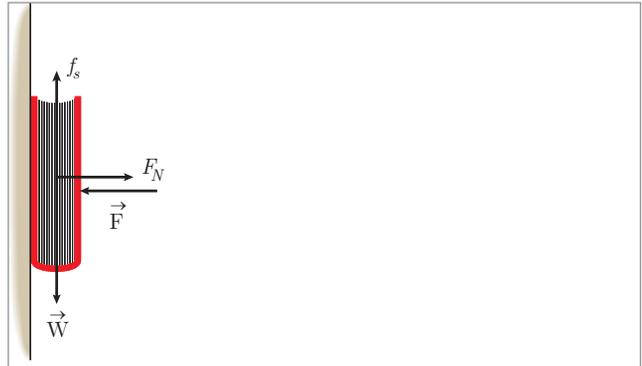
۳. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن 50 kg است، شتاب 2 m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌نماید.

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 شتابش نیز به طرف راست باشد.
 (ب) 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.
 ۴. قطعه چوبی را با سرعت افقی 10 m/s روی سطحی افقی رها می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.2 است.

الف) چوب پس از بیرون چه مسافتی می‌پوشد؟
 (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 بیوده شده آن چند برابر می‌شود؟



الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
 (ب) زمان واکنش راننده‌ای 0.75 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18 m را طی می‌کند. فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.
 (ب) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 50 m متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
 (ت) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی حاصل از آن چقدر است؟ مهر خودرو را 1000 kg فرض کنید.
 (ب) یک خودروی باری با شتاب 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) $f_s - W = ma, a = 0$

$f_s = W = mg = (2/5\text{kg})(9/80\text{ m/s}^2) = 24/5\text{N}$

(پ) خیر تغییر نمی‌کند زیرا f_s هم اندازه‌ای با وزن است. بنابراین با افزایش F فقط F_N زیاد می‌شود زیرا $F_N = F$ است.

۱۵ (الف) علت این پدیده‌ها، ویژگی لختی است. یعنی در حالت اول که خودرو شروع به حرکت می‌کند، شما تمایل دارید همچنان حالت سکون خود را حفظ کنید و به همین علت به صندلی فشرده می‌شوید. در حالت دوم شما تمایل دارید همچنان به حرکت خود ادامه دهید و به همین علت به جلو پرتاب می‌شوید.

(ب) کمربند ایمنی دو نقش دارد؛ اول آنکه از پرت شدن شما (جدا شدن از صندلی) به جلو، جلوگیری می‌کند. دوم آنکه زمان برخورد را (حدود 1° برابر) افزایش می‌دهد. کیسه هوا نیز دو نقش دارد؛ اول آنکه زمان برخورد شما را افزایش می‌دهد (حدود 1° برابر) و دوم آنکه سطح برخورد شما را با جلوی خودرو زیاد می‌کند (به مساحت حدود 0.5 m^2 می‌رساند).

با توجه به رابطه $F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ اگر Δt افزایش پیدا کند، نیروی وارد بر سرنشین کاهش پیدا می‌کند. مثلاً اگر کمربند ایمنی و کیسه هوا سبب افزایش 2° برابری زمان برخورد شوند، نیروی وارد بر سرنشین، 2° برابر کاهش پیدا می‌کند و این سبب کاهش شدید آسیب به سرنشین می‌شود. (البته این افزایش زمان در کنار افزایش مساحت برخورد جراحتهای ناشی از برخورد را کاهش می‌دهد)

$\Delta p = m\Delta v, v_1 = 15/0\text{ m/s}, v_2 = -22/0\text{ m/s}$

$\Delta p = (0/280\text{ kg})(-22/0\text{ m/s} - (15/0\text{ m/s})) = -10/36\text{ kg.m/s} = -10/4\text{ kg.m/s} \Rightarrow |\Delta p| = 10/4\text{ kg.m/s}$

$F_{av} = \frac{|\Delta p|}{\Delta t} = \frac{10/36\text{ kg.m/s}}{0/060\text{ s}} = 172/6\text{ N} \approx 173\text{ N}$ (ب)

۱۷ تغییر تکانه توپ برابر با مساحت سطح زیر نمودار $F-t$ است:

$\Delta p = S = \frac{(2/5 \times 10^{-3}\text{ s} - 1/0 \times 10^{-3}\text{ s})(20/0 \times 10^3\text{ N})}{2} = 15\text{ kg.m/s}$

$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{15\text{ kg.m/s}}{1/5 \times 10^{-3}\text{ s}} = 1/0 \times 10^4\text{ N}$

$$T = \frac{t}{n} = \frac{60 \cdot 60 \text{ s}}{1000} = 3.6 \text{ s}$$

$$v_{\text{وسط}} = \frac{2\pi r_{\text{وسط}}}{T} = \frac{2\pi(2 \cdot 10^3 \text{ m})}{3.6 \text{ s}} = \frac{2 \cdot 10^3 \pi}{3.6} \text{ m/s} \approx 209 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{نوک}} = \frac{2\pi r_{\text{نوک}}}{T} = \frac{2\pi(4 \cdot 10^3 \text{ m})}{3.6 \text{ s}} = \frac{4 \cdot 10^3 \pi}{3.6} \text{ m/s} \approx 418 \text{ m/s} \approx 419 \text{ m/s}$$

$$a_c = \frac{v^2}{r_{\text{وسط}}} = \frac{4\pi^2 r_{\text{وسط}}}{T^2} = \frac{4(3/14)^2 (2 \cdot 10^3 \text{ m})}{(0.06 \text{ s})^2} = 4382 \text{ m/s}^2 \quad \times$$

$$\approx 4/4 \times 10^4 \text{ m/s}^2$$

$$a_c = \frac{4\pi^2 r_{\text{نوک}}}{T^2} = \frac{4(3/14)^2 (4 \cdot 10^3 \text{ m})}{(0.06 \text{ s})^2} = 8764 \times$$

$$\approx 8/8 \times 10^4 \text{ m/s}^2$$

۳۸-N است.



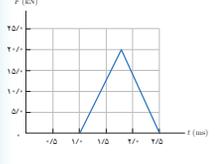
الف) اگر سرعت خودرو ثابت باشد نیروی کشش طناب جفدر است؟
 ب) اگر خودرو با شتاب ثابت 2 m/s^2 به طرف راست کنده شود، نیروی کشش طناب جفدر چقدر است؟
 ج) گاهی را مانند شکل با نیروی عمودی F به دیوار قائمی فشارده و ثابت نگه داشته‌ایم. الف) نیروهای وارد بر کتاب را رسم کنید. ب) اگر جرم کتاب 2 kg باشد، اندازه نیروی اصطکاک را به دست آورید. ب) اگر کتاب را بیشتر به دیوار فشاریم، آیا نیروی اصطکاک خیر می‌کند؟ یا این کار چه نیروهای افزایش می‌یابد؟

۳-۲ نکته و قانون دوم نیوتون

۱) وقتی در خودروی مسافتی تسهله‌ایم و خودرو ناگهان شروع به حرکت می‌کند، به صندلی فشارده می‌شویم. همین‌طور اگر در خودرویی در حال حرکتی تسهله باشیم، در توقف ناگهانی به جلو برتاب می‌شویم.

۳-۳ حرکت دایره‌ای یکجواب

۱) بروهای یک بالگرد در هر دقیقه، 1000 دور می‌چرخند. طول پرواز را 2 km فرض کنید و کمیت‌های زیر را برای پرواز محاسبه کنید.
 الف) دوره تناوب پرواز
 ب) شتاب مرکز گرا در وسط و نوک پرواز
 ج) حداقل ضرب اصطکاک استاتیکی بین چرخ‌های خودرو و سطح جاده، جفدر باشد تا خودرو بتواند با سرعتی 57 km/h بچاقنی مسطحی را که شعاع آن 5 m است، دور بزند؟



۱۹

$$f_s = m \frac{v^2}{r} \rightarrow f_{s, \text{max}} = m \frac{v^2}{r} \rightarrow \mu_s F_N = m \frac{v^2}{r} \rightarrow \mu_s (mg) = m \frac{v^2}{r} \rightarrow \mu_s = \frac{v^2}{rg}$$

$$\mu_s = \frac{(15 \text{ m/s})^2}{(50 \text{ m})(10 \text{ m/s}^2)} = 0.45$$

۳۹-۱

۳۹-۲ نیروی گرانشی

۱) دو جسم در فاصله $2 \cdot 10^7 \text{ m}$ از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک $1 \cdot 10^{-10} \text{ N}$ جذب می‌کنند. اگر جرم یکی از اجسام $5 \cdot 10^3 \text{ kg}$ باشد، جرم جسم دیگر جفدر چقدر است؟
 ۲) ماهواره‌ای به جرم 600 kg در مدارای دایره‌ای به ارتفاع 2800 کیلومتر از سطح زمین، به دور آن می‌چرخد. الف) نیروی گرانشی وارد بر ماهواره
 ب) شتاب ماهواره
 ج) سرعت ماهواره
 د) دوره تناوب ماهواره را در این ارتفاع بدست آورید. ($M_E = 5.98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ و $R_E = 6400 \text{ km}$)

۳) الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟
 ب) اگر جرم ماهواره‌ای 5 kg باشد، وزن آن در ارتفاع 36000 کیلومتری از سطح زمین خواهد شد؟

۳۹-۳

الف) شتاب گرانشی ناشی از خوردنید در سطح زمین جفدر است؟
 ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین جفدر است؟
 $M_{\text{زمین}} = 5.98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ و $M_{\text{ماه}} = 7.36 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
 $R_{\text{زمین}} = 6400 \text{ km}$ و $R_{\text{ماه}} = 384000 \text{ km}$
 الف) سینه‌ای به جرم 10 kg در وسط فاصله بین زمین و ماه قرار دارد. نیروی گرانشی خالصی را که از طرف زمین و ماه به این سینه 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 سینه، یکدیگر را خنثی می‌کنند؟

۳۹

$$F = G \frac{M_e m}{r^2}, r = R_e + h$$

$$F = (6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(600 \text{ kg})}{(9200 \times 10^3 \text{ m})^2}$$

$$= 2.8275 \times 10^{-3} \text{ N} \approx 2.83 \times 10^{-3} \text{ N}$$

پیدا کردیم

۵-۲ نیروی گرانشی
 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؟
پاسخ: ماهاورای به جرم $6 \times 10^{-3} \text{ kg}$ در مداری دایره‌ای به ارتفاع 2800 کیلومتر از سطح زمین، به دور آن می‌چرخد.
 الف) نیروی گرانشی وارده بر ماهاوره
 ب) شتاب ماهاوره
 ج) مدت ماهاوره
 د) دوره تناوب ماهاوره را در این ارتفاع بدست آورید.
پاسخ: الف) $M_1 = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ و $R = 6400 \text{ km}$
 ب) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک نخ‌بند به نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟
 ج) اگر جرم ماهاورای 5 kg باشد، وزن آن در ارتفاع 36000 کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟

(ب)

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2 / 8275 \times 10^{-3} \text{ N}}{6 \times 10^{-3} \text{ kg}} = 4 / 71 \text{ m/s}^2$$

(پ)

$$F = m \frac{v^2}{r} \rightarrow G \frac{M_e m}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \rightarrow v = \sqrt{\frac{GM_e}{r}}$$

$$\sqrt{\frac{(6 / 67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2})(5 / 98 \times 10^{24} \text{ kg})}{(9200 \times 10^3 \text{ m})}} = 6 / 58 \times 10^3 \text{ m/s}$$

(ت)

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2(3 / 14)(9200 \times 10^3 \text{ m})}{6 / 58 \times 10^3 \text{ m/s}} = 878 \text{ s} = 8 / 78 \times 10^2 \text{ s}$$

۶۰

۲۲

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{GM_e m}{(R_e + h)^2} = \left(\frac{R_e}{R_e + h}\right)^2 \rightarrow \frac{1}{2} = \left(\frac{R_e}{R_e + h}\right)^2 \rightarrow \sqrt{2} R_e = R_e + h \rightarrow h = (\sqrt{2} - 1) R_e \approx 2651 \text{ km}$$

(الف)

$$\frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{R_e}{R_e + h}\right)^2 \Rightarrow \frac{W_2}{(25 \times \text{kg})(9 / 8 \times \text{N/kg})} = \left(\frac{6400 \times \text{km}}{6400 \times \text{km} + 3600 \times \text{km}}\right)^2 \Rightarrow W_2 = 55 / 8 \text{ N}$$

(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.

پهروز، ۳۳

۳۳. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟

ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین چقدر است؟

۳۴. الف) سفینه‌ای به جرم $2 \times 10^4 \text{ kg}$ 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 به دست آورید

(از داده‌های مسئله‌های قبل استفاده کنید).

ب) در چه فاصله‌ای از زمین، نیروی گرانشی ماه و زمین بر

سفینه، یکدیگر را خنثی می‌کنند؟

۳۵. 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؟

۳۴-۲ نیروی گرانشی

۳۴. دو جسم در فاصله 200 m از هم، یکدیگر را با نیروی

گرانشی کوچک 10^{-10} N جذب می‌کنند. اگر جرم یکی

از اجسام 500 kg باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟

۳۵. ماهواره‌ای به جرم 600 kg در مدار ی دایره‌ای به ارتفاع

28000 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 به دست آورید.

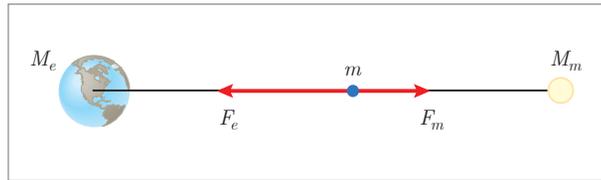
د) دوره تناوب ماهواره را در این ارتفاع به دست آورید.

۳۶. 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؟



(الف)

$$F_{net} = F_{\text{زمین}} - F_{\text{ماه}} = G \frac{M_m m}{r^2} - G \frac{M_e m}{r^2} = G \frac{m}{r^2} (M_e - M_m)$$

$$= (6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}) \frac{(3/0 \times 10^4 \text{ kg})}{(3.84 \times 10^8 \text{ m})^2} (5.98 \times 10^{24} \text{ kg} - 7.36 \times 10^{22} \text{ kg})$$

$$= 7.36 \times 10^{22} \text{ kg} = 3/2 \times 10^2 \text{ N}$$

(ب)

$$F_{\text{زمین}} = F_{\text{ماه}} \rightarrow G \frac{M_e m}{x^2} = G \frac{M_m m}{(r-x)^2} \rightarrow \frac{M_e}{x^2} = \frac{M_m}{(r-x)^2} \rightarrow \frac{x^2}{(r-x)^2} = \frac{M_e}{M_m}$$

$$\frac{x}{3.84 \times 10^8 \text{ km} - x} = \sqrt{\frac{M_e}{M_m}} = \sqrt{\frac{5.98 \times 10^{24} \text{ kg}}{7.36 \times 10^{22} \text{ kg}}} = 9/0.1$$

$$x = \frac{9/0.1 \times 3.84 \times 10^8 \text{ km}}{10} = 3/46 \times 10^8 \text{ km}$$

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

دانش آموزان 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 پایه 10°) استفاده کنیم.
- ارتفاع و بلندی دو ویژگی تَن موسیقی است که به ادراک شنوایی‌ها مربوط است.
- بسته به حرکت چشمه 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 چشمه صوتی یا حرکت ناظر نسبت به یک چشمه 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، دوره 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.

نوسان و موج



فصل



بخش‌ها

در طراحی و ساخت برج‌های بلند، توجه به قوانین فیزیک نوسان و موج اهمیت زیادی دارد. در برخی از این برج‌ها آونگ‌های بسیار سنگینی (در حدود چند صد تن) در طبقات بالایی نصب می‌کنند تا از نوسان‌های احتمالی برج کم کنند. چگونه یک آونگ می‌تواند این نوسان‌ها را کاهش دهد؟

- ۱-۳ نوسان دورهای
- ۲-۳ حرکت هماهنگ ساده
- ۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده
- ۴-۳ تشدید
- ۵-۳ موج و انواع آن
- ۶-۳ مشخصه‌های موج

آونگ نقش میراگرِ نوسان را بازی می‌کند و با نوسان ناهمگام با نوسان ساختمان موجب تضعیف آن می‌شود. مثال‌هایی از این دست فراوانند. یک نمونه برج هینکاک^۱ در بوستون آمریکا به طول ۲۴۱ متر است که جرم آونگ 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 رشتهٔ 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 وسیلهٔ 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 به‌طور طبیعی در انتهای فنر نوسان می‌کند طوری تنظیم می‌شود که با بسامد طبیعی ساختمان برابر باشد. آنگاه وقتی ساختمان تاب بخورد، فنر کشیده می‌شود و موجب نوسان جسم با همان بسامد می‌شود. ولی نوسان جسم از نوسان ساختمان عقب‌تر است و به عبارتی این دو نوسان کاملاً ناهمگام هستند. برای مثال، وقتی ساختمان به چپ تاب می‌خورد، جرم به سمت راست نوسان می‌کند و بدین ترتیب اثر تاب خوردن را خنثی می‌کند. برخی ساختمان‌ها هم یک نوسانگر آبی دارند که در آنها آب از طرفی به طرف دیگر به‌طور ناهمگام با ساختمان نوسان می‌کنند.

در این فیلم یک نمونهٔ آزمایشی میراگر را می‌بینید.



در این فیلم میراگرهای نسل سوم سازه‌ها را مشاهده می‌کنید.



۱- Hancock tower

۲- Petronas tower

۲-۳ حرکت هماهنگ ساده

در بخش پیش با نوسان‌های از یک نوسان‌دهنده آشنا شدیم. شکل ۲-۳. دو نمونه دیگر از نوسان‌های دوره‌ای را با رسم نمودار مکان-زمان آنها نشان می‌دهد. هر دوی این نوسان‌ها دوره‌ای هستند، ولی نوسان شکل ۲-۳. به منظور سنجش آرج داده است. به نوسان‌های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (SHM) گفته می‌شود. حرکت هماهنگ ساده، مکانی برای ترک هر نوع نوسان‌دهنده دیگر است زیرا در سطح بالاتر نشان داده می‌شود که هر نوسان دوره‌ای را می‌توان مجموعی از نوسان‌های سینوسی در نظر گرفت. یک نمونه معروف از حرکت هماهنگ ساده، جرمی است که با یک فنر نوسان می‌کند. شکل ۲-۳. اگر جسم متصل به فنری را نشان می‌دهد که روی سطح افقی بدون اصطکاک قرار گرفته است. اگر جسم به اندازه چند سانتی‌متر کشیده و سپس رها شود، به جلو و عقب نوسان خواهد کرد. اگر مکان جسم را در بازه‌های زمانی منظم و یکسان ثبت کنیم به نوسان‌های سینوسی می‌رسیم که در این شکل نشان داده شده است. در این شکل جرمی بین $x = A$ و $x = -A$ به جلو و عقب می‌رود که در آن A دامنه حرکت است. به عبارتی دامنه حرکت، بیشینه فاصله جسم از نقطه تعادل است. توجه کنید که دامنه، فاصله بین دو انتهای سینوس است.

همان‌طور که دیدیم، در حرکت هماهنگ ساده نمودار مکان-زمان، نموداری سینوسی است. یعنی مکان (یا جابه‌جایی نسبت به نقطه تعادل) را می‌توان به صورت تابعی سینوسی یا کسینوسی از زمان t نوشت. در این کتاب برای سادگی تابع کسینوس را برمی‌گزینیم. یعنی فرض می‌کنیم در لحظه $t = 0$ نوسانگر در مکان بیشینه خود، یعنی $x = +A$ باشد. بنابراین مکان $x(t)$ نوسانگر را می‌توان چنین نوشت:

$$x(t) = A \cos(\omega t) \quad (2-3)$$

در این رابطه ω بسامد زاویه‌ای نوسانگر نامیده می‌شود و برای آن است:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3-2)$$

که در آن T بسامد زاویه‌ای در 2π برابر ω است.

توجه کنید که در رابطه ۲-۳، نشانه موج کسینوس (یعنی \cos) در محاسبه را با دایان است. شکل ۲-۳. نموداری از این تابع را نشان می‌دهد. اگر به حرکت ساده‌تر جرم-فنر شکل ۲-۳ توجه کنید درمی‌یابید که وقتی نوسانگر در $x = +A$ است، سرعت آن برابر با صفر است. به این نقطه اصطلاحاً نقطه تعالی می‌گویند. حرکت می‌گردد. همچنین وقتی $x = -A$ است (یعنی نوسانگر از نقطه تعالی می‌گذرد) اندازه سرعت بیشینه است. یعنی سنه به اینکه جسم در جهت $+$ یا $-$ از نقطه تعالی بگذرد.

نوسانگر انجام دایره‌ای را می‌توان به صورت $x = A \cos(\omega t)$ و $y = A \sin(\omega t)$ به دوایر سرعت ω از یک سادگی و یکنواختی نشان داد. هر دو برای هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای (از جمله آن‌ها) برقرار است.

معمولاً هر دو تابع $x(t) = A \cos(\omega t)$ و $y(t) = A \sin(\omega t)$ را می‌توان به صورت $x(t) = A \cos(\omega t + \phi)$ و $y(t) = A \sin(\omega t + \phi)$ نوشت که در آن ϕ فاز نامیده می‌شود. این نوسان‌ها را نوسان‌های هماهنگ ساده می‌گویند.

۱. Simple Harmonic Motion
۲. Harmonic Motion
۳. بررسی روابط سرعت-زمان و حرکت مکان در حرکت هماهنگ ساده. طراح از اهداف آموزشی این کتاب است. باید در ارزیابی این نوسان‌ها دقت بیشتری قرار گیرد.

در مورد شکل ۳-۴، در توصیفی که در متن درس برای آن آمده است توجه داده شود که اگر اصطکاک وجود داشته باشد دیگر حرکت هماهنگ ساده نخواهیم داشت، چرا که اصلاً حرکتی دوره‌ای نخواهیم داشت. زیرا تعریف حرکت دوره‌ای مبتنی بر آن است که دورها دقیقاً تکرار شوند. اصطکاک، دامنه نوسان را کم می‌کند. اصطکاک نه تنها بر دامنه نوسان، بلکه بر مدت زمان نوسان نیز تأثیر می‌گذارد. این مدت زمان را نمی‌توان دوره نامید؛ زیرا همان‌طور که گفتیم، اصطکاک حرکت نوسان را نادره‌ای می‌کند. البته اگر میرایی شدید نباشد، می‌توان به‌طور قراردادی از دوره صحبت کرد. بنا به قرارداد، در این صورت زمان طی شده بین دو عبور از نقطه تعادل (در یک جهت) را دوره در نظر می‌گیرند که با افزایش اصطکاک بزرگ‌تر می‌شود.

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

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

«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 بازه 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 $\omega = 2\pi n$ می‌گردد، که این همان رابطه ۳-۳ 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. اندازه این دو کمیت صرفاً در حرکت دایره‌ای یکنواخت بر هم منطبق می‌شود، ولی آنها ماهیتاً با هم متفاوت‌اند.

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

فیلم

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

فیلم

فهرست مطالب

فعالیت ۱-۳

نوسان‌نگار: نوسان‌نگار وسیله‌ای برای ثبت نوسان‌ها است. می‌خواهیم یک نوسان‌نگار ساده درست کنیم. به این منظور، یک وجه قطعه نئوپن آری با طول و عرض تقریبی ۲۰ cm و ۱۰ cm را روی شعله شمع بگذاریم تا به خوبی دود نمود شود. سپس تیغه نوک‌تیزی را به نوک یکی از شاخه‌های دیاپازون کوبشده (در حدود ۱۰۰ Hz) محکم چسبانیم. دیاپازون را به نوسان‌دار برده و آن را با سرعت روی نئوپن دود نمود به حرکت درآوریم. طوری که از نوک تیغه روی سطح دود نمود بیفتد. روی نئوپن، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن نوسان‌نگار گفته می‌شود.

اگر از نئوپن‌های دیاپازون روی نئوپن دود نمود

مثال ۱-۳

جرمی متصل به یک فنر با بسامد ۲۰۰ Hz و دامنه ۲/۰ cm در امتداد محور عمودی در حالت تعادل قرار می‌گیرد. 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:

$$A = 0.02 \text{ m}, \omega = 2\pi f = 2\pi(200) = 400\pi \text{ rad/s}, t = 1.066 \text{ s}$$

در نتیجه، در یکای SI داریم:

$$x = (0.02 \text{ m}) \cos(400\pi \text{ rad/s} \times 1.066 \text{ s}) = 0.02 \text{ m}$$

تمرین ۱-۳

ذره‌ای در حال نوسان هماهنگ ساده با دوره تناوب T است. با فرض اینکه در $t = 0$ $x = 0$ باشد، تعیین کنید در هر یک از لحظات زیر، آیا ذره در $x = A$ ، $x = -A$ ، در $x = 0$ خواهد بود؟ الف) $t = 3T/4$ ، ب) $t = 5T/8$ ، ج) $t = 7T/8$ ، د) $t = 9T/8$.

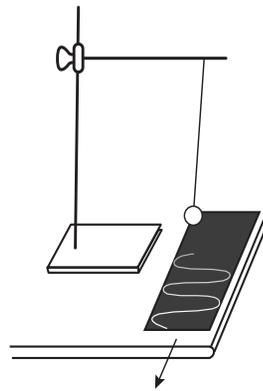
(راهنمایی: برای پاسخ به این تمرین، ساده‌تر آن است که چند دوره از یک نمودار گسینوسی را رسم کنید.)

تمرین ۲-۳

در حرکت هماهنگ ساده، مکان $x(t)$ باید پس از گذشت یک دوره تناوب برابر مقدار اولیه‌اش شود. یعنی اگر $x(t) = A \cos \omega t$ زمان دلخواه t باشد، آن گاه نوسانگر باید در زمان $t + T$ دوباره به همان مکان بازگردد و بنابراین $A \cos \omega(t + T) = A \cos \omega t$ باید برقرار باشد.

۳-۴ اثر از ماشین حساب وای محاسبه چنین روابط استفاده می‌کنید، مطمئن شوید که یک ماشین حساب روی رادیان (RAD) باشد.

۶۴



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.

در این فیلم، چگونگی ایجاد یک نوسان نگار 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

مثال ۱-۲ نوسان‌نگار : نوسان‌نگار وسیله‌ای برای ثبت نوسان‌ها است. می‌خواهیم یک نوسان‌نگار ساده درست کنیم. به این منظور، یک وجه قطعه نینبیشه‌ای با طول و عرض تقریبی ۲۰ cm و ۱۰ cm را روی سطح نهمی بگیریم تا به خوبی دودانود نمود. سپس تیغه‌توک‌تیزی را به توک یکی از شاخه‌های دیپازون کربن‌سادی (در حدود ۱۰۰ Hz) محکم چسبانیم. دیپازون را به نوسان راداریه و آن را به سرعت روی نینبیشه دودانود به حرکت درآوریم، طوری که از توک تیز تیغه روی سطح دودانود بیفتد. روی نینبیشه، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن نوسان‌نگار گفته می‌شود.

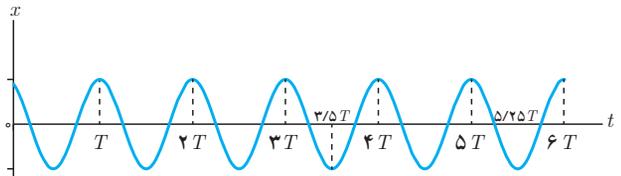
مثال ۱-۳ جرمی متصل به یک فنر با پهنای ۲۰ cm و دامنه ۲۰ Hz و دامنه ۲۰ cm متصل به طور هماهنگ در امتداد قائم نوسان می‌کند. پس از گذشت ۱۰/۶۶ s از زود شدن جرم از بالای نقطه تعادل، جابه‌جایی این جرم نسبت به نقطه تعادل چقدر است؟ پاسخ : با استفاده از رابطه $x = A \cos \omega t$ جابه‌جایی نسبت به نقطه تعادل جرم به قدر $x = 20 \cos(20 \times 10/66) = 10.2$ cm که در آن : در نتیجه، در یکای SI داریم :

تمرین ۱-۳ ذره‌ای در حال نوسان هماهنگ ساده با دوره تناوب T است. با فرض اینکه در $t = s$ ذره در $x = +A$ باشد، تعیین کنید در هر یک از لحظات زیر، آیا ذره در $x = +A$ ، در $x = -A$ ، در $x = 0$ خواهد بود؟ الف) $t = 2/5 T$ (ب) $t = 3/5 T$ (ج) $t = 4/5 T$ (د) $t = 5/5 T$ (ه) $t = 6/5 T$ (ز) برای پاسخ به این سئو، ساده‌تر آن است که چند دوره از یک نمودار کسینوسی را رسم کنید.

تمرین ۱-۴ در حرکت هماهنگ ساده، مکان $x(t)$ تابعی از گذشت یک دوره تناوب و این 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 آسان شدن نشان دهید $\omega = 2\pi / T$.

۴۲

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) $t = 5/25 T$ 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 چگونگی ساختن فنرهای عظیم را می بینید.

عنوان: IP: 250 و 250



فهرست مرتب (۱۸۸۲-۱۸۵۷ م.)
 در اکتان به دنیا آمد. او در ابتدا به رشته‌های مهندسی و مهندسی علاقه مند بود، اما خیلی زود از آن علاقه دست کشید و به طور کلی به مهندسی گرایش پیدا کرد و در دانشگاه ویلینگتون تحصیل کرد و شکاربان حیران مریمن هیوستون بود. هرگز پس از افزایش تحصیلی به تحقیق در حوزه فیزیک نگرش و تحقیقات مکتوب پرداخت. او به خاطر آزمایش‌هایی که در این زمینه انجام داد به دست استادی فیزیک دانشگاه بریک کلمبره معروف شد. در آنجا یک نوشته و یک گزیده را در مورد ساخت که مورد توجه قرار گرفته و به کمک آن نوشت آزمایش‌های همدردی به عمل خود. او، همگی شنای از پروزی درختان طریقه نامکمل بود.

آزمایش‌های متعدد با جرم و فنر نشان می‌دهد که افزایش جرم m در سامانه جرم-فنر (با فنر یکسان) به گند شدن نوسان‌ها، یعنی افزایش دوره تناوب T می‌انجامد. همچنین اگر این آزمایش‌ها را با وزنه‌ای به جرم ثابت ولی فنرهای با سختی متفاوت (k ی متفاوت) انجام دهیم، درمی‌یابیم که با افزایش ثابت فنر k دوره تناوب T می‌نوسان‌ها کوتاه‌تر می‌شود.

فعالیت ۲-۳

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 جرم جرم وزنه به‌طور مستقیم متناسب است ($T \propto \sqrt{m}$).
 ب) دوره تناوب سامانه جرم-فنر با یک وزنه معین ولی فنرهای متفاوت، با جرم ثابت فنر به‌طور وارون متناسب است ($T \propto 1/\sqrt{k}$).

محاسبات و همچنین آزمایش‌هایی مشابه با آنچه در فعالیت ۲-۳ دیده نشان می‌دهد دوره تناوب سامانه جرم-فنر یا وزنه‌ای به جرم m و فنری با ثابت k برابر است با:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2-3) \quad \text{(دوره تناوب سامانه جرم-فنر)}$$

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

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5-3) \quad \text{(بسامد زاویه‌ای سامانه جرم-فنر)}$$

مثال ۲-۳

قطعه‌ای به جرم 680 g به فنری با ثابت $k = 65 \text{ N/m}$ می‌بندد. 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) بسامد زاویه‌ای نوسان چقدر می‌شود؟

پاسخ: الف) دوره تناوب با استفاده از رابطه ۲-۳ به دست می‌آید:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{0.68 \text{ kg}}{65 \text{ N/m}}} = 1.64 \text{ s}$$

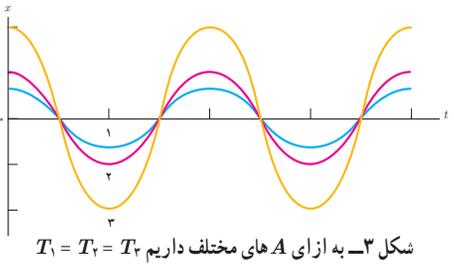
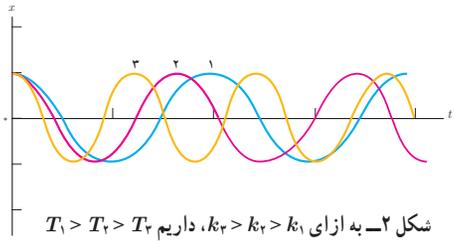
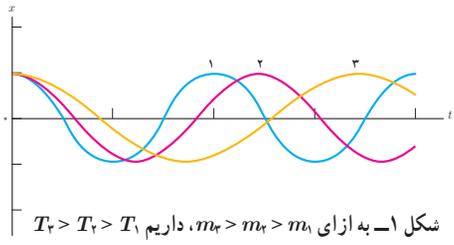
ب) بسامد زاویه‌ای از رابطه ۵-۳ به دست می‌آید:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{65 \text{ N/m}}{0.68 \text{ kg}}} = 9.8 \text{ rad/s}$$

۶۵

پاسخ فعالیت ۲-۳

در این فعالیت باید به سازوکارهای آزمایشی جهت پاسخ‌دهی مناسب این آزمایش‌ها توجه کنید. همچنین لازم است با شمردن زمان تعداد زیادی نوسان کامل، زمان یک نوسان را به دست آورید. همچنین خوب است این آزمایش‌ها را با دامنه‌های نوسان متفاوتی نیز انجام دهید و مستقل بودن زمان نوسان از دامنه را نیز بیازمایید. یک فعالیت پیشنهادی دیگر در امتداد این فعالیت این است که از 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 ، دوره‌های تناوب را مقایسه کنند. آنها باید به ترتیب نمودارهای نوعی شکل‌های ۱، ۲، ۳ را رسم کنند.



آزمایش‌های متعدد با جرم و فنر نشان می‌دهد که افزایش جرم m در سامانه جرم-فنر (یا فنر یکسان) به گند شدن نوسان‌ها، یعنی افزایش دوره تناوب T می‌انجامد. همچنین اگر این آزمایش‌ها را با وزنه‌ای به جرم ثابت ولی فنری با سختی متفاوت (k ی متفاوت) انجام دهیم، درمی‌یابیم که با افزایش ثابت فنر k دوره تناوب T می‌نوسان‌ها کوتاه‌تر می‌شود.

فعالیت ۲-۳

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 جاذب جرم وزنه به‌طور مستقیم متناسب است ($T \propto \sqrt{m}$).
 ب) دوره تناوب سامانه جرم-فنر با یک وزنه معین ولی فنرهای متفاوت، با جاذب ثابت فنر به‌طور وارون متناسب است ($T \propto 1/\sqrt{k}$).

محاسبات و همچنین آزمایش‌هایی مشابه با آنچه در فعالیت ۲-۳ دیدید نشان می‌دهد دوره تناوب سامانه جرم-فنر با وزنه‌ای به جرم m و فنری با ثابت k برابر است با:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{(دوره تناوب سامانه جرم-فنر)} \quad (2-3)$$

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

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{(بسامد زاویه‌ای سامانه جرم-فنر)} \quad (2-3)$$

مثال ۲-۳

قطعه‌ای 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 می‌کنیم و از حالت سکون رها می‌کنیم. الف) دوره تناوب و ب) بسامد زاویه‌ای نوسان چقدر می‌شود؟

پاسخ: الف) دوره تناوب با استفاده از رابطه ۲-۳ به دست می‌آید:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{0.680 \text{ kg}}{65 \text{ N/m}}} = 1.64 \text{ s}$$

ب) بسامد زاویه‌ای از رابطه ۲-۳ به دست می‌آید:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{65 \text{ N/m}}{0.680 \text{ kg}}} = 9.8 \text{ rad/s}$$

توجه کنید که در این کتاب صرفاً به معرفی دوره تناوب و بسامد زاویه‌ای بسنده کرده‌ایم و لذا بسامد 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 بسامد 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 دانش آموزان در فعالیت ۲-۳ با روش محاسبه تجربی دوره تناوب آشنا شده‌اند، دوره تناوب پیش از بسامد زاویه‌ای معرفی شده است.

تمرین‌های پیشنهادی

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

پاسخ: از رابطه ۲-۳ استفاده می‌کنیم که در اینجا جرم، مجموع جرم صندلی و فضانورد است. در نتیجه

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

و از آنجا

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

۲) فرض کنید روی یک ترازو ایستاده‌اید و تا پیش از اینکه ترازو جرم 50 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 ۲-۳ 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 $\circ/۷۵s$ طول می کشد تا یک دستگاه قطعه - فنر نوسانی شروع به تکرار حرکت خود کند. (الف) دوره تناوب، (ب) بسامد، و (پ) بسامد زاویه‌ای چقدر است؟

پاسخ:

(الف) بدیهی است که دوره تناوب برابر همان $\circ/۷۵s$ است.

(ب) بسامد برابر با عکس دوره تناوب است:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\circ/۷۵s} = ۱/۳s^{-1} = ۱/۳ \text{ Hz}$$

(ب) بسامد زاویه‌ای چنین می شود:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{\circ/۷۵s} = ۸/۴ \text{ rad/s}$$

۴ شخصی به جرم $۸۵/۰ \text{ kg}$ از یک طناب کشسان با ثابت فنر ۲۷۰ N/m آویزان است. شخص تا نقطه‌ای پایین می‌آید که در آن طناب $۵/۰ \text{ m}$ بیشتر از طول کشیده نشده‌اش است و سپس رها می‌شود. اگر حرکت طناب، نوسانی ساده باشد. (الف) دامنه نوسان چقدر است؟ (ب) شخص $۲/۰ \text{ s}$ 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:

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

چون طناب $۵/۰ \text{ m}$ پایین کشیده شده، بنابراین دامنه نوسان $۲/۰ \text{ m} = ۵/۰ \text{ m} - ۳/۰ \text{ m}$ می‌شود.
(ب) با استفاده از راهنمایی داریم:

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

که در آن

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{۲۷۰ \text{ N/m}}{۸۵/۰ \text{ kg}}} = ۱/۸ \text{ rad/s}$$

و در نتیجه:

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

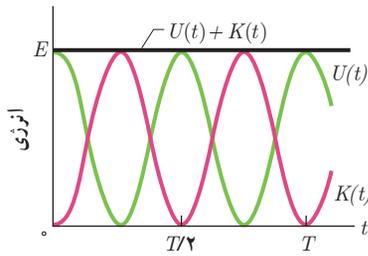
در نتیجه در $۱/۸ \text{ m}$ زیر نقطه تعادل است.

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.

نرم افزار 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 کشش‌ناشی ذخیره می‌شود. به طوری که با افزایش جابه‌جایی از نقطه تعادل اجلی که فنر فشرده و نه کشیده شده است این انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد. بنابراین انرژی پتانسیل سامانه جرم-فنر در نقاط بازگشتی $x = \pm A$ بیشینه و در نقطه تعادل $x = 0$ برابر صفر است.

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 وابستگی انرژی مکانیکی در حرکت هماهنگ ساده سامانه جرم-فنر را نشان می‌دهد.

شکل ۳-۳ تبدیل انرژی در حرکت هماهنگ ساده

سامانه جرم-فنر توجه کنید که در نقطه $x = 0$ انرژی، انرژی پتانسیل U صفر است و در نقطه‌های $x = \pm A$ انرژی، صرفاً پتانسیل است. در این حرکت انرژی مکانیکی پایسته است. به‌گونه‌ای که مجموع همیشه از انرژی پتانسیل U به انرژی جنبشی K تبدیل می‌شود و بالعکس.

نشان داده می‌شود انرژی مکانیکی سامانه جرم-فنر در حرکت هماهنگ ساده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

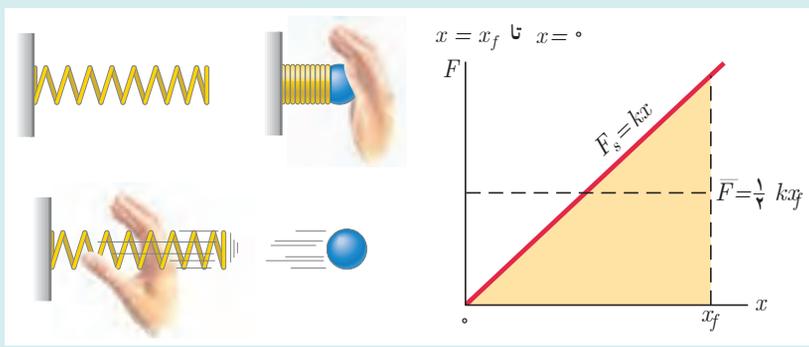
$$E = \frac{1}{2}kA^2 \quad (3-6) \quad \text{(انرژی مکانیکی سامانه جرم-فنر)}$$

که در آن A ثابت فنر و k دامنه نوسان است. با استفاده از رابطه‌های ۳-۳ و ۳-۵ به ۳-۳ رابطه مفید دیگری می‌رسیم که برای هر نوسانگر هماهنگ ساده دیگری از جمله آونگ ساده نیز انرژی پتانسیل کشش‌ناشی سامانه جرم-فنر در هر نقطه از مسیر نوسان از رابطه $U = \frac{1}{2}kx^2$ به‌دست می‌آید که آونگ و ارتعاش آن خارج از زمینه درسی آن کتاب است. در نقاط بازگشتی که $x = \pm A$ است، انرژی پتانسیل U برابر با 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_i افزایش می‌یابد (شکل ۱).



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

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

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

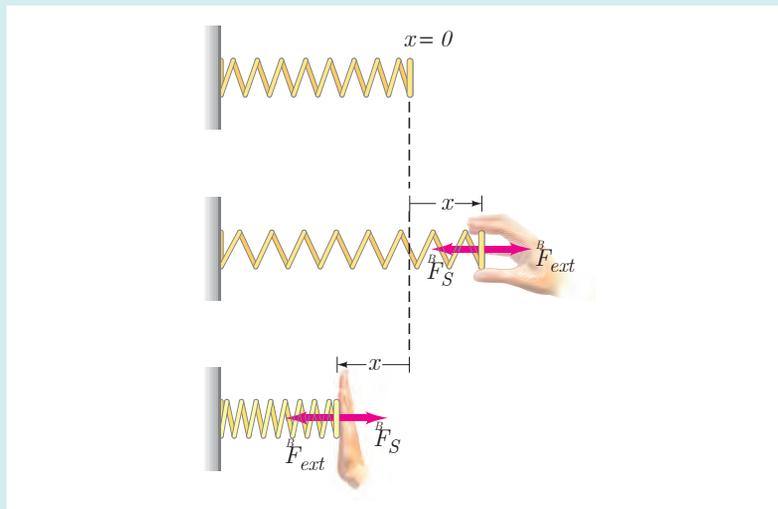
با توجه به اینکه تغییر انرژی پتانسیل فنر با منفی کار نیروی کشسانی فنر برابر است، داریم

$$\Delta U = -W$$

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

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.

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

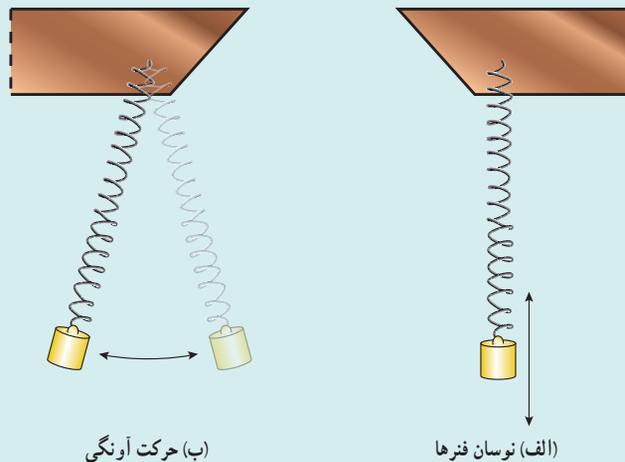


شکل ۲- (الف) فنر ابتدا در طول واهلیده خود است و سپس با اعمال نیروی خارجی F_{ext} ، کشیده و (ب) فشرده شده است.

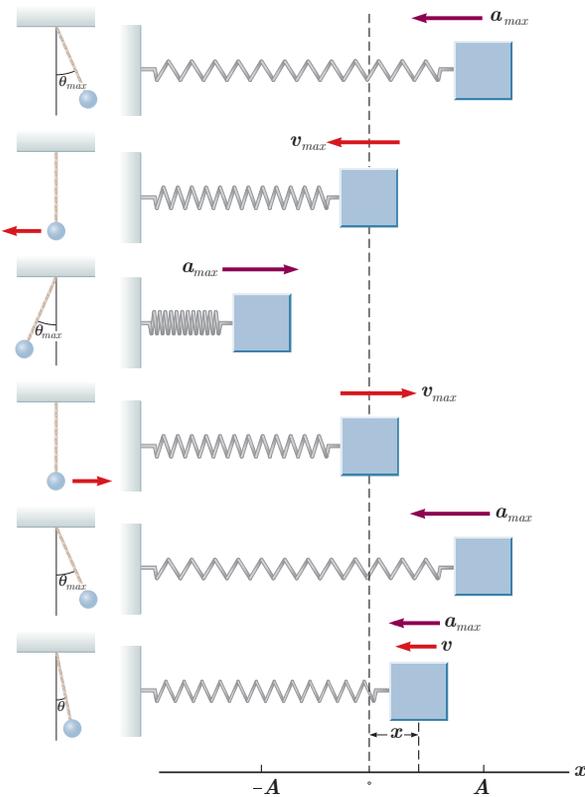
آونگ فنری و آونگ‌های جفت‌شده

آونگ فنری و آونگ‌های جفت‌شده مثال‌هایی مشهور از تبدیل انرژی در حرکت‌های نوسانی هستند. برای ساختن یک آونگ فنری، فنر نسبتاً سختی را از یک انتها آویزان کنید و سپس وزنه‌ای را به انتهای پایینی آن متصل کنید که بتواند فنر را به حدود $\frac{4}{3}$ طول اولیه‌اش برساند. جسم را پایین بکشید و سپس رها کنید. جسم در ابتدا در امتداد قائم نوسان می‌کند. اما به‌زودی این حرکت قائم با یک حرکت آونگی جایگزین می‌شود. با میراشدن این حرکت آونگی دوباره حرکت قائم ظاهر می‌شود. این دو نوع حرکت به‌طور متناوب جایگزین هم می‌شوند. اگر به‌جای حرکت قائم با حرکت آونگی نیز آغاز می‌کردید می‌توانستید به همین رفتار دو حالت برسید. در واقع در آونگ فنری انرژی به‌طور متناوب بین حرکت آونگی و نوسان‌های جرم – فنر مبادله می‌شود. شکل الف طرحی از یک آونگ فنری را نشان می‌دهد.

برای ساختن نوعی از آونگ‌های جفت‌شده 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 وزنه‌های مشابهی وصل کنید به‌طوری که فاصله وزنه‌ها 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 بپرسید و سپس رها کنید در خواهید یافت حرکت آونگ جابه‌جا شده به تدریج به آونگ دوم منتقل می‌شود. به محض این که این انتقال کامل شود آونگ اول ساکن شده و انتقال معکوس می‌گردد. این انتقال حرکت به‌طور متناوب بین دو آونگ ادامه خواهد یافت. در واقع در این جا نیز انرژی به‌طور متناوب بین این دو حرکت نوسانی مبادله می‌شود.



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.



شکل ۳-۳ نوسان و هم

برقرار است:

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

یا:

$$E = \pi^2 m A^2 f^2 \quad (3-3)$$

(انرژی مکانیکی نوسانگر هماهنگ ساده)

اگرچه بایستگی 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 ۳-۳ انرژی مکانیکی هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای متناسب با مربع دامنه (A) و مربع بسامد (f) 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 ۱۰ cm و دوره ۰.۵ 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 ۳-۳ و ۳-۲ خواهیم داشت:

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

(ب)

$$v_{max} = A\omega = A\left(\frac{2\pi}{T}\right) = (0.1 \text{ m})\left(\frac{2\pi}{0.5 \text{ s}}\right) = 1.26 \text{ m/s}$$

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 بدست می‌آید:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (8-3)$$

(دوره تناوب آونگ ساده)

این رابطه نشان می‌دهد که دوره تناوب آونگ ساده به جرم و دامنه آن بستگی ندارد. شکل ۸-۳ آونگ ساده، شامل وزنه‌های کوچک است که از نخ بی‌جرم و کش‌ناپذیری آویزان است.

مثال ۳-۳

بستگی دوره تناوب آونگ به تناسب گرانشی، روش دقیقی را برای تعیین g بدست می‌دهد. در این روش با اندازه‌گیری طول L و دوره تناوب T می‌توان g را بدست آورد. ژئوفیزیکدانان با استفاده از یک آونگ ساده به طول ۱۷۱ m که ۷۲۰ s نوسان کامل را در ۶۰۱۵ انجام می‌دهد، تناسب g زمین را در مکانی خاص تعیین می‌کند. وی مقدار g را در این مکان چقدر بدست 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 ۱۵° فراتر رود. در حالت کلی دوره تناوب آونگ ساده از رابطه زیر به دست می‌آید:

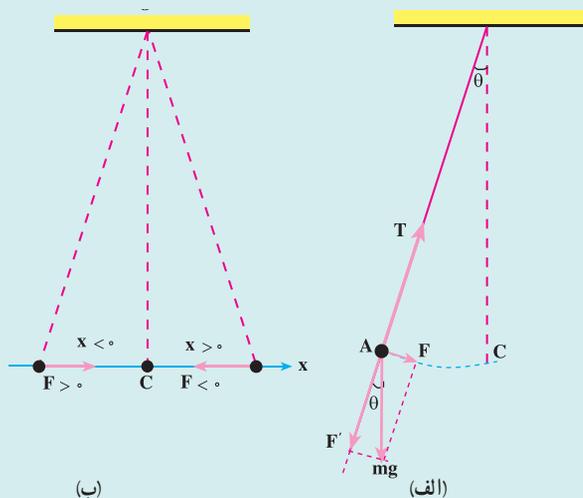
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \left[1 + \frac{1}{16} \theta^2 + \frac{11}{3072} \theta^4 + \dots \right]$$

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 ($m\vec{g}$) 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 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:

$$a = -\frac{g}{L} x \tag{۱}$$

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

$$a = \frac{F}{m} = \frac{-kx}{m} = -\frac{k}{m} x = -\omega^2 x \tag{۲}$$

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

پس

و در نتیجه

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

پرسش پیشنهادی

۱ چگونه می‌توانید یک تاب را که ساکن است، بی‌آنکه کسی آن را هل دهد به حرکت درآورید؟ پاسخ: یک روش این است که در بالاترین نقطه مسیر به حالت چنباتمه بنشینید و در پایین‌ترین نقطه بایستید. ایستادن، سرعت شما را زیاد می‌کند. با ایستادن، شما مرکز جرم خود را بالا می‌برید و کار انجام می‌دهید و این کار به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود و سرعت شما را زیاد می‌کند.

تمرین‌های پیشنهادی

۱ در مریخ شتاب گرانشی 3.8 m/s^2 شتاب سقوط آزاد در زمین است. دوره تناوب آونگی ساده در سطح مریخ $1/5 \text{ s}$ اندازه‌گیری شده است. اگر شخصی این آونگ را به سطح سیاره دیگری ببرد، دوره تناوب $9/2 \text{ s}$ را برای آن به دست می‌آورد. این، کدام سیاره است؟

پاسخ: از رابطه $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ به طول $L = 21 \text{ m}$ 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 $12/25 \text{ cm}$ است و تندی بیشینه $5/13 \text{ m/s}$ را دارد چقدر است؟ ثابت فنر $5/3 \text{ N/m}$ 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:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{2/868 \times 10^{-3} \text{ kg}}{5/3 \text{ N/m}}} = 0/150 \text{ s}$$

آزمایش پیشنهادی

۱ آونگی با گلوله آهنی به جرم 200 g و به طول 1 m از مرکز وزنه آونگ را اختیار کنید. وزنه آونگ را حدود 5° به یک طرف بکشید و رها کنید و در همان لحظه زمان سنج را نیز به کار اندازید. وقتی وزنه به نقطه اول بازگردد یک نوسان کامل انجام داده است. برای دقت بیشتر زمان 20 نوسان آونگ را به دست آورید و به کمک آن زمان یک نوسان کامل را به دست آورید. بار دیگر آونگ را حدود 10° بکشید و این آزمایش را تکرار کنید. سرانجام آزمایش را برای زاویه نوسان 2° انجام دهید و نتایج را در جدولی ثبت کنید. نتایج به دست آمده را تحلیل کنید. سپس همین آزمایش را با جرم های وزنه آونگ دیگری نیز انجام دهید و نتایج به دست آمده را تحلیل کنید.

آشاره شود نوسان های واداشته دوره ای هستند تا بدین ترتیب انرژی ای که صرف اصطکاک می شود به طور پیوسته با کاری که توسط نیروی دوره ای انجام می گیرد، جبران شود.

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

۳-۲ رابطه دوره تناوب آونگ ساده را برای θ حل می کنیم:

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

$$T = \frac{\text{زمان}}{\text{تعداد نوسان ها}} = \frac{60/5}{1/1335}$$

که در آن T دوره تناوب این آونگ است:

در نتیجه θ چنین به دست می آید:

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{4\pi^2 (1.71\text{m})}{(1/1335)^2} = 9.133\text{ m/s}^2$$

۳-۳ تعریف

در تمام مثال هایی 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 نوسان ها بسامد طبیعی گفته می شود. مطابق این تعریف، بسامد طبیعی سامانه جرم - فنر $f = \sqrt{k/m}/2\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f = \sqrt{g/L}/2\pi$ است. اما این نوسانگرها می تواند با اعمال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، نوسان واداشته گفته می شود و بسامد این نوسان را با f_k نمایش می دهند. مثالی از یک نوسان واداشته، تاب خوردن کودکی است که به طور دورانی 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 مانع از میراندن نوسان تاب می شود. اگر دامنه نوسان های تاب بزرگ تر و بزرگ تر شود حای آن است که بسامد نوسان های واداشته با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی ($f = f_k$) اصطلاحاً گفته می شود 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 طبیعی اش هل می دهیم. بدین تشدید را می توان با فعالیت ساده زیر بررسی کرد.



شکل ۳-۳ هل دادن تاب کودک به نوسان واداشته می شود.

۳-۳ فعالیت

آونگ های پارتنون: یک آونگ با وزنه سنگین و تعدادی آونگ سبک با طول های متفاوت را مطابق شکل سوار کنید. آونگها روی نخ می سوار شده اند که هر دو آنها را آن توسط گیرههایی به نخه آونگ متصل شده است. به آونگ سنگین اصطلاحاً آونگ برادرانه گفته می شود، زیرا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحه عمود بر صفحه شکل، موجب تاب خوردن نخ آونگ و در نتیجه به نوسان واداشتن سایر آونگها می شود. آونگ وادارنده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می کنید توضیح دهید.

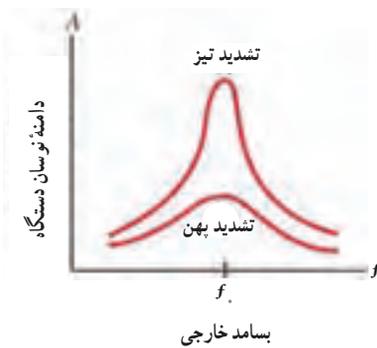


T... Barton's Pendulum

T... Driver Pendulum

ت... تغییر بدین آونگ در رزونانس و همی واداشته است.

خوب است در اینجا به تفاوت تشدید در میرایی ضعیف و قوی اشاره کنیم. اگر میرایی دستگاه ضعیف باشد، پدیده تشدید بزرگتر و واضح تر است (به این تشدید، **تشدید تیز** می گویند). در این تشدید، یک تفاوت ناچیز بین بسامد نیرو و بسامد طبیعی، دامنه نوسانها را به شدت کاهش می دهد. ولی در دستگاهی با میرایی زیاد (مثلاً آونگ در داخل آب) دامنه نوسان در تشدید کامل خیلی بارز نمی شود (به این تشدید، **تشدید پهن** می گویند)، اما خیلی هم سریع کاهش پیدا نمی کند.



فیزیک ۳

باسج: رابطه دوره تناوب آونگ ساده را برای θ حل می کنیم:

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

که در آن T دوره تناوب این آونگ است:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{g/L}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

در نتیجه θ چنین به دست می آید:

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{4\pi^2 (1.71\text{m})}{(1.03\text{s})^2} = 9.73\text{m/s}^2$$

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 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 واداشته** گفته می شود و بسامد این نوسان را با f_0 نمایش می دهند. مثالی از یک نوسان واداشته، تاب خوردن کودکی است که به طور دوره ای هل داده می شود (شکل ۳-۳). نوسان تاب می آنگه در ادامه حرکت هل داده شود مثالی از یک نوسان آزاد است. به طوری که نوسانهای 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 منبع انرژی نوسان تاب می شود. 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 می شود 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 طبیعی اش هل می دهیم. پدیده تشدید را می توان با فعالیت ساده زیر بررسی کرد.



شکل ۳-۳: هل دادن تاب، گرچه به نوسان واداشته می شود.

۳-۳ فعالیت

آونگهای پاروتون: یک آونگ با وزنه سنگین و تعدادی آونگ سبک با طولهای متفاوت را مطابق شکل سوار کنید. آونگهای روی نخ سوار شده اند که هر دو انتهای آن توسط گرههایی به نخه آونگ متصل شده است. به آونگ سنگین اصطلاحاً **آونگ مادر** گفته می شود. زیرا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحه عمود بر صفحه شکل، موجب تاب خوردن نخ آونگ و در نتیجه به نوسان واداشتن سایر آونگها می شود. آونگ واداشته را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می کنید توضیح دهید.

۱- نامشخص این آونگها را درون Driver Pendulum و سعی واداشته است.

۲- Barrow's Pendulum ۳- Driver Pendulum

تعریف دقیق تر تشدید مبتنی بر افزایش دامنه سرعت است و در این کتاب با اندکی اغماض آن را براساس افزایش دامنه جابه جایی تعریف کرده ایم.

در اینجا ممکن است دانش آموزان به نوسانهای دیگری هم اشاره کنند که بدون ضربه ای وادارنده رخ می دهند و مثلاً در یک تاب دونفره با نشستن و برخاستن به نوبت بچه ها انجام می گیرد. 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 می بینید.



فیلم

در این فیلم تشدید در یک آونگ را می بینید.



فیلم

در این فیلم تشدید در دو دستگاه جرم - فنر را می بینید.

فیلم

در این فیلم دیاپازون‌های رُخ به رُخی را می بینید که دومی با بسامد اول به تشدید درمی آید.

فیلم

در این فیلم دیاپازون‌های موازی‌ای را می بینید که بسامد ارتعاش آنها کم و مثلاً یکی ۲۵۶Hz و دیگری ۲۵۷Hz است. در این صورت شما صدایی موسوم به *زئرش* 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 آونگ‌ها با دامنه بزرگی به نوسان درمی آیند، در حالی که برخی ساکن مانده و یا با دامنه‌های بسیار کوچکی به نوسان درمی آیند. در واقع آنچه رخ می دهد براساس پدیده تشدید توضیح داده می شود و آن آونگ‌هایی که با دامنه بزرگ به نوسان درمی آیند در واقع بسامد طبیعی‌ای دارند که برابر یا در حول و حوش بسامد آونگ وادارنده است و اگر تکانی ناچیز در برخی دیگر از آونگ‌ها مشاهده می شود صرفاً براساس انتقال انرژی ناچیزی است که برای این آونگ‌ها 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 آونگ‌های بارتون، بدیهی است آونگی با بیشترین دامنه به نوسان درمی آید که هم طول آونگ وادارنده باشد.

فیلم ۳-۳

پاسخ: رابطه دوره تناوب آونگ ساده را برای ω حل می کنیم:

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

که در آن T دوره تناوب این آونگ است:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{g/L}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

در نتیجه ω چنین بدست می آید:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\pi \sqrt{L/g}} = \sqrt{g/L}$$

۳-۳ 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 می شود. مطابق این تعریف، بسامد طبیعی سامانه جرم - فنر $\omega = \sqrt{g/L}$ 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 ω_0 نمایش می دهیم. مثالی از یک نوسان وادارنده، تاب خوردن کودکی است که به طور دوره‌ای هل داده می شود (شکل ۳-۳). نوسان تاب می آنکه در ادامه حرکت هل داده شود مثالی از یک نوسان آزاد است. به طوری که نوسان‌های 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 مابغ از میراندن نوسان تاب می شود. اگر دامنه نوسان‌های تاب بزرگ‌تر و بزرگ‌تر شود جایی از آن است که بسامد نوسان‌های وادارنده با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی ($\omega = \omega_0$) اصطلاحاً گفته می شود 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 می دهیم. پدیده تشدید را می توان با فعالیت ساده‌تری بررسی کرد.



شکل ۳-۳: هل دادن تاب کودک به نوسان وادارنده می شود.

۳-۳ فعالیت

آونگ‌های بارتون: یک آونگ با وزنه سنگین و تعدادی آونگ سبک با طول‌های متفاوت را مطابق شکل سوار کنید. آونگ‌ها روی نخ‌های سوار شده‌اند که هر دو انتهای آن توسط گیره‌هایی به تخته آویز متصل شده است. به آونگ سنگین اصطلاحاً **آونگ وادارنده** گفته می شود. زیرا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحه عمود بر صفحه شکل، موجب تاب خوردن نخ آویز و در نتیجه به نوسان وادارنده سایر آونگ‌ها می شود. آونگ وادارنده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می کنید توضیح دهید.

۱- نام‌های این آونگ‌ها را بنویسید و سعی وادارنده است.

۲- Driver Pendulum

۳- Barton's Pendulum

از لحاظ تاریخی خوب است بدانید آونگ‌های بارتون منتسب به *ادوین 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 آونگ‌های 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.



دانستنی 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 ۲- آزمایشی برای زیاد شدن نوسان‌های پارامتری در آونگ ساده.

شکل ۱- زیاد شدن نوسان‌های تاب

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 زیادتر 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 دستگاه با بسامد زاویه‌ای وادارنده ω_d برابر شود، تشدید رخ می‌دهد: $\omega_d = \omega$. در این تمرین نیز (به درستی) گستره بسامدهای زاویه‌ای آونگ وادارنده داده شده است و باید بررسی کنیم که آیا بسامدهای زاویه‌ای آونگ‌ها در این گستره قرار می‌گیرند یا خیر.

$\omega = 2\pi/T$ بسامد زاویه‌ای است که در آن $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ دوره نوسان آونگ ساده است. همان‌طور که گفتیم برای آونگ‌ها به شدت به نوسان درآیند باید بسامد زاویه‌ای آنها در گستره 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 0.8 m که برای آن ω چنین می‌شود:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{9.8 \text{ m/s}^2}{0.8 \text{ m}}} = 3.5 \text{ rad/s}$$

آونگ با طول $1/2\text{ m}$ که برای آن ω چنین می‌شود:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{9.8 \text{ m/s}^2}{1/2 \text{ m}}} = 2/9 \text{ rad/s} \approx 2.2 \text{ rad/s}$$

اگر بسامد زاویه‌ای را برای سه آونگ دیگر بررسی کنیم، به ترتیب برای آونگ‌های به طول 0.4 m ، 0.2 m و 0.1 m ، 4.9 rad/s ، 1.9 rad/s و 1.4 rad/s می‌رسیم که در گستره بسامدهای زاویه‌ای داده شده نیستند و بنابراین به تشدید نمی‌انجامند. البته با توجه به تذکر داده شده در صورت تمرین، درمی‌یابیم آونگ به طول $2/8\text{ m}$ نیز با دامنه 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 نیمه بلند 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 زمین لرزه وقتی به مکزیکوسیتی در فاصله 400 km کیلومتری از محل وقوع زمین لرزه 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 $0.2g$ (به شتاب گرانی) و بسامد زاویه‌ای آنها در حول و حوش 3 rad/s بود که این تقریباً برابر با بسامد زاویه‌ای طبیعی ساختمان‌های نیمه بلند شهر بود.

شکل ۳-۳ نوسان و موج

تمرین ۳-۳

طول بخاری آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان است، عبارت است از 0.4 m ، 0.8 m ، 1.2 m ، 1.6 m ، 2.0 m ، 2.4 m ، 2.8 m ، 3.2 m ، 3.6 m ، 4.0 m ، 4.4 m ، 4.8 m ، 5.2 m ، 5.6 m ، 6.0 m ، 6.4 m ، 6.8 m ، 7.2 m ، 7.6 m ، 8.0 m ، 8.4 m ، 8.8 m ، 9.2 m ، 9.6 m ، 10.0 m ، 10.4 m ، 10.8 m ، 11.2 m ، 11.6 m ، 12.0 m ، 12.4 m ، 12.8 m ، 13.2 m ، 13.6 m ، 14.0 m ، 14.4 m ، 14.8 m ، 15.2 m ، 15.6 m ، 16.0 m ، 16.4 m ، 16.8 m ، 17.2 m ، 17.6 m ، 18.0 m ، 18.4 m ، 18.8 m ، 19.2 m ، 19.6 m ، 20.0 m ، 20.4 m ، 20.8 m ، 21.2 m ، 21.6 m ، 22.0 m ، 22.4 m ، 22.8 m ، 23.2 m ، 23.6 m ، 24.0 m ، 24.4 m ، 24.8 m ، 25.2 m ، 25.6 m ، 26.0 m ، 26.4 m ، 26.8 m ، 27.2 m ، 27.6 m ، 28.0 m ، 28.4 m ، 28.8 m ، 29.2 m ، 29.6 m ، 30.0 m ، 30.4 m ، 30.8 m ، 31.2 m ، 31.6 m ، 32.0 m ، 32.4 m ، 32.8 m ، 33.2 m ، 33.6 m ، 34.0 m ، 34.4 m ، 34.8 m ، 35.2 m ، 35.6 m ، 36.0 m ، 36.4 m ، 36.8 m ، 37.2 m ، 37.6 m ، 38.0 m ، 38.4 m ، 38.8 m ، 39.2 m ، 39.6 m ، 40.0 m ، 40.4 m ، 40.8 m ، 41.2 m ، 41.6 m ، 42.0 m ، 42.4 m ، 42.8 m ، 43.2 m ، 43.6 m ، 44.0 m ، 44.4 m ، 44.8 m ، 45.2 m ، 45.6 m ، 46.0 m ، 46.4 m ، 46.8 m ، 47.2 m ، 47.6 m ، 48.0 m ، 48.4 m ، 48.8 m ، 49.2 m ، 49.6 m ، 50.0 m ، 50.4 m ، 50.8 m ، 51.2 m ، 51.6 m ، 52.0 m ، 52.4 m ، 52.8 m ، 53.2 m ، 53.6 m ، 54.0 m ، 54.4 m ، 54.8 m ، 55.2 m ، 55.6 m ، 56.0 m ، 56.4 m ، 56.8 m ، 57.2 m ، 57.6 m ، 58.0 m ، 58.4 m ، 58.8 m ، 59.2 m ، 59.6 m ، 60.0 m ، 60.4 m ، 60.8 m ، 61.2 m ، 61.6 m ، 62.0 m ، 62.4 m ، 62.8 m ، 63.2 m ، 63.6 m ، 64.0 m ، 64.4 m ، 64.8 m ، 65.2 m ، 65.6 m ، 66.0 m ، 66.4 m ، 66.8 m ، 67.2 m ، 67.6 m ، 68.0 m ، 68.4 m ، 68.8 m ، 69.2 m ، 69.6 m ، 70.0 m ، 70.4 m ، 70.8 m ، 71.2 m ، 71.6 m ، 72.0 m ، 72.4 m ، 72.8 m ، 73.2 m ، 73.6 m ، 74.0 m ، 74.4 m ، 74.8 m ، 75.2 m ، 75.6 m ، 76.0 m ، 76.4 m ، 76.8 m ، 77.2 m ، 77.6 m ، 78.0 m ، 78.4 m ، 78.8 m ، 79.2 m ، 79.6 m ، 80.0 m ، 80.4 m ، 80.8 m ، 81.2 m ، 81.6 m ، 82.0 m ، 82.4 m ، 82.8 m ، 83.2 m ، 83.6 m ، 84.0 m ، 84.4 m ، 84.8 m ، 85.2 m ، 85.6 m ، 86.0 m ، 86.4 m ، 86.8 m ، 87.2 m ، 87.6 m ، 88.0 m ، 88.4 m ، 88.8 m ، 89.2 m ، 89.6 m ، 90.0 m ، 90.4 m ، 90.8 m ، 91.2 m ، 91.6 m ، 92.0 m ، 92.4 m ، 92.8 m ، 93.2 m ، 93.6 m ، 94.0 m ، 94.4 m ، 94.8 m ، 95.2 m ، 95.6 m ، 96.0 m ، 96.4 m ، 96.8 m ، 97.2 m ، 97.6 m ، 98.0 m ، 98.4 m ، 98.8 m ، 99.2 m ، 99.6 m ، 100.0 m ، 100.4 m ، 100.8 m ، 101.2 m ، 101.6 m ، 102.0 m ، 102.4 m ، 102.8 m ، 103.2 m ، 103.6 m ، 104.0 m ، 104.4 m ، 104.8 m ، 105.2 m ، 105.6 m ، 106.0 m ، 106.4 m ، 106.8 m ، 107.2 m ، 107.6 m ، 108.0 m ، 108.4 m ، 108.8 m ، 109.2 m ، 109.6 m ، 110.0 m ، 110.4 m ، 110.8 m ، 111.2 m ، 111.6 m ، 112.0 m ، 112.4 m ، 112.8 m ، 113.2 m ، 113.6 m ، 114.0 m ، 114.4 m ، 114.8 m ، 115.2 m ، 115.6 m ، 116.0 m ، 116.4 m ، 116.8 m ، 117.2 m ، 117.6 m ، 118.0 m ، 118.4 m ، 118.8 m ، 119.2 m ، 119.6 m ، 120.0 m ، 120.4 m ، 120.8 m ، 121.2 m ، 121.6 m ، 122.0 m ، 122.4 m ، 122.8 m ، 123.2 m ، 123.6 m ، 124.0 m ، 124.4 m ، 124.8 m ، 125.2 m ، 125.6 m ، 126.0 m ، 126.4 m ، 126.8 m ، 127.2 m ، 127.6 m ، 128.0 m ، 128.4 m ، 128.8 m ، 129.2 m ، 129.6 m ، 130.0 m ، 130.4 m ، 130.8 m ، 131.2 m ، 131.6 m ، 132.0 m ، 132.4 m ، 132.8 m ، 133.2 m ، 133.6 m ، 134.0 m ، 134.4 m ، 134.8 m ، 135.2 m ، 135.6 m ، 136.0 m ، 136.4 m ، 136.8 m ، 137.2 m ، 137.6 m ، 138.0 m ، 138.4 m ، 138.8 m ، 139.2 m ، 139.6 m ، 140.0 m ، 140.4 m ، 140.8 m ، 141.2 m ، 141.6 m ، 142.0 m ، 142.4 m ، 142.8 m ، 143.2 m ، 143.6 m ، 144.0 m ، 144.4 m ، 144.8 m ، 145.2 m ، 145.6 m ، 146.0 m ، 146.4 m ، 146.8 m ، 147.2 m ، 147.6 m ، 148.0 m ، 148.4 m ، 148.8 m ، 149.2 m ، 149.6 m ، 150.0 m ، 150.4 m ، 150.8 m ، 151.2 m ، 151.6 m ، 152.0 m ، 152.4 m ، 152.8 m ، 153.2 m ، 153.6 m ، 154.0 m ، 154.4 m ، 154.8 m ، 155.2 m ، 155.6 m ، 156.0 m ، 156.4 m ، 156.8 m ، 157.2 m ، 157.6 m ، 158.0 m ، 158.4 m ، 158.8 m ، 159.2 m ، 159.6 m ، 160.0 m ، 160.4 m ، 160.8 m ، 161.2 m ، 161.6 m ، 162.0 m ، 162.4 m ، 162.8 m ، 163.2 m ، 163.6 m ، 164.0 m ، 164.4 m ، 164.8 m ، 165.2 m ، 165.6 m ، 166.0 m ، 166.4 m ، 166.8 m ، 167.2 m ، 167.6 m ، 168.0 m ، 168.4 m ، 168.8 m ، 169.2 m ، 169.6 m ، 170.0 m ، 170.4 m ، 170.8 m ، 171.2 m ، 171.6 m ، 172.0 m ، 172.4 m ، 172.8 m ، 173.2 m ، 173.6 m ، 174.0 m ، 174.4 m ، 174.8 m ، 175.2 m ، 175.6 m ، 176.0 m ، 176.4 m ، 176.8 m ، 177.2 m ، 177.6 m ، 178.0 m ، 178.4 m ، 178.8 m ، 179.2 m ، 179.6 m ، 180.0 m ، 180.4 m ، 180.8 m ، 181.2 m ، 181.6 m ، 182.0 m ، 182.4 m ، 182.8 m ، 183.2 m ، 183.6 m ، 184.0 m ، 184.4 m ، 184.8 m ، 185.2 m ، 185.6 m ، 186.0 m ، 186.4 m ، 186.8 m ، 187.2 m ، 187.6 m ، 188.0 m ، 188.4 m ، 188.8 m ، 189.2 m ، 189.6 m ، 190.0 m ، 190.4 m ، 190.8 m ، 191.2 m ، 191.6 m ، 192.0 m ، 192.4 m ، 192.8 m ، 193.2 m ، 193.6 m ، 194.0 m ، 194.4 m ، 194.8 m ، 195.2 m ، 195.6 m ، 196.0 m ، 196.4 m ، 196.8 m ، 197.2 m ، 197.6 m ، 198.0 m ، 198.4 m ، 198.8 m ، 199.2 m ، 199.6 m ، 200.0 m ، 200.4 m ، 200.8 m ، 201.2 m ، 201.6 m ، 202.0 m ، 202.4 m ، 202.8 m ، 203.2 m ، 203.6 m ، 204.0 m ، 204.4 m ، 204.8 m ، 205.2 m ، 205.6 m ، 206.0 m ، 206.4 m ، 206.8 m ، 207.2 m ، 207.6 m ، 208.0 m ، 208.4 m ، 208.8 m ، 209.2 m ، 209.6 m ، 210.0 m ، 210.4 m ، 210.8 m ، 211.2 m ، 211.6 m ، 212.0 m ، 212.4 m ، 212.8 m ، 213.2 m ، 213.6 m ، 214.0 m ، 214.4 m ، 214.8 m ، 215.2 m ، 215.6 m ، 216.0 m ، 216.4 m ، 216.8 m ، 217.2 m ، 217.6 m ، 218.0 m ، 218.4 m ، 218.8 m ، 219.2 m ، 219.6 m ، 220.0 m ، 220.4 m ، 220.8 m ، 221.2 m ، 221.6 m ، 222.0 m ، 222.4 m ، 222.8 m ، 223.2 m ، 223.6 m ، 224.0 m ، 224.4 m ، 224.8 m ، 225.2 m ، 225.6 m ، 226.0 m ، 226.4 m ، 226.8 m ، 227.2 m ، 227.6 m ، 228.0 m ، 228.4 m ، 228.8 m ، 229.2 m ، 229.6 m ، 230.0 m ، 230.4 m ، 230.8 m ، 231.2 m ، 231.6 m ، 232.0 m ، 232.4 m ، 232.8 m ، 233.2 m ، 233.6 m ، 234.0 m ، 234.4 m ، 234.8 m ، 235.2 m ، 235.6 m ، 236.0 m ، 236.4 m ، 236.8 m ، 237.2 m ، 237.6 m ، 238.0 m ، 238.4 m ، 238.8 m ، 239.2 m ، 239.6 m ، 240.0 m ، 240.4 m ، 240.8 m ، 241.2 m ، 241.6 m ، 242.0 m ، 242.4 m ، 242.8 m ، 243.2 m ، 243.6 m ، 244.0 m ، 244.4 m ، 244.8 m ، 245.2 m ، 245.6 m ، 246.0 m ، 246.4 m ، 246.8 m ، 247.2 m ، 247.6 m ، 248.0 m ، 248.4 m ، 248.8 m ، 249.2 m ، 249.6 m ، 250.0 m ، 250.4 m ، 250.8 m ، 251.2 m ، 251.6 m ، 252.0 m ، 252.4 m ، 252.8 m ، 253.2 m ، 253.6 m ، 254.0 m ، 254.4 m ، 254.8 m ، 255.2 m ، 255.6 m ، 256.0 m ، 256.4 m ، 256.8 m ، 257.2 m ، 257.6 m ، 258.0 m ، 258.4 m ، 258.8 m ، 259.2 m ، 259.6 m ، 260.0 m ، 260.4 m ، 260.8 m ، 261.2 m ، 261.6 m ، 262.0 m ، 262.4 m ، 262.8 m ، 263.2 m ، 263.6 m ، 264.0 m ، 264.4 m ، 264.8 m ، 265.2 m ، 265.6 m ، 266.0 m ، 266.4 m ، 266.8 m ، 267.2 m ، 267.6 m ، 268.0 m ، 268.4 m ، 268.8 m ، 269.2 m ، 269.6 m ، 270.0 m ، 270.4 m ، 270.8 m ، 271.2 m ، 271.6 m ، 272.0 m ، 272.4 m ، 272.8 m ، 273.2 m ، 273.6 m ، 274.0 m ، 274.4 m ، 274.8 m ، 275.2 m ، 275.6 m ، 276.0 m ، 276.4 m ، 276.8 m ، $277.2\text{$

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 زوری 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 $1/5\text{Hz}$ ، $1/2\text{Hz}$ ، $1/0\text{ Hz}$ ، $0/75\text{Hz}$ ، $0/5\text{Hz}$ و $2/0\text{ Hz}$ 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.



فصل ۳: نوسان و موج

تمرین ۳-۲

طول تعدادی آرگن ساید که از میله‌های افقی آزادی‌اند، عبارت‌اند از: 0.70m , 0.80m , 0.90m , 1.00m , 1.10m , 1.20m . فرض کنید میله دستخوش نوسان‌های افقی با بسامد زاویه‌ای در گستره $2\pi \text{ rad/s}$ تا $4\pi \text{ rad/s}$ شود. کدام آرگن‌ها با دامنه بزرگ‌تری به نوسان درمی‌آیند؟ توجه کنید کهجه تشدید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنه نوسان در نزدیک این بسامد همچنان بزرگ است.

پرست ۳-۳

در زمینی لرزه‌خیزی (به بزرگی 8.1 در مقیاس ریشتر) که در ساحل غربی میکروک در سال ۱۹۸۵ اتفاق افتاد ساختمان‌های نیمه‌بلند فرو ریختند، ولی ساختمان‌های کوتاه‌تر و بلندتر بارها ماندند. علت این پدیده را توضیح دهید.



الف) ساختمان‌های کوتاه و ب) ساختمان‌های بلند، در زمینی لرزه میکروکسیسی بر جای ماندند.

۵-۳ موج و انواع آن

هر گاه در ناحیه‌ای از یک محیط کنسان، ارتعاشی بوجود آید، موجب پدید آمدن ارتعاش‌های برابری دیگری می‌شود که از محل شروع ارتعاش دور و دورترند، و به این ترتیب آنچه را که موج می‌نامند بوجود می‌آید. موج‌ها را عموماً به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: **موج‌های مکانیکی** و **موج‌های الکترومغناطیسی**. موج‌های مکانیکی - مانند موج‌های روی سطح آب - اشکال ۳-۳ و ۳-۴ و موج‌های صوتی - برای انتشار خود به یک محیط مادی نیاز دارند. و موج‌های الکترومغناطیسی - مانند نور مرئی، موج‌های رادیویی و تلویزیونی، میکروموج و پروهای X - برای انتشار خود به محیط مادی نیاز ندارند.



شکل ۳-۳-۱) پرتاب سنگ در آب، فروردنگ‌ها و برداشتی‌هایی با برآی شکل بر سطح آب بخش می‌برند.



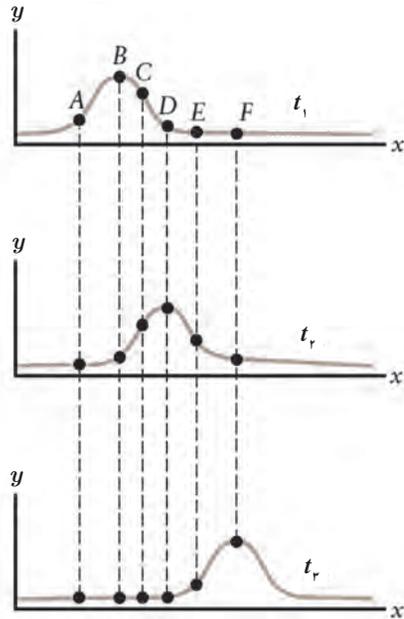
شکل ۳-۳-۲) شایین ایجاد موج در یک فنر بسته‌شده.

برغم متفاوت بودن منشأ امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی، همگی آنها مشخصه‌های یکسانی دارند و رفتار آنها از قاندهای کلی پیروی می‌کنند که در هر پدیده موجی برقرار است.

اگر مانند شکل ۳-۳-۱ یک سر فنر بسته‌شده‌ای را با سرعت به چپ و راست تکان دهید، موجی به شکل یک **تپ** در طول فنر منتشر می‌شود. وقتی سر آزاد فنر را مانند شکل ۳-۳-۲ رو به بالا حرکت می‌دهد، 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 نوبه خود شروع به بالا کشیدن بخش بعدی می‌کند و این روند ادامه می‌یابد. به همین ترتیب، پایین کشیدن سر آزاد

۱-۳-۳-۱) سر فنر سلسلی (Slinky) می‌گرد.

خوب است به تمایز بین تپ و موج اشاره شود. هر دوی اینها به آشفستگی در محیط اشاره دارند. اما موج آشفستگی‌ای پیوسته است، درحالی که تپ یک آشفستگی تنها است. خوب است به‌عنوان مثالی مفهومی نقش یک تپ را در سه زمان مختلف نشان دهید. اشاره کنید که تپ به طرف راست در حال حرکت است و هنگام حرکت، ذره‌های طناب را به بالا و پایین به نوسان درمی‌آورد. نقش تپ هنگام حرکت تغییری نمی‌کند و هر 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.



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.

را می بینید.



فیلم

در این فیلم نمایشی از انتشار موج‌های طولی و عرضی



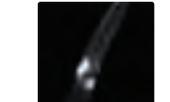
فیلم

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

فیلد ۳۱
 راسای نوسان هر چه قدر در شکل فتر ایجاد می‌شود که با تندی در طول فتر حرکت می‌کند. اگر دست خود را بایی به بالا و پایین حرکت دهید یک موج پیوسته با تندی در طول فتر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فتر که در هنگام عبور موج به بالا و پایین نوسان می‌کند دقت کنید درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فتر، عبور بر جهت حرکت موج است، که به آن **موج عرضی** گفته می‌شود.

از این فتر بلند می‌توان برای ایجاد نوع دیگری از موج موسوم به **موج طولی** نیز استفاده کرد. اگر این بار، سیر آزاد فتر را به جای اینکه به بالا و پایین با به جب و راست حرکت دهد، به سرعت به جلو و عقب برود، یک تب در طول فتر به راه می‌افتد (شکل ۱۴-۳). و اگر دست خود را بایی به جلو و عقب حرکت دهید یک موج طولی پیوسته با تندی در طول فتر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فتر که در هنگام عبور این موج به جب و راست نوسان می‌کند دقت کنید، درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فتر در راستای حرکت موج است (شکل ۱۴-۴). به همین دلیل است که به چنین موجی، **موج طولی** می‌گویند.

به موج‌های عرضی و طولی که تا اینجا بررسی شد، **موج‌های پی‌رونده** گفته می‌شود. زیرا هر دو این موج‌ها از نقطه‌ای در نقطه دیگر حرکت کرده و انرژی را با خود منتقل می‌کنند. توجه کنید این موج است که از یک سر به سر دیگر حرکت می‌کند نه **ماده‌ای از سر مشرف‌های لای فتر** که موج در آن حرکت می‌کند. همچنین دریافتید که برای ایجاد چنین امواجی به یک جسم (جسمه) نوسانی نیاز دارید و موج از این جسمه دور می‌شود. و اگر جسمه بطور هماهنگ ساده نوسان کند، اجزای محیط حول نقطه تعادل خود با همان بسامد جسمه نوسان می‌کنند.



شکل ۱۴-۳ نمایش ایجاد یک تب طولی در یک فتر بلند کشیده شده

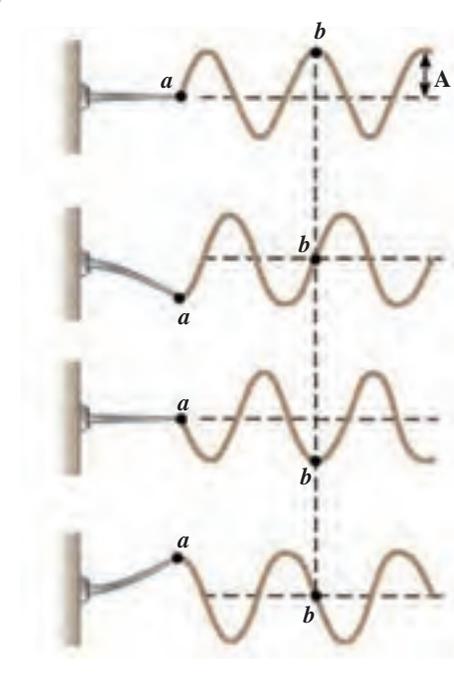
شکل ۱۴-۴ نمایش ایجاد یک تب طولی در یک فتر بلند کشیده شده

پرسش ۳۱-۲
 همان‌طور که گفتیم یکی از ویژگی‌های موج پی‌رونده انتقال انرژی از یک نقطه به نقطه دیگر، در جهت انتشار موج است. با در نظر گرفتن یک تب طولی در یک فتر بلند کشیده شده، این ویژگی را توضیح دهید.

۳-۲ مشخصه‌های موج

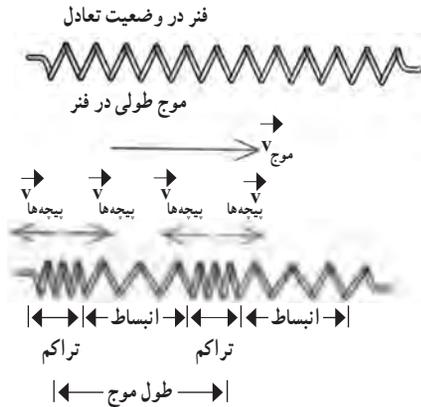
برای مطالعه برخی از مشخصه‌های موج از وسیله‌ای موسوم به **تنت** موج استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این وسیله در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده است. این وسیله شامل یک تنت نینبیه‌ای که عمیق و یک نوسان‌ساز است، یک راه‌مشاهده و فنار موج، استفاده از سیم‌های است که توسط لایب از سطح آن داخل تنت بر ورقه کاغذی زیر تنت تشکیل می‌شود. آرمادگی‌ها و فرورفتگی‌های موج

شکل ۱۵-۳ طرح از دستگاه تنت موج



هرچند به کزات در متن درس اشاره شده است، با این حال خوب است همچنان در کلاس به این خطای رایج که برخی دانش‌آموزان می‌اندیشند با انتشار موج، ذره‌های محیط نیز از جایی به جای دیگر منتقل می‌شوند، اشاره کنید. به عبارت دیگر، دانش‌آموزان اغلب حرکت نوسانی ذره‌های محیط کشسان حول نقطه تعادل را با حرکت موج اشتباه می‌گیرند. ارجاع به شکل ۱۹-۳ کتاب و یا شکل روبه‌رو - با توجه دادن دانش‌آموزان به نقطه *b* محیط - می‌تواند راهگشا باشد.

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



فصل ۳-۳

رسانای نوسان هر چه فنر

فنر موجب باین کشیده شدن بخش‌های بعدی فنر می‌شود و بدین ترتیب آنتنگی‌ای در شکل فنر ایجاد می‌شود که با نندی « در طول فنر حرکت می‌کند. اگر دست خود را بیایی به بالا و پایین حرکت دهی یک موج پیوسته با نندی « در طول فنر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فنر که در هنگام عبور موج به بالا و پایین نوسان می‌کند دقت کنی درمی‌یابی جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فنر عبور بر جهت حرکت موج است، که به آن «موج عرضی» گفته می‌شود.

از این فنر بلند می‌توان برای ایجاد توج دیگری از موج موسوم به «موج طولی» نیز استفاده کرد. اگر این بار، سر آزاد فنر را به جای اینکه به بالا و پایین یا به چپ و راست حرکت دهد، به سرعت به جلو و عقب برده، یک تب در طول فنر به راه می‌افتد (شکل ۳-۳) و اگر دست خود را بیایی به جلو و عقب حرکت دهی یک موج طولی پیوسته با نندی « در طول فنر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فنر که در هنگام عبور این موج به چپ و راست نوسان می‌کند دقت کنی، درمی‌یابی جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فنر در راستای حرکت موج است (شکل ۳-۳). به همین دلیل است که به چنین موجی، «موج طولی» می‌گویند.

به موج‌های عرضی و طولی که تا اینجا بررسی شده، «موج‌های پیش‌رونده» گفته می‌شود. زیرا، هر دو این موج‌ها از نقطه‌ای به نقطه دیگر حرکت کرده و انرژی را با خود منتقل می‌کنند. توجه کنی این موج است که از یک سر به سر دیگر حرکت می‌کند نه مادامی (در مثال‌های بالا فرض) که موج در آن حرکت می‌کند. همچنین دریافته که برای ایجاد چنین امواجی به یک جسم (جسمه) نوسانی نیاز داریم و موج از این جسمه در می‌نویسد، و اگر جسمه به‌طور هادانگ ساد نوسان کند، اجزای محیط حول نقطه تعادل خود با همان بسامد جسمه نوسان می‌کنند.

رسانای نوسان هر چه فنر

رسانای انتشار موج

شکل ۳-۳ اثر جالی که موج به سمت راست حرکت می‌کند. هر قطعه فنر هم‌زمان با حرکت موج به چپ و راست نوسان می‌کند. به طوری که ناحیه‌های چسبندگی و پراشنگی به‌طور متناوب بر طول فنر ظاهر می‌شود.

پرسش ۳-۳

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

۳-۳ مشخصه‌های موج

برای مطالعه برخی از مشخصه‌های موج از وسیله‌ای موسوم به «تنت موج» استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این وسیله در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. این وسیله شامل یک تنت جنبشی (ناشی از یک تواسان‌ساز است، یک راه مشاهده و قمار موج، استفاده از سازه‌ای است که توسط لامب از سطح آب داخل تنت و پرورده کاغذی زیر تنت تشکیل می‌شود. برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های موج

نوسان‌ساز

لامب

تنت موج

کافاز سنج

شکل ۳-۳ طرحی از دستگاه تنت موج

۷۰

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

در این فیلم یک ماشین سازنده موج را می‌بینید.



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

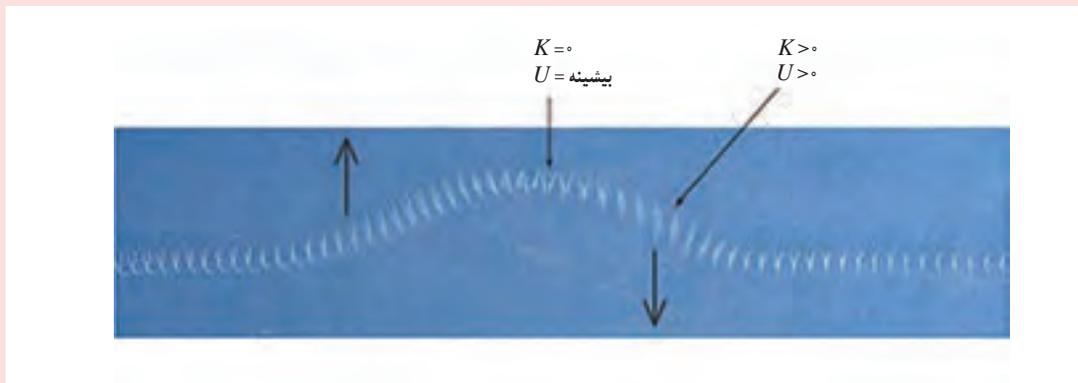


پاسخ پرسش ۳-۳

همان‌طور که در متن کتاب آمده است وقتی یک سر فنر بلند کشیده شده‌ای را به سرعت به جلو و عقب تکان دهیم یک تب طولی در فنر به حرکت در می‌آید. این تب که در طول فنر به حرکت می‌افتد، انرژی را از یک سر فنر به سر دیگر آن انتقال می‌دهد. توجه کنی که در محل تب، فنر دارای انرژی جنبشی (ناشی از حرکت به جلو و عقب اجزا) و انرژی پتانسیل (ناشی از تغییر کشیدگی اجزای فنر در محل عبور تب) است. بنابراین تب 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 فنر است که انرژی تب را فراهم می‌سازد. خوب است به‌عنوان پرسشی تکمیلی همین پرسش را برای تبی عرضی نیز بررسی کنی.

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 45cm ایجاد می‌کنید. 0.8s 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:

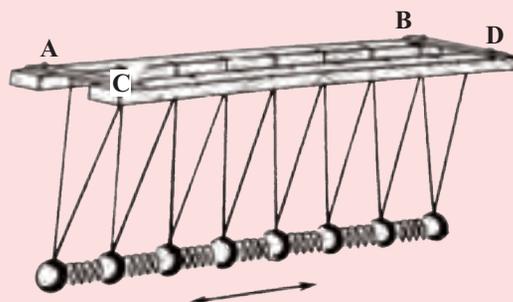
$$l = v\Delta t = (2/5\text{m/s})(0.8\text{s}) = 2/5\text{m}$$

فعالیت‌های پیشنهادی

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

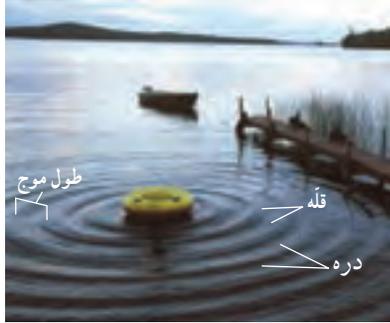


ب) طرحی از این اسباب آزمایش



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.



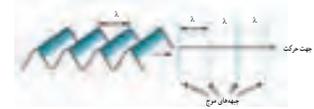
وب‌گاه www.falsald.com/ripple شبیه‌سازی‌هایی دربارهٔ کلیهٔ آزمایش‌های ممکن با تشبیه موج دارد.



شکل ۳-۱۶: نوسان و موج



روی سطح آب، به وضوح در سایهٔ تشکیل شده بر رویهٔ کافه دیده می‌شود. اگر مانند شکل ۳-۱۵، تپه‌ای را بر سطح آب به نوسان در آوریم، موجی تخت بر 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** (استیج) 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 برابری مسافتی است که موج در مدت دورهٔ تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.



شکل ۳-۱۷: طریقی از تشکیل جبهه‌های موج تخت بر سطح آب یک تشبیه موج عمیق، روسی مناسب برای نمایش یک موج پیوسته، هستند.

با استفاده از آنچه برای موج سطحی در تشبیه موج آموختیم سایر مشخصه‌های این موج را نیز می‌توانیم معرفی کنیم.
دانه (۱): بیشینهٔ فاصلهٔ یک ذره از مکان تعادل، **دانهٔ موج** نامیده می‌شود که همان فاصلهٔ قله یا دره نسبت به سطح آرام با ساکن است.
دورهٔ تناوب (T): مدت زمانی که هر ذره محیط یک نوسان کامل انجام می‌دهد دورهٔ تناوب موج نامیده می‌شود که برابر با زمانی است که جبههٔ موج یک نوسان کامل انجام می‌دهد.
بسامد (f): تعداد نوسان‌های انجام شده توسط هر ذره محیط در یک ثانیه **بسامد** موج نامیده می‌شود که برابر با بسامد جبههٔ موج نیز هست. بنابراین $f = \frac{1}{T}$.
تندی انتشار موج (v): اگر جبههٔ موج در مدت Δt مسافت Δx را طی کند، تندی انتشار موج از رابطهٔ $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ به دست می‌آید. از آنجا که طول موج λ در دورهٔ T طی می‌شود، داریم:

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

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

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 (۱۹۳۴-۱۸۴۹م.) ریاضی‌دان و فیزیک‌دان انگلیسی در سال ۱۸۹۵ میلادی، در کتاب **هیدرودینامیک**^۲ خود رابطه‌ای کلی برای تندی این امواج در شرایط آرمانی به دست آورد که این رابطه برای عمق‌های زیاد (بزرگ‌تر از نصف طول موج) به صورت

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

فیورث ۳۱

مثال ۳-۳

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب نسبت موج شکل ۳-۱۶ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی محرک با دورهٔ تناوب $s = 1/10$ در تشبیه به عمق $cm = 2/5$ نوسان کند، فاصلهٔ بین دو برآمدگی مجاور $cm = 5$ و اگر در تشبیه به عمق $cm = 3/5$ نوسان کند، این فاصله $cm = 6$ می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تشبیه در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ: فاصلهٔ دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دورهٔ تناوب موج برابر با دورهٔ تناوب نوسان‌های جبههٔ موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطهٔ $v = \lambda f$ به دست می‌آوریم.

با قرار دادن $\lambda = 5\text{ cm}$ و $T = 1/10\text{ s}$ در رابطهٔ $v = \lambda f$ خواهیم داشت:

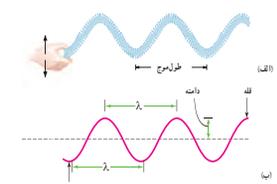
$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T_1} = \frac{5 \times 10^{-2}}{1/10} = 0.50\text{ m/s}$$

و با قرار دادن $\lambda = 6\text{ cm}$ و $T = 1/10\text{ s}$ در رابطهٔ $v = \lambda f$ خواهیم داشت:

$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T_2} = \frac{6 \times 10^{-2}}{1/10} = 0.60\text{ m/s}$$

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 تقریبی از موج عرضی است. اگر یک سر فن بلند کشیده‌شده‌ای را با حرکت هله‌هنگ‌ساده، یایی به بالا و پایین حرکت دهید موج عرضی پیوسته‌ای در طول فن منتشر می‌شود (شکل ۳-۱۸). امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فن، در هر لحظه از زمان انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۳-۱۸ ب نمایش داد. در این شکل طول موج و دامنهٔ این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸: یک موج عرضی در فن کشیده شده در یک مدل سینوسی برای این موج

۱- Sir Horace Lamb
 ۲- Hydrodynamics, Horace Lamb, 6th Edition, Dover 1945.

و برای عمق های کم (کوچک تر از 0.5λ طول موج) به صورت زیر می شود

$$v \approx \sqrt{gd} \quad , \quad d < \lambda/20$$

که در آنها g شتاب گرانشی است. به عبارت دیگر درمی یابیم تندی انتشار امواج سطحی برای عمق های کم با افزایش عمق زیاد می شود، در حالی که برای عمق های زیاد، این تندی نه به عمق آب، بلکه به طول موج بستگی دارد، به طوری که با افزایش طول موج، تندی افزایش می یابد. در حالت کلی این تندی از رابطه زیر به دست می آید :

$$v \approx \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)}$$

در این مبحث خواندن مقاله زیر نیز خالی از لطف نیست

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

فیزیک ۳

مثال ۳-۳

امواج دایره ای تشکیل شده بر سطح آب تخت موج شکل ۳-۳ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دوره تناوب $1/10$ s در تنگی به عمق 2.5 cm نوسان کند، فاصله بین دو برآمدگی مجاور 5.0 cm و اگر در تنگی به عمق 37.5 cm نوسان کند، این فاصله 6 cm می شود. تندی انتشار موج سطحی در این تنگ در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه ای می گیرید؟

پاسخ: فاصله دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان طور که پیش تر گفتیم دوره تناوب موج برابر با دوره تناوب نوسان های جسمه موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطه $v = \lambda/T$ بدست می آوریم.

با قرار دادن $\lambda = 5.0$ m و $T = 1/10$ s در رابطه $v = \lambda/T$ خواهیم داشت:

$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{5.0}{1/10} = 50 \text{ m/s}$$

و با قرار دادن $\lambda = 6$ m و $T = 1/10$ s در رابطه $v = \lambda/T$ خواهیم داشت:

$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{6}{1/10} = 60 \text{ m/s}$$

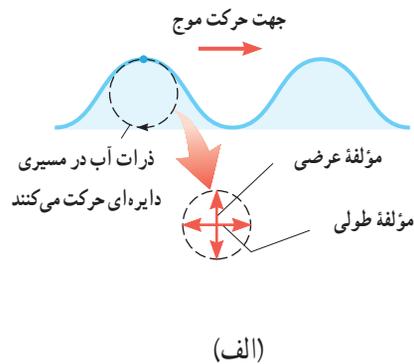
از اینجا درمی یابیم که تندی انتشار موج سطحی روی آب های کم عمق، به عمق آب که یکی از ویژگی های محیط انتشار موج است بستگی دارد.

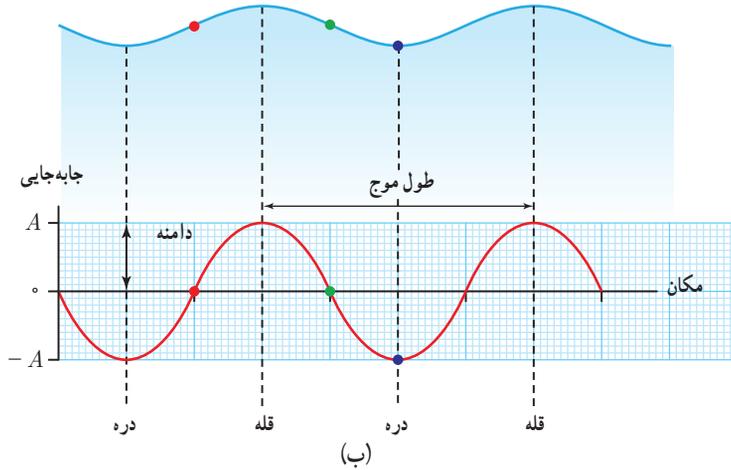
موج عرضی و منبسطه های آن: موج روی سطح آب، که در بالا بررسی کردیم، نمونه ای تقریبی از موج عرضی است. اگر یک سرفه زن بلند کشیده شده ای را با حرکت هماهنگ ساده، بیانی به بالا و پایین حرکت دهید موج عرضی پیوسته ای در طول فنر منتشر می شود (شکل ۱۸-۳ الف). امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فنر، در هر لحظه از زمان انتشار موج را می توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۱۸-۳ ب مدل سازی کرد. در این شکل طول موج و دامنه این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.

شکل ۱۸-۳ الف یک موج عرضی در فنر کشیده شده و بیا مدل سینوسی برای این موج

۴۲

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 دایره ای حرکت می کنند (شکل الف). با این حال، نیم رخ (profile) موج در وضعیتی آرمانی مثل شکل ب، عرضی جلوه می کند.

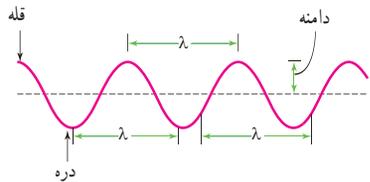




در این فیلم حرکت دایره‌ای ذرات آب روی سطح آن را می‌بینید.



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.



مثال ۵-۳

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 $\frac{1}{5}$ s در نشتی به عمق ۲/۵ cm نوسان کند، فاصله بین دو برآمدگی مجاور ۵ cm و اگر در نشتی به عمق ۳/۵ cm نوسان کند، این فاصله ۶ cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این نشت 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 چشمه موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطه ۹-۳ به دست می‌آوریم.

با قرار دادن $v = 50 \text{ m/s}$ و $\lambda = 5 \text{ m}$ در رابطه ۹-۳ خواهیم داشت:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{50 \text{ m}}{T} = 50 \text{ m/s}$$

و با قرار دادن $v = 60 \text{ m/s}$ و $\lambda = 6 \text{ m}$ در رابطه ۹-۳ خواهیم داشت:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{60 \text{ m}}{T} = 60 \text{ m/s}$$

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 تقریبی از موج عرضی است. اگر یک سرفه بلند کشیده‌شده‌ای را با حرکت هماهنگ ساده، یایی به بالا و پایین حرکت دهید موج عرضی بیوسه‌ای 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 ب با مدل سینوسی برای این موج

پرسش ۳-۴

شکل رویه موجی عرضی را نشان می‌دهد. دامنه و طول موج هر کدام از شکل موج‌های الف، ب، و پ را با دامنه و طول موج این شکل مقایسه کنید.

شکل ۱۹-۳ بخش یک 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 ۹-۳ به دست 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 کشنده به تندی کشش (F) و چگالی خطی جرم (μ = m/L) بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (۱۰-۳)$$

(تندی انتشار موج عرضی در تار یا فنر)

مثال ۳-۴

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

پاسخ : الف) با استفاده از رابطه ۱۰-۳ تندی انتشار موج را به دست می‌آوریم. در اینجا $F = ۱/۲$ است و چگالی خطی جرم برابر است با:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{۰/۶۰ \text{ kg}}{۲/۰ \text{ m}} = ۰/۱۵ \text{ kg/m}$$

بنابراین تندی انتشار v چنین می‌شود:

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

ب) با استفاده از رابطه ۹-۳ بسامد f را به دست می‌آوریم:

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

پاسخ پرسش ۳-۴

از مقیاس بندی 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 اینجا درس به موج‌های طولی پرداخته نشده است، از آنها به عنوان موج عرضی یاد کردیم.)

اثبات رابطه ۱۰-۳ به سادگی 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 ۳-۱۰ استفاده می‌کنیم که در آن $m/L = \mu$ است. بنابراین به ترتیب برای بالاترین و پایین‌ترین بسامد داریم:

$$v_H = \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{226N}{(0.0208 \times 10^{-3} \text{ kg}) / (0.628m)}} =$$

$$= 826 / 0.628 \text{ m/s} \approx 1315 \text{ m/s}$$

$$v_L = \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{226N}{(3/32 \times 10^{-3} \text{ kg}) / (0.628m)}} =$$

$$= 206 / 0.628 \text{ m/s} \approx 328 \text{ m/s}$$

تمرین ۳-۴

در سازه‌های زهی همانند تار، گیتار و کیباز با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت ۰.۶۲۸m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار ۰.۰۲۰۸g و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار ۰.۰۰۳۲۲g است. تارها تحت کشش و بار ۲۲۶N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر است؟

انتقال انرژی در موج عرضی: هر موجی حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان 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 تعیین می‌کند که سر ریسمان با فتر را دائماً به نوسان درمی‌آورد. ثابت می‌شود مقدار متوسط انرژی 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 می‌ماند. امواج الکترومغناطیسی از رابطه متقابل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌وجود می‌آیند. یعنی هر 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 افق‌های الکترومغناطیسی است که در سال ۱۸۶۱ میلادی توسط مایکل فاراد به‌طور تجربی کشف شد و در کتاب فیزیک ۲ آن آشنا شدید. پیدا کردن امواج الکترومغناطیسی، به جلیب بسامد و طول موج امواج الکترومغناطیسی بر اثر تغییر میدان الکتریکی بعداً توسط جیمز کلارک ماکسول، فیزیکدان انگلیسی، در سال ۱۸۶۵ میلادی پیش‌بینی شد. ماکسول از این دو پدیده نتیجه گرفت که امواج الکترومغناطیسی باید لزوماً ناشی از تغییرات هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشند. شکل ۳-۴، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از جبهه تولید موج نشان می‌دهد.

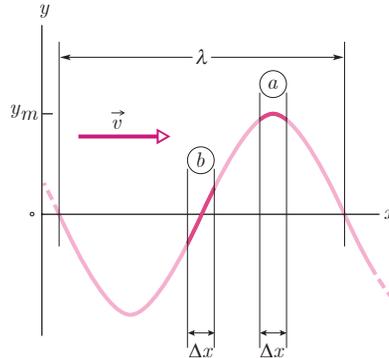
شکل ۳-۴ یک تصویر لحظه‌ای از موجی الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد قائم (A) و میدان مغناطیسی در امتداد افقی (B) و انتشار موج در جهت است.

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، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند که همان‌طور که بعداً دانش‌آموزان خواهند دید در بسامد صوت ایجاد شده از ساز زهی تأثیر مهمی دارد و اصطلاحاً به این کار، کوک کردن ساز گفته می‌شود.

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 بیشینه 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 بیشینه جابه‌جایی، جزء a طول عادی خود را دارد، در حالی که در مکان تعادل، جزء b بیشترین کشیدگی را داراست.

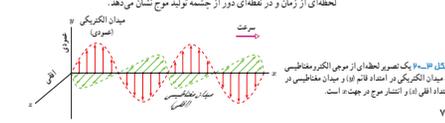
خوب است بدانید رابطه دقیق متوسط انتقال انرژی در ریسمان به صورت $\bar{P} = 2\pi\mu v f^2 A$ است، که در آن μ جرم واحد طول ریسمان، v تندی انتشار موج عرضی، f بسامد موج، و A دامنه موج است.



در سازه‌های زهی همانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت 0.628m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار 0.028g و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار 2.32g است. تارها تحت کشش برابر 222N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر است؟

انتقال انرژی در موج عرضی: هر موج حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان یا فنر کشیده موجی عرضی را ایجاد می‌کنیم، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده‌ایم. با انتشار موج، این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می‌یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت و کشیدگی هر جزء ریسمان با فضا متناسب است. می‌تواند که سر ریسمان یا فنر را دائماً به سمت راست و چپ حرکت می‌دهد. ثابت می‌شود مقدار متوسط 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.

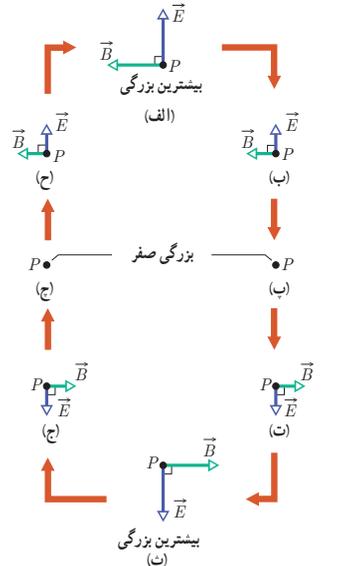
امواج الکترومغناطیسی: در کتاب فیزیک ۲ آموختیم که بار الکتریکی، میدان الکتریکی ایجاد می‌کند و جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اگر بارهای الکتریکی ساکن باشند، میدان الکتریکی حاصل از آنها با زمان تغییر نمی‌کند. به همین ترتیب اگر جریان الکتریکی ثابت باشند، میدان مغناطیسی حاصل از آن ثابت و بدون تغییر می‌شود. امواج الکترومغناطیسی از رابطه متقابل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌وجود می‌آیند. چنانچه 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 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 فاراده به‌طور تجربی کشف شد و در کتاب فیزیک ۲ با آن آشنا شدید. پدیده معکوس این اثر، چنانچه 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 جسته تولید موج نشان می‌دهد.



جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱-۱۸۷۹): جیمز کلارک ماکسول، فیزیک‌دان اسکاتلندی، در مورد امواج الکترومغناطیسی کشف کرد. او به ساختن اسپکتروم رنگی و به ساختن اسپکتروم ستاره‌ها نیز مشغول بود. او همچنین به بررسی ماهواره‌ها و به این کار توفیق می‌گردد. وی در دانشگاههای آکسفورد، کالج کمبریج، و دانشگاه آکسفورد تدریس کرد. او در سال ۱۸۶۵ کتاب «تئوری موج‌های الکترومغناطیسی» را منتشر کرد. او همچنین در مورد امواج الکترومغناطیسی و در مورد امواج الکترومغناطیسی کار می‌کرد.

شکل ۳-۲: یک تصویر لحظه‌ای از موج الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد عمود بر صفحه کاغذ و میدان مغناطیسی در امتداد افقی (از انتشار موج در جهت z) است.

خوب است در اینجا تغییر میدان الکتریکی \vec{E} و میدان مغناطیسی \vec{B} یک موج الکترومغناطیسی سینوسی در نقطه ای دور، ولی در یک دوره تناوب را نیز به دانش آموزان نشان دهیم (در چنین نقطه دوری موج را صوح تخت می خوانند و بحث درباره موج به مراتب ساده تر از نقاط نزدیک چشمه است.)



تغییرات میدان الکتریکی \vec{E} و میدان مغناطیسی \vec{B} در نقطه ای دور از یک چشمه موج الکترومغناطیسی، در یک دوره تناوب، توجه کنید که موج رو به خارج، عمود بر صفحه شکل در حرکت است.

تورین ۳-۲

در سازه های زهی همانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می کند. در یک کمان طول هر تار بین دو انتهای ثابت ۶۱۸cm است. برای توازن بالاترین سیم، جرم تار ۰.۰۰۸g و برای توازن پایین ترین سیم، جرم تار ۰.۰۲۲g است. تارها تحت کششی برابر ۲۲۶N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو سیمده چقدر است؟

پاسخ: انتقال انرژی در موج عرضی: هر موجی حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان یا فنر کشیده موجی عرضی را ایجاد می کنید، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده ایم. با انتشار موج، این انرژی به صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت و کشیدگی هر جزء ریسمان با فنر را مشخصه ثابت می کند که سر ریسمان یا فنر دائماً به نوسان درمی آید. ثابت می شود 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 می کند و جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می کند. اگر بارهای الکتریکی ساکن باشند، میدان الکتریکی حاصل از آنها با زمان تغییر نمی کند. به همین ترتیب اگر جریان الکتریکی ثابت باشد، میدان مغناطیسی حاصل از آن ثابت و بدون تغییر می شود. امواج الکترومغناطیسی از رابطه متقابل میدان های الکتریکی و مغناطیسی بوجود می آید. یعنی هر تغییری در میدان الکتریکی در هر نقطه از فضا، میدان مغناطیسی متغیری ایجاد می کند و این میدان مغناطیسی متغیر، خود میدان الکتریکی متغیری بوجود می آورد. این رابطه متقابل میدان ها سبب انتقال نوسان های میدان های الکتریکی و مغناطیسی از یک نقطه فضا به نقاط دیگر و با همان انتشار موج الکترومغناطیسی می شود. ایجاد میدان الکتریکی به علت تغییر میدان مغناطیسی همان القای الکترومغناطیسی است که در سال ۱۸۳۱ میلادی توسط مایکل فاراد به طور تجربی کشف شد و در کتاب فیزیک ۲ با آن آشنا شدید. پدیده معکوس این اثر، یعنی تولد میدان مغناطیسی بر اثر تغییر میدان الکتریکی بعدها توسط جیمز کلارک ماکسول، فیزیکدان انگلیسی، در سال ۱۸۶۵ میلادی پیش بینی شد. ماکسول از این دو پدیده نتیجه گرفت که امواج الکترومغناطیسی باید لزوماً ناشی از تغییرات همزمان میدان های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشند. شکل ۳-۲، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه ای از زمان و در نقطه ای دور از چشمه تولید موج نشان می دهد.

شکل ۳-۲: یک تصویر لحظه ای از موج الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد محور افقی و میدان مغناطیسی در امتداد محور عمودی در جهت رو به چپ است.

در این فیلم ها چگونگی تغییر میدان های الکتریکی و مغناطیسی را در حین انتشار یک موج الکترومغناطیسی می بینید.

پاسخ پرسش ۳-۵

از قاعده دست راست درمی یابیم که جهت انتشار موج الکترومغناطیسی در جهت $-x$ است.

پوشش ۳-۵

در یک لحظه خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه ای از فضا در جهت +y و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت +z است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت های +x، +y، +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 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ به دست می آید، که در آن ϵ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برای $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ و $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ مقدار c با استفاده از این رابطه $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ می شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش تر توسط فیزیکدان فرانسوی آرنست فیزو (۱۸۴۶-۱۸۹۴) به روش تجربی به دست آمده بود. این نتیجه ای بسیار مهم بود، زیرا نشان می داد نور، یک موج الکترومغناطیسی است.

نظریه ماکسول نیاز به تأیید تجربی داشت. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی ایجاد نوسان های الکتریکی ژرف سادی، آزمایش های مشهوری در تأیید نظریه ماکسول انجام داد. هرتز نشان داد که امواج رادیویی نیز با همان تندی نور می توانند منتشر شوند و در آزمایشگاه حرکت می کنند و این حاکی از سرشت یکسان امواج رادیویی و نور می بود.

مثال ۳-۲

گستره بسامد نور مرئی از $4.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ تا $7.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (نور قرمز) تا $7.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (نور بنفش) است. گستره طول موج های مربوط به نور مرئی در خلأ را بر حسب نانومتر تعیین کنید.

پاسخ: نور یک موج است و برای آن می توان از رابطه $\lambda = c/f$ استفاده کرد. اما برای امواج مرئی، برای آن تندی نور $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ است. بنابراین برای هر دو حد پایین و بالای طول موج طیف نور مرئی به ترتیب داریم:

$\lambda_{\text{بنفش}} = \frac{c}{f_{\text{بنفش}}} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{7.0 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4.3 \times 10^{-7} \text{ m} = 430 \text{ nm}$

$\lambda_{\text{قرمز}} = \frac{c}{f_{\text{قرمز}}} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{4.0 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 7.5 \times 10^{-7} \text{ m} = 750 \text{ nm}$

فیلم

طیف مرئی

فصل ۳۳ (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 ۳۳-۲ از فاصله دست راست تعیین کرد.

توضیح ۳۳-۳

در یک لحظه خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت $+\hat{z}$ و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت $+\hat{y}$ است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های $+\hat{x}$ ، $+\hat{y}$ و $+\hat{z}$ را مانند شکل ۳۳-۲ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ به دست می‌آید، که در آن ϵ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و μ_0 $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ است. مقدار c با استفاده از این ضرب کرده‌های الکتریکی خلأ و برابر $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ است. مقدار c با استفاده از این رابطه $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ می‌شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش‌تر توسط فیزیکدان فرانسوی آرمند لوئیس فیرو (۱۸۹۶-۱۸۵۹ 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 بزرگ‌ساز، آزمایش‌های مشهوری در تأیید نظریه ماکسول انجام داد. هرتز نشان داد که امواج رادیویی نیز با همان تندی نور مری در آزمایشگاه حرکت می‌کنند و این جایی از سرست یکسان امواج رادیویی و نور مری بود.

مثال ۳۳-۳

گشتره بسامد نور مری 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. گشتره طول موج‌های مربوط به نور مری 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 c برابر با تندی نور ($3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$) است. بنابراین برای دو حد پایین و بالای طول موج طیف نور مری به ترتیب داریم:

$$\lambda_{\text{بلند}} = \frac{c}{f_{\text{کوتاه}}} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{4.0 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 7.5 \times 10^{-7} \text{ m} = 750 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{کوتاه}} = \frac{c}{f_{\text{بلند}}} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{7.9 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 3.8 \times 10^{-7} \text{ m} = 380 \text{ nm}$$

طیف نور مری

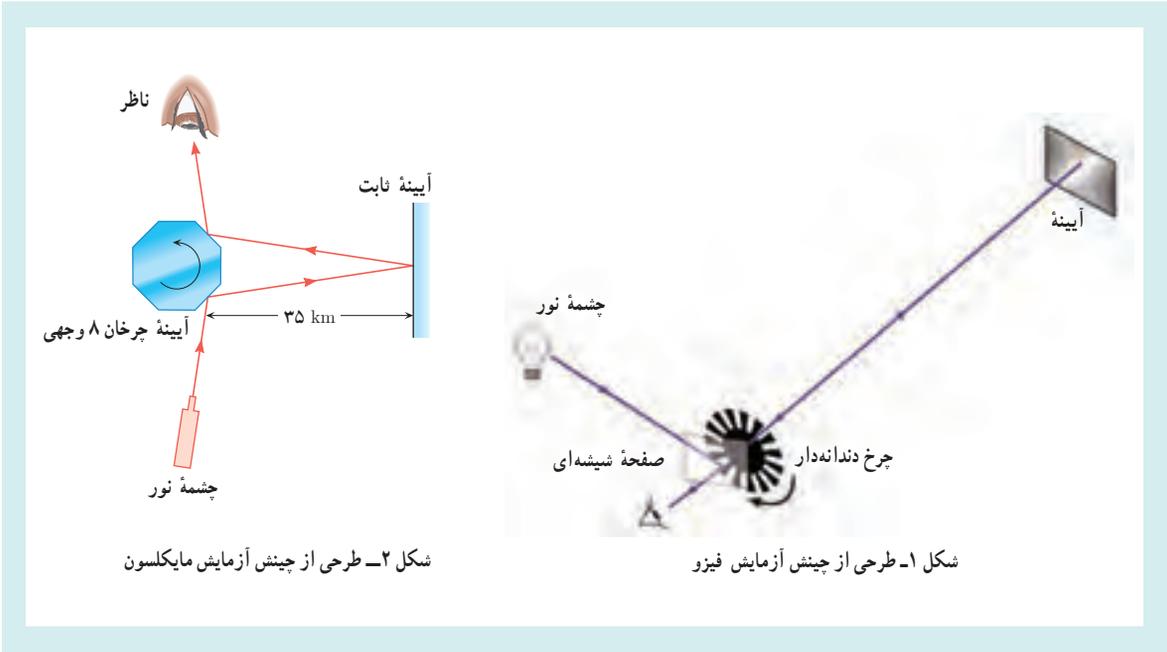
در اینجا خوب است دانستی مربوط به اندازه‌گیری تندی نور توسط فیرو و سپس مایکلسون را مطرح کنید.

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. آرماند لوئیس فیرو (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 به سوی 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 چپش آزمایشگاهی‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده است، باریکه نوری 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 $c = (2.997924 \pm 0.00004) \times 10^8 \text{ m/s}$ به دست آورد.



شکل ۲- طرحی از چینی آزمایش مایکلسون

شکل ۱- طرحی از چینی 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 داشت:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4L} = \frac{3/0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4(8/5 \times 10^{-2} \text{ m})} = 882 \text{ MHz} \approx 8/8 \times 10^8 \text{ Hz}$$

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

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



فیروزه ۳۳

تورین ۳-۵

طول آنتن یک گوشی تلفن همراه معمولاً $\frac{1}{4}$ طول موج درافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر ۸۵cm باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می‌کند تعیین کنید.

تعیین ۳-۲

مطابق شکل روی هر یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظه نخله هوای نشینده‌ای آویزان کنید. با برقراری تماس با گوشی، صدای آن را خواهید شنید. ولی با به کار افتادن پد نخله 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 به صورت انرژی جنبشی و انرژی تابش در آن محیط، بلکه به صورت انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منتقل 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 ۱۰۰ 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، فرسوخ، طیف نور مرئی، فرابنفش، پرتوهای X و پرتوهای گاما است، که از کمترین بسامد تا بیشترین بسامد گسترده شده‌اند (شکل ۳-۲۳). تمام این امواج به‌رغم تفاوت فرکانس 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 ۳-۲۳ طیف امواج الکترومغناطیسی

پاسخ فعالیت ۳-۴

این آزمایشی مشهور برای تمیز امواج صوتی (نمونه‌ای از امواج مکانیکی) از امواج الکترومغناطیسی است. در حالی که امواج 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 ۳

تعمیر ۳-۲



طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{1}{4}$ طول موج دربرافتی است. اگر طول جین آنتنی تقریباً برابر $\lambda/4$ باشد سامدی را که این گوشی با آن کار می‌کند تعیین کنید.

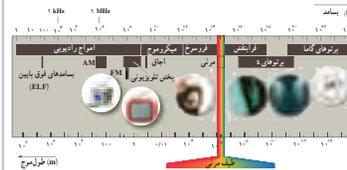
فعالیت ۳-۲



مطابق شکل روبروی یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظه تخلیه هوای نشیندای آویزان کنید. با برقراری تماس با گوشی، صدای آن را خواهید شنید. ولی با پاک افتادن سبب 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 150 میلیون کیلومتری از زمین قرار دارد، توان امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از خورشید که به سطح زمین می‌رسد، تقریباً 1000 میلیون کیلووات است. جالب است که بااین مرتبه بزرگی توان تولیدی یک نیروگاه هسته‌ای، 1 گیگاوات است.

طیف امواج الکترومغناطیسی: امروزه طیف وسیعی از امواج الکترومغناطیسی را می‌شناسیم. این طیف شامل امواج رادیویی، میکروموج، فرورسرخ، طیف نور مرئی، فرابنفش، پرتوهای α و پرتوهای گاما است. که از کمترین بسامد تا بیشترین بسامد گسترده شده‌اند (شکل ۳-۲). تمام این امواج پررغم 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 ۳-۲ 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.

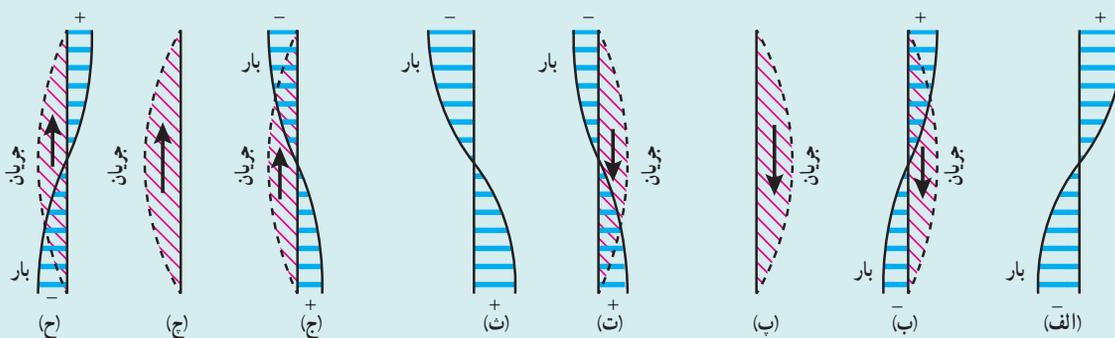


در این فیلم طرحی از انتشار موج الکترومغناطیسی را می‌بینید.



آنتن‌ها

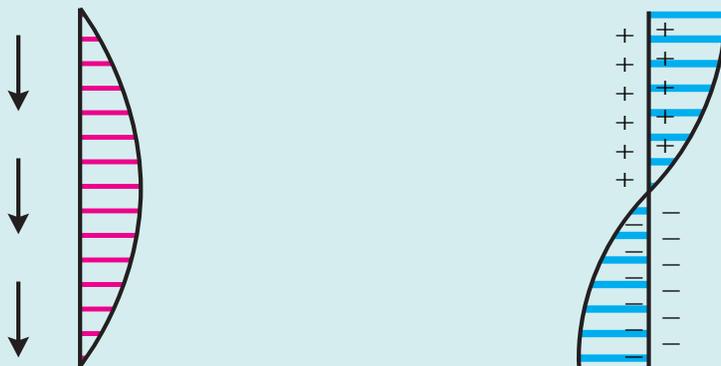
عامل اصل ایجاد موج‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار شتابدارند. در آنتن از یک منبع ولتاژ متناوب برای ایجاد نوسان بارالکتریکی استفاده می‌شود. از آنتن‌ها به‌عنوان چشمه موج‌های الکترومغناطیسی در ایستگاه‌های رادیویی، مخابراتی و ... استفاده می‌شود. شکل ۱ چگونگی تولید یک موج الکترومغناطیسی را در یک آنتن نشان 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 مُد 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 ساده‌زیر را برای بسامد طبیعی نوسانگر به دست می‌آوریم:

$$f = c/2l$$

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

پاسخ فعالیت ۳-۵

نواحی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، به ترتیب از امواج کم بسامد تا امواج پُر بسامد 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.

فعالیت ۳-۵

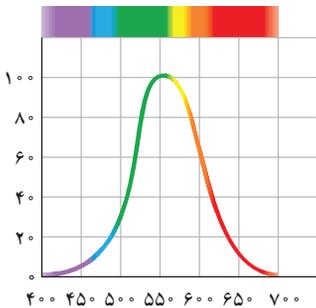
در مورد نواحی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، چگونگی تولید و کاربردهای آنها تحقیق کنید.

موج طولی و مشخصه‌های آن: در انتشار موج طولی در یک فنر پلنگ کشیده شده داریم که با انتشار موج ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شوند. برای اینکه این موج را مدلسازی کنیم لازم است ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان‌هایی که بیشترین جمع‌شدگی یا بیشترین بازشدگی حلقه‌ها رخ می‌دهد، جاه‌هایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل برآور صفر است. در وسط فاصله بین یک جمع‌شدگی بیشینه و یک بازشدگی بیشینه مجاور هم، اندازه جاه‌هایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل بیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای فنر شکل ۳۳-۳ الف، نمودار جاه‌هایی - مکان شکل ۳۳-۳ 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 فنر، جمع‌شدگی) یا دو انبساط (رای فنر، بازشدگی) متوالی است. همچنین دامنه موج طولی برابر با بیشینه جاه‌هایی از مکان تعادل است.

در اینجا نیز همانند موج عرضی، هر جزء فنر در مدت یک دوره (T) یک نوسان کامل انجام می‌دهد و در این مدت موج به 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=λ/T). البته این به این معنا نیست که در یک جسم تندی انتشار هر دو نوع برابر است. برای امواج مکانیکی، تندی انتشار امواج طولی در یک محیط جامد بیشتر از تندی انتشار امواج عرضی در همان محیط است.

شکل ۳۳-۳ الف) تصویر لحظه‌ای از ایجاد نواحی جمع‌شدگی و بازشدگی در طول یک فنر پلنگ کشیده. ب) نمودار انتشار موج طولی سینوسی بر فنر. در این نمودار جاه‌هایی - مکان برابر با موج ایجاد شده در فنر

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.

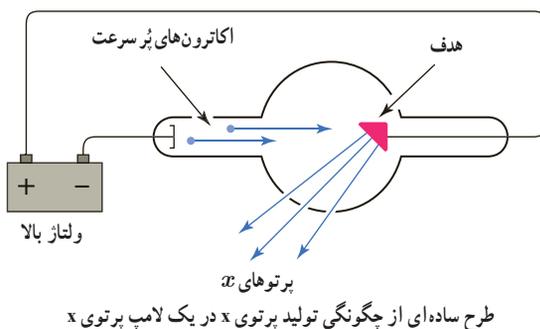


حساسیت یک جسم سالم به طول موج‌های مختلف طیف نور مرئی

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 لایه پوش سپهر (استراتوسفر) جو که در فاصله 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 لایه پوش سپهر، اوزون (O_3) است که از برهم‌کنش اکسیژن (O_2) با تابش فرابنفش حاصل می‌شود. این اوزون حاصل، مانع از رسیدن تابش فرابنفش مرگبار به سطح زمین می‌گردد. برخی مواد تحت تابش فرابنفش، نور مرئی گسیل می‌کنند که به این، خاصیت فلورسانسی 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، اخترش‌ها (کوازارها)، سیاه‌چاله‌ها، ابرنواخترها (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: پراثرترین 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.



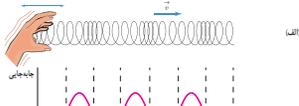
تصویری از دستگاه جراحی مغز با پرتوی گاما

فعالیت ۵-۳

در مورد توافقی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، جگرتگی تولید و کاربردهای آنها تحقیق کنید.

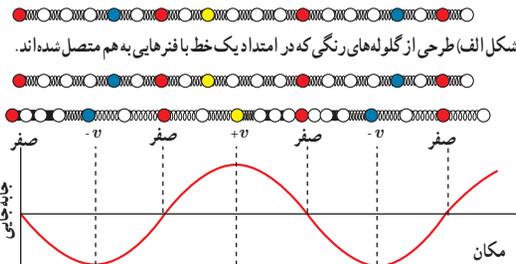
موج طولی و مشخصه‌های آن: در انتشار موج طولی در یک فتر بلبل کشیده شده دیده می‌شود که با انتشار موج، تابه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فتر ظاهر می‌شوند. برای اینکه این موج را مدل‌سازی کنیم لازم است تابه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان‌هایی که بیشترین جمع‌شدگی یا بیشترین بازشدگی حلقه‌ها رخ می‌دهد، جابه‌جایی هر جزء فتر از وضعیت تعادل برابر صفر است. در وسط فاصله بین یک جمع‌شدگی بیشینه و یک بازشدگی بیشینه متناوب همواره، اندازه جابه‌جایی هر جزء فتر از وضعیت تعادل، بیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای 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 فله یا دو دره متوالی است، در مورد امواج طولی، طول موج برابر با فاصله بین دو تراکم فتر، جمع‌شدگی یا دو انبساط (ارای فتر، بازشدگی) 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=λ/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.



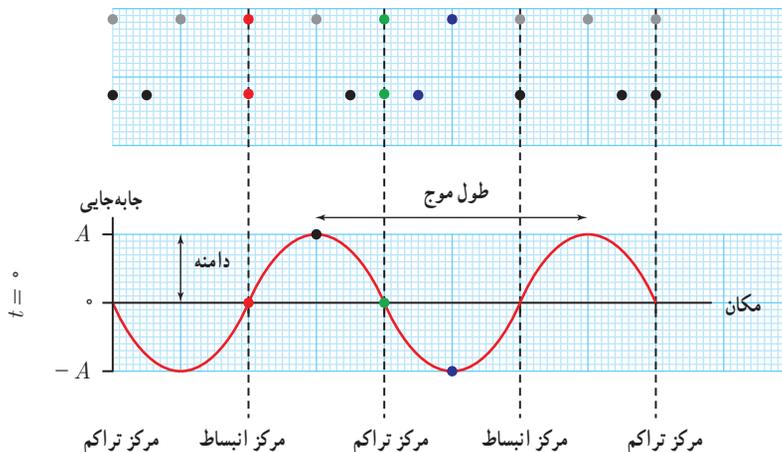
شکل ۲۳-۳ الف: تصویری لحظه‌ای از ایجاد نوسان جمع‌شدگی و بازشدگی در طول یک فتر کشیده شده. ب: نمودار موج طولی سینوسی در فتر با نمودار جابه‌جایی - مکان برای موج ایجاد شده در فتر

خوب است در اینجا دوباره با اسباب فعالیت پیشنهادی بخش ۵-۳ به تفهیم این مطالب بپردازیم. طرحی از گلوله و فتر این اسباب در شکل الف با رنگ‌آمیزی 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 در می‌آید، موجی طولی در راستای فترها 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 فترها و بازشدگی برخی فترها 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 ب: عکس لحظه‌ای از شکل الف، وقتی موجی طولی در راستای فترها ایجاد شود.

پایین: منحنی جابه‌جایی - مکان برای همه نقاط موج



شکل ب: منحنی جابه‌جایی - مکان برای همه نقاط

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

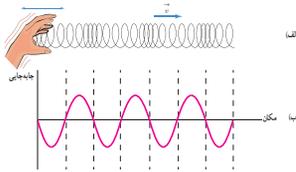
توجه کنید برای هر دو موج طولی و عرضی رابطه $v = \lambda / f$ برقرار است و بنابراین طول موج طولی از طول موج عرضی در یک محیط بیشتر است. همان طور که در متن درس اشاره شده است منظور از یک محیط، محیط جامد است، زیرا موج عرضی صرفاً در جامدات می تواند منتشر شود و بنابراین این مقایسه فقط در جامدها می تواند صورت 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.

فصلت 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 دیدیم 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 پیشینه و یک بازندگی پیشینه مجاور هم، اندازه جابه جایی هر جزء فتر از وضعیت تعادل، پیشینه است. به این ترتیب می توان برای فتر شکل ۳۳-۳ الف، نمودار جابه جایی - مکان شکل ۳۳-۳ 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 پیشینه 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 ۳۳-۳ الف: تصویر لحظه ای از ایجاد نواحی جمع بندی و بازندگی در طول یک فتر بلند کشیده. ب: شکل انتشار موج فتری سینوسی بر فتر بدون دراز جابه جایی - مکان برای موج ایجاد شده در فتر

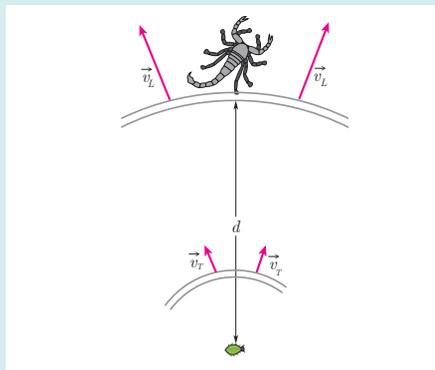
در این فیلم طرحی از انتشار موج طولی را می بینید.



فیلم



(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 ۰/۰۰۴ 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 ۳-۲

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 P، امواجی طولی و امواج S، امواجی عرضی هستند. معمولاً سرعت موج‌های P در حدود ۸/۰ km/s و سرعت موج‌های S در حدود ۴/۵ km/s است. یک دستگاه لرزه‌نگار موج‌های P و S حاصل از یک زمین‌لرزه را ثبت می‌کند. فرض کنید نخستین امواج P، ۳۰ 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 $\Delta t = v_P - v_S$ که در فصل ۱ آموختیم، زمان رسیدن هر یک از دو موج را می‌یابیم. اگر سرعت موج S را با v_S و سرعت موج P را با v_P نشان دهیم، اختلاف زمان رسیدن این دو موج چنین می‌شود:

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

و از آنجا Δt را به دست می‌آوریم

$$\Delta x = \frac{v_S v_P}{v_P - v_S} \Delta t = \frac{(4.5 \text{ km/s})(8.0 \text{ km/s})}{(8.0 \text{ km/s}) - (4.5 \text{ km/s})} (30 \times 60 \text{ s}) = 1.9 \times 10^3 \text{ km}$$

موج صوتی: صوت یک موج طولی است که توسط جسمی مرتض از قیل سیم گیتار، تارهای صوتی حنجره انسان، دیافراگم، و با پوسته‌های مرتضی مانند صفحه مرتض (دیافراگم) یک بلندگو، تولید می‌شود، که اصطلاحاً به آنها جنبه صوت گفته می‌شود. وقتی یک جنبه صوت مرتض 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 ایجادشده در یک فنر کشنده، در مقایسه با پهنای آنها 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 آنچه جمع‌شدگی در یک فنر کشنده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳-۳). پس از تولید یک ناحیه متراکم، دیافراگم حرکتش

شکل ۳-۳ 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 نوبت به جمع‌شدگی و پهنای در یک فنر بلند است.

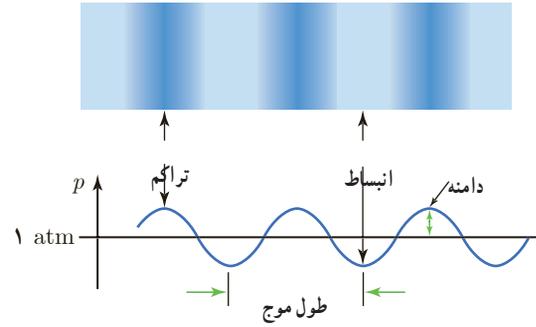
Primary Waves
Secondary Waves
Seismograph

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.

فیلم

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



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



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

شکل ۳۳: نوسان و موج



شکل ۳۴: در حالی که موج از بلندگو به سمت توده حرکت می‌کند، مولکول‌های هوا در جایی خود نوسان می‌کنند.

جدول ۳۱: تندی صوت در محیط‌های مختلف

محیط	تندی (m/s)
کوارتز	۳۴۶۰
هوا (۰°C)	۳۳۱
هوا (۲۰°C)	۳۴۳
خاک (۰°C)	۱۹۵۰
هیدروژن (۰°C)	۱۲۸۲
مایع‌ها	
متان الکل (۲۵°C)	۱۱۲۳
آب (۰°C)	۱۴۰۲
آب (۲۰°C)	۱۴۸۲
آب دریا (۲۰°C)	۱۵۲۲
شوری (۲۰°C)	۱۵۲۲
جامدها	
فلزات	۵۲۴۱
کوارتز	۶۰۰۰
آلومینیم	۶۲۲۰

* نشان دهنده گازها است.

را برعکس می‌کند و به سمت داخل می‌رود. حرکت رو به داخل دیاپازون، هوای جلوی آن را منبسط می‌کند. این انقباض 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 ۳۳-۲۲). توجه کنید، در حالی که موج از بلندگو به‌شونده می‌رسد، هر مولکول هوا، با موج حرکت نمی‌کند، بلکه در مکان ثابتی به جلو و عقب نوسان می‌کند (شکل ۳۳-۲۵).

پرسش ۳-۶
الف) چگونگی ایجاد صوت توسط دیاپازون را توضیح دهید.
ب) به نظر شما چه ساز و کاری موجب صدای رزونانس 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.

اندازگیری‌ها نشان داده است که عموماً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، گرچه استثناهایی نیز وجود دارد. جدول ۳۱- 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 ۳-۲

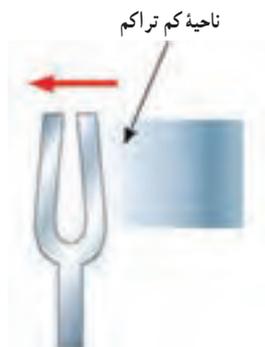
اندازگیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازگیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازگیری کند. وقتی چکش را به صفحه فلزی بکوبید، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست میکروفون نزدیک‌تر و سپس میکروفون دورتر را متأثر می‌سازند. اختلاف فاصله میکروفون‌ها از محل برخورد چکش با صفحه فلزی را انداز می‌گیریم. با استفاده از زمان‌سنج می‌توانیم تأخیر زمانی بین دریافت صوت توسط دو میکروفون را ثبت کنیم. 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.



شکل ۳۵: اندازه‌گیری تندی صوت در هوا

پاسخ پرسش ۳-۶

الف) در دیاپازون، وقتی شاخه‌ها با ضربه‌ای به دیاپازون 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 دیاپازون اندکی زیاد می‌شود، در حالی که در لایه‌های منبسط، چگالی و در نتیجه فشار هوا نسبت به قبل از ارتعاش دیاپازون اندکی کم می‌شود. این تراکم‌ها و انبساط‌ها متناوباً تولید شده و در هوا حرکت می‌کنند و بدین ترتیب مانند آنچه در متن درس آمده است یک موج صوتی راه می‌افتد.



ب) وقتی شاخه‌های دیابازون به هم نزدیک می‌شوند، لایه‌های مجاور شاخه منبسط می‌شود.



الف) وقتی شاخه‌های دیابازون از هم دور می‌شوند، لایه‌های 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.



فیلم

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



فیلم

در اینجا خوب است به دانش پیشین دانش آموزان 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 کلونین است:

$$v = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}}$$

شماره ۳۳: آوسان و موج

ارغشی یک مرکزها

شکل ۳۳-۱: در حالی که موج از بلندگو به سمت بلندگو حرکت می‌کند، مرکزهای هوا در جای خود تکان می‌کند

پوشش ۳-۲

الف) چگونگی ایجاد صوت توسط دیافراگم را توضیح دهید.
ب) به نظر شما چه سازوکاری موجب صدای وزوز 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.

انداذگیری‌ها نشان داده است که عموداً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، هرچه استخوانی نیز وجود دارد. جدول ۳-۲ 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.

فعالیت ۳-۲

انداذگیری تندی صوت: یک روش ساده برای انداذگیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمانسنج حساس متصل کنید. این زمانسنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه انداذگیری کند. وقتی چکش را به صفحه فیزی بکوبید، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست میکروفون نزدیک‌تر و سپس میکروفون دورتر را متأثر می‌سازند. اختلاف فاصله میکروفون‌ها از محل برخورد چکش با صفحه فیزی را انداذ می‌گیریم. با استفاده از زمانسنج می‌توانیم تأخیر زمانی بین دریافت صوت توسط دو میکروفون را ثبت کنیم. اکنون با استفاده از رابطه $v = \Delta x / \Delta t$ 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 انداذ بگیرید.

میکروفون دوم
میکروفون اول
چکش
صفحه

۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷
۳-۲-۵۸
۳-۲-۵۹
۳-۲-۶۰
۳-۲-۶۱
۳-۲-۶۲
۳-۲-۶۳
۳-۲-۶۴
۳-۲-۶۵
۳-۲-۶۶
۳-۲-۶۷
۳-۲-۶۸
۳-۲-۶۹
۳-۲-۷۰
۳-۲-۷۱
۳-۲-۷۲
۳-۲-۷۳
۳-۲-۷۴
۳-۲-۷۵
۳-۲-۷۶
۳-۲-۷۷
۳-۲-۷۸
۳-۲-۷۹
۳-۲-۸۰
۳-۲-۸۱
۳-۲-۸۲
۳-۲-۸۳
۳-۲-۸۴
۳-۲-۸۵
۳-۲-۸۶
۳-۲-۸۷
۳-۲-۸۸
۳-۲-۸۹
۳-۲-۹۰
۳-۲-۹۱
۳-۲-۹۲
۳-۲-۹۳
۳-۲-۹۴
۳-۲-۹۵
۳-۲-۹۶
۳-۲-۹۷
۳-۲-۹۸
۳-۲-۹۹
۳-۲-۱۰۰

۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷
۳-۲-۵۸
۳-۲-۵۹
۳-۲-۶۰
۳-۲-۶۱
۳-۲-۶۲
۳-۲-۶۳
۳-۲-۶۴
۳-۲-۶۵
۳-۲-۶۶
۳-۲-۶۷
۳-۲-۶۸
۳-۲-۶۹
۳-۲-۷۰
۳-۲-۷۱
۳-۲-۷۲
۳-۲-۷۳
۳-۲-۷۴
۳-۲-۷۵
۳-۲-۷۶
۳-۲-۷۷
۳-۲-۷۸
۳-۲-۷۹
۳-۲-۸۰
۳-۲-۸۱
۳-۲-۸۲
۳-۲-۸۳
۳-۲-۸۴
۳-۲-۸۵
۳-۲-۸۶
۳-۲-۸۷
۳-۲-۸۸
۳-۲-۸۹
۳-۲-۹۰
۳-۲-۹۱
۳-۲-۹۲
۳-۲-۹۳
۳-۲-۹۴
۳-۲-۹۵
۳-۲-۹۶
۳-۲-۹۷
۳-۲-۹۸
۳-۲-۹۹
۳-۲-۱۰۰

۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷
۳-۲-۵۸
۳-۲-۵۹
۳-۲-۶۰
۳-۲-۶۱
۳-۲-۶۲
۳-۲-۶۳
۳-۲-۶۴
۳-۲-۶۵
۳-۲-۶۶
۳-۲-۶۷
۳-۲-۶۸
۳-۲-۶۹
۳-۲-۷۰
۳-۲-۷۱
۳-۲-۷۲
۳-۲-۷۳
۳-۲-۷۴
۳-۲-۷۵
۳-۲-۷۶
۳-۲-۷۷
۳-۲-۷۸
۳-۲-۷۹
۳-۲-۸۰
۳-۲-۸۱
۳-۲-۸۲
۳-۲-۸۳
۳-۲-۸۴
۳-۲-۸۵
۳-۲-۸۶
۳-۲-۸۷
۳-۲-۸۸
۳-۲-۸۹
۳-۲-۹۰
۳-۲-۹۱
۳-۲-۹۲
۳-۲-۹۳
۳-۲-۹۴
۳-۲-۹۵
۳-۲-۹۶
۳-۲-۹۷
۳-۲-۹۸
۳-۲-۹۹
۳-۲-۱۰۰

۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷
۳-۲-۵۸
۳-۲-۵۹
۳-۲-۶۰
۳-۲-۶۱
۳-۲-۶۲
۳-۲-۶۳
۳-۲-۶۴
۳-۲-۶۵
۳-۲-۶۶
۳-۲-۶۷
۳-۲-۶۸
۳-۲-۶۹
۳-۲-۷۰
۳-۲-۷۱
۳-۲-۷۲
۳-۲-۷۳
۳-۲-۷۴
۳-۲-۷۵
۳-۲-۷۶
۳-۲-۷۷
۳-۲-۷۸
۳-۲-۷۹
۳-۲-۸۰
۳-۲-۸۱
۳-۲-۸۲
۳-۲-۸۳
۳-۲-۸۴
۳-۲-۸۵
۳-۲-۸۶
۳-۲-۸۷
۳-۲-۸۸
۳-۲-۸۹
۳-۲-۹۰
۳-۲-۹۱
۳-۲-۹۲
۳-۲-۹۳
۳-۲-۹۴
۳-۲-۹۵
۳-۲-۹۶
۳-۲-۹۷
۳-۲-۹۸
۳-۲-۹۹
۳-۲-۱۰۰

۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷
۳-۲-۵۸
۳-۲-۵۹
۳-۲-۶۰
۳-۲-۶۱
۳-۲-۶۲
۳-۲-۶۳
۳-۲-۶۴
۳-۲-۶۵
۳-۲-۶۶
۳-۲-۶۷
۳-۲-۶۸
۳-۲-۶۹
۳-۲-۷۰
۳-۲-۷۱
۳-۲-۷۲
۳-۲-۷۳
۳-۲-۷۴
۳-۲-۷۵
۳-۲-۷۶
۳-۲-۷۷
۳-۲-۷۸
۳-۲-۷۹
۳-۲-۸۰
۳-۲-۸۱
۳-۲-۸۲
۳-۲-۸۳
۳-۲-۸۴
۳-۲-۸۵
۳-۲-۸۶
۳-۲-۸۷
۳-۲-۸۸
۳-۲-۸۹
۳-۲-۹۰
۳-۲-۹۱
۳-۲-۹۲
۳-۲-۹۳
۳-۲-۹۴
۳-۲-۹۵
۳-۲-۹۶
۳-۲-۹۷
۳-۲-۹۸
۳-۲-۹۹
۳-۲-۱۰۰

۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷
۳-۲-۵۸
۳-۲-۵۹
۳-۲-۶۰
۳-۲-۶۱
۳-۲-۶۲
۳-۲-۶۳
۳-۲-۶۴
۳-۲-۶۵
۳-۲-۶۶
۳-۲-۶۷
۳-۲-۶۸
۳-۲-۶۹
۳-۲-۷۰
۳-۲-۷۱
۳-۲-۷۲
۳-۲-۷۳
۳-۲-۷۴
۳-۲-۷۵
۳-۲-۷۶
۳-۲-۷۷
۳-۲-۷۸
۳-۲-۷۹
۳-۲-۸۰
۳-۲-۸۱
۳-۲-۸۲
۳-۲-۸۳
۳-۲-۸۴
۳-۲-۸۵
۳-۲-۸۶
۳-۲-۸۷
۳-۲-۸۸
۳-۲-۸۹
۳-۲-۹۰
۳-۲-۹۱
۳-۲-۹۲
۳-۲-۹۳
۳-۲-۹۴
۳-۲-۹۵
۳-۲-۹۶
۳-۲-۹۷
۳-۲-۹۸
۳-۲-۹۹
۳-۲-۱۰۰

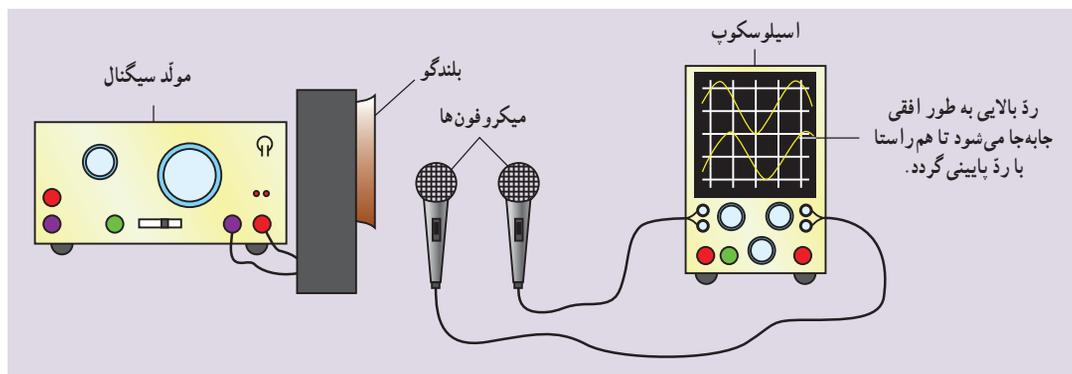
۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷
۳-۲-۵۸
۳-۲-۵۹
۳-۲-۶۰
۳-۲-۶۱
۳-۲-۶۲
۳-۲-۶۳
۳-۲-۶۴
۳-۲-۶۵
۳-۲-۶۶
۳-۲-۶۷
۳-۲-۶۸
۳-۲-۶۹
۳-۲-۷۰
۳-۲-۷۱
۳-۲-۷۲
۳-۲-۷۳
۳-۲-۷۴
۳-۲-۷۵
۳-۲-۷۶
۳-۲-۷۷
۳-۲-۷۸
۳-۲-۷۹
۳-۲-۸۰
۳-۲-۸۱
۳-۲-۸۲
۳-۲-۸۳
۳-۲-۸۴
۳-۲-۸۵
۳-۲-۸۶
۳-۲-۸۷
۳-۲-۸۸
۳-۲-۸۹
۳-۲-۹۰
۳-۲-۹۱
۳-۲-۹۲
۳-۲-۹۳
۳-۲-۹۴
۳-۲-۹۵
۳-۲-۹۶
۳-۲-۹۷
۳-۲-۹۸
۳-۲-۹۹
۳-۲-۱۰۰

۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷
۳-۲-۵۸
۳-۲-۵۹
۳-۲-۶۰
۳-۲-۶۱
۳-۲-۶۲
۳-۲-۶۳
۳-۲-۶۴
۳-۲-۶۵
۳-۲-۶۶
۳-۲-۶۷
۳-۲-۶۸
۳-۲-۶۹
۳-۲-۷۰
۳-۲-۷۱
۳-۲-۷۲
۳-۲-۷۳
۳-۲-۷۴
۳-۲-۷۵
۳-۲-۷۶
۳-۲-۷۷
۳-۲-۷۸
۳-۲-۷۹
۳-۲-۸۰
۳-۲-۸۱
۳-۲-۸۲
۳-۲-۸۳
۳-۲-۸۴
۳-۲-۸۵
۳-۲-۸۶
۳-۲-۸۷
۳-۲-۸۸
۳-۲-۸۹
۳-۲-۹۰
۳-۲-۹۱
۳-۲-۹۲
۳-۲-۹۳
۳-۲-۹۴
۳-۲-۹۵
۳-۲-۹۶
۳-۲-۹۷
۳-۲-۹۸
۳-۲-۹۹
۳-۲-۱۰۰

۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷
۳-۲-۵۸
۳-۲-۵۹
۳-۲-۶۰
۳-۲-۶۱
۳-۲-۶۲
۳-۲-۶۳
۳-۲-۶۴
۳-۲-۶۵
۳-۲-۶۶
۳-۲-۶۷
۳-۲-۶۸
۳-۲-۶۹
۳-۲-۷۰
۳-۲-۷۱
۳-۲-۷۲
۳-۲-۷۳
۳-۲-۷۴
۳-۲-۷۵
۳-۲-۷۶
۳-۲-۷۷
۳-۲-۷۸
۳-۲-۷۹
۳-۲-۸۰
۳-۲-۸۱
۳-۲-۸۲
۳-۲-۸۳
۳-۲-۸۴
۳-۲-۸۵
۳-۲-۸۶
۳-۲-۸۷
۳-۲-۸۸
۳-۲-۸۹
۳-۲-۹۰
۳-۲-۹۱
۳-۲-۹۲
۳-۲-۹۳
۳-۲-۹۴
۳-۲-۹۵
۳-۲-۹۶
۳-۲-۹۷
۳-۲-۹۸
۳-۲-۹۹
۳-۲-۱۰۰

۳-۲-۱
۳-۲-۲
۳-۲-۳
۳-۲-۴
۳-۲-۵
۳-۲-۶
۳-۲-۷
۳-۲-۸
۳-۲-۹
۳-۲-۱۰
۳-۲-۱۱
۳-۲-۱۲
۳-۲-۱۳
۳-۲-۱۴
۳-۲-۱۵
۳-۲-۱۶
۳-۲-۱۷
۳-۲-۱۸
۳-۲-۱۹
۳-۲-۲۰
۳-۲-۲۱
۳-۲-۲۲
۳-۲-۲۳
۳-۲-۲۴
۳-۲-۲۵
۳-۲-۲۶
۳-۲-۲۷
۳-۲-۲۸
۳-۲-۲۹
۳-۲-۳۰
۳-۲-۳۱
۳-۲-۳۲
۳-۲-۳۳
۳-۲-۳۴
۳-۲-۳۵
۳-۲-۳۶
۳-۲-۳۷
۳-۲-۳۸
۳-۲-۳۹
۳-۲-۴۰
۳-۲-۴۱
۳-۲-۴۲
۳-۲-۴۳
۳-۲-۴۴
۳-۲-۴۵
۳-۲-۴۶
۳-۲-۴۷
۳-۲-۴۸
۳-۲-۴۹
۳-۲-۵۰
۳-۲-۵۱
۳-۲-۵۲
۳-۲-۵۳
۳-۲-۵۴
۳-۲-۵۵
۳-۲-۵۶
۳-۲-۵۷

میکروفون دوم را روی خط واصل میکروفون اول و بلندگو آندر 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 ۱۱۳° 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 می‌رسند، ثبت می‌کردند. بنابراین زمان $\frac{1}{15}$ 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 80 m تخمین زدند که بعداً کشف شد که این عمق حدود 115 m 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

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

$$= \frac{15 (340 \text{ m/s})}{14} (0.12 \text{ s}) = 43.71 \text{ m} \approx 44 \text{ m}$$

فیزیک ۳

تمرین ۳-۶

تخمینی با چکش به انتهای میله باریک بلندی ضربه‌ای می‌زند. تندی صوت در این میله 1500 m/s است. تندی صوت در هوا است. تشخیص دیگری که گوش خود را نزدیک به انتهای میله گذاشته‌اند، دو صدا را که یکی از میله می‌آید و دیگری از هوای اطراف میله، با اختلاف زمانی 0.12 s می‌شنود. اگر تندی صوت در هوا 340 m/s باشد، طول میله چقدر است؟

شکل ۳-۳۹ با انتشار صوت از جنه، انرژی به‌طور عمود، تخت از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می‌گذرد.

جدول ۳-۳۳ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

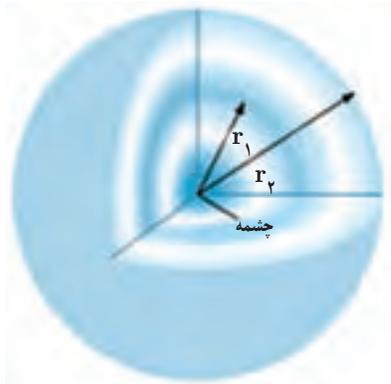
صوت	شدت صوت (W/m ²)	تراز شدت صوت (dB)
فیس کشیدن در فاصله ۲m	10^{-11}	۱۰
چرخ در فاصله ۱m	10^{-10}	۲۰
کتابخانه	10^{-9}	۳۰
خیابان پرترافیک	10^{-8}	۴۰
رستوران ساکت	10^{-7}	۵۰
صحنه معمولی در فاصله ۱m	10^{-6}	۶۰
خیابان پرترافیک در نزدیکی	10^{-5}	۷۰
طوفان	10^{-4}	۸۰
نقار در عمود از یک قطعه یک کارگاه ماشین‌آلات پرس‌وسا	10^{-3}	۹۰
دستگاه پخش صوت در بیشترین صدای خود	10^{-2}	۱۰۰
تند شدن گشکشی	10^{-1}	۱۲۰
فریاد بلند در فاصله ۳m	10^0	۱۳۰

۱۳-۳) (تراز شدت صوت)

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

که در آن β dB مخفف دسی‌بل، یکی از تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۸۴۷-۱۹۱۲ م) انتخاب شده است. همچنین I 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 0 dB دارد. جدول ۳-۳۳ شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

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 به طور یکنواخت گسیل می‌کند. به این چشمه‌ها، **چشمه نقطه‌ای** می‌گویند و موجی که از آن دور می‌شود **کروی** خواهد بود. در این حالت انرژی گسیل شده توسط چشمه روی سطح کروی موج به طور 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 گسیل شده توسط چشمه باید از هریک از این سطوح کروی فرضی بگذرد. بنابراین آهنگ انتقال انرژی توسط موج‌های صوتی از هر سطح باید برابر با آهنگ گسیل انرژی از 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.



تمرین ۲-۳

نخستی با چکش به انتهای میله پاریک بلندی ضربه‌ای می‌زند. تندی صوت در این میله ۱۵ متر تندی 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 ۰/۱۸۳ س. می‌شنود. اگر تندی صوت در هوا ۳۳۰ m/s باشد، طول میله چقدر است؟

نکته: 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 با 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 بعدتر 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 ۳-۳: شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	شدت صوت (W/m ²)	تراز شدت صوت (dB)
فیس کشیدن در فاصله ۳m	۱۰ ^{-۱۱}	۱۰
چرخ بر فاصله ۱m	۱۰ ^{-۱۰}	۲۰
کتابخانه	۱۰ ^{-۹}	۳۰
خیابان پرترافیک	۱۰ ^{-۸}	۴۰
رستوران ساکت	۱۰ ^{-۷}	۵۰
صحنه موسیقی در فاصله ۳m	۱۰ ^{-۶}	۶۰
خیابان پرترافیک در نزدیکی شارژر	۱۰ ^{-۵}	۷۰
ظرف در حال جوشن یک کارگاه	۱۰ ^{-۴}	۸۰
پرواز جت	۱۰ ^{-۳}	۹۰
پرواز جت در فاصله ۱۰۰m	۱۰ ^{-۲}	۱۰۰
صدای در بشیرین صدای خود	۱۰ ^{-۱}	۱۱۰
تندیس گسیل	۱۰ ^۰	۱۲۰
موتور جت در فاصله ۳۰m	۱۰ ^۱	۱۳۰

۱۳-۳) (شدت صوت)

$$I = \frac{\bar{P}}{A}$$
 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/m²) است.

۱۴-۳) (تراز شدت صوت)

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$
 که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۸۳۷-۱۹۱۲ م.) انتخاب شده است. همچنین I_0 شدت مرجع (W/m²) (10^{-12}) و 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 ۳-۳، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

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



این فیلم، یک دسی‌بل سنجر 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 می شود.

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 می کند. در آن مسئله خواهید دید اگر بر فرض ۱۰ سال در معرض صدایی با تراز ۹۲dB باشید، آستانه شنوایی برای همیشه به ۲۸dB افزایش می یابد، در حالی که اگر ۱۰ دقیقه در معرض صدای بلندتری با تراز شدت ۱۲۰dB قرار گیرید، آستانه شنوایی فقط به طور موقت به ۲۸dB افزایش می یابد.

۳۳-۳-۲ صوت

تخمینی با چگشت به انتهای میله باریک بلندی ضربه ای می زند. شدت صوت در این میله ۱۵ برابر شدت صوت در هوا است. شخصی دیگری که گوش خود را نزدیک به انتهای میله میله گذاشته است، دو صدا را که یکی از میله می آید و دیگری از هوای اطراف میله، با اختلاف زمانی ۰/۸۲s می شنود. اگر شدت صوت در هوا ۳۲۰۰۰۰ W/m² باشد، طول میله چقدر است؟

شدت و تراز شدت صوت: انتشار صوت از هر جبهه صوتی هواره با انتقال می دیرد انرژی از ناحیه ای از محیط به ناحیه ای دیگر از آن است. در واقع جبهه صوت، این انرژی را با به حرکت درآوردن لایه ای از محیط که در تماس مستقیم با جبهه است به محیط می دهد. انرژی از این لایه به لایه بعدی و از آنجا به لایه های بعدی منتقل و در تمام جهات منتشر می شود. شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی ای است که توسط موج به واحد سطح، عبور و برسانی انتشار صوت می رسد یا از آن عبور می کند (شکل ۳-۳).

شکل ۳-۳: انتشار صوت از جبهه انرژی

یک موج صوتی، بخت از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می گذرد.

جدول ۳-۳: شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	شدت صوت (W/m ²)	تراز شدت صوت (dB)
فیس کشیدن در فاصله ۳m	۱۰ ^{-۱۱}	۱۰
چرخ در فاصله ۱m	۱۰ ^{-۱۰}	۲۰
کتابخانه	۱۰ ^{-۹}	۳۰
خیابان پرترافیک	۱۰ ^{-۸}	۴۰
ریستوران شلوغ	۱۰ ^{-۷}	۵۰
صحنه موسیقی در فاصله ۳m	۱۰ ^{-۶}	۶۰
خیابان پرترافیک	۱۰ ^{-۵}	۷۰
در تریبی	۱۰ ^{-۴}	۸۰
ظرف چای در عروق از یک فاصله	۱۰ ^{-۳}	۹۰
کارگاه ماشین آلات پرترافیک	۱۰ ^{-۲}	۱۰۰
دستگاه سخن صوت در پیشترین صدای خود	۱۰ ^{-۱}	۱۱۰
موتور جت در فاصله ۳۰m	۱۰ ^۰	۱۲۰
	۱۰ ^۱	۱۳۰

که در آن \bar{P} آهنگ متوسط انتقال انرژی و A مساحت سطحی است که صوت با آن برخورد می کند. بنابراین یکای شدت صوت، وات بر مترمربع (W/m²) است.

شدت صوت را می توان با یک آنکلساز اندازه گرفت. با اندازه گیری شدت صوت های مختلف در میله های مختلف نسبت شدت های صوت در گستره شنوایی انسان می تواند در حدود ۱۰^{-۱۲} باشد (جدول ۳-۳). برای بررسی چنین گستره وسیعی از شدت ها راحت تر آن است که از لگاریتم (در پایه ۱۰) استفاده کنیم. چینی به جای شدت I یک موج صوتی، سادتر این است که از تراز شدت صوت (تراز صوتی) که به صورت زیر تعریف می نمود استفاده کنیم:

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (3-12)$$

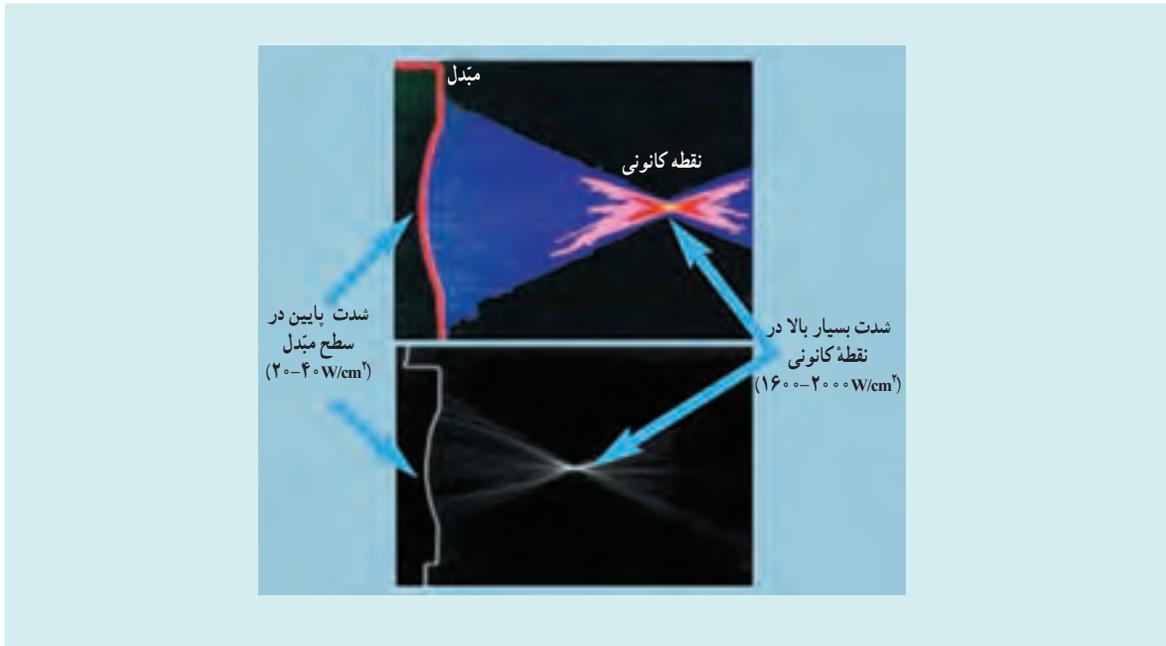
که در آن dB مخفف دسیبل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۸۲۷-۱۹۰۱ م) انتخاب شده است. همچنین I شدت مرجع (۱۰^{-۱۲} W/m²) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گستره شنوایی انسان است. یک موج صوتی با شدت I = I₀ تراز شدت صوتی برابر ۰dB دارد. جدول ۳-۳، شدت ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

دانستی

هایفو

این فناوری از امواج فراصوتی همگرا با شدت زیاد برای تولید گرما استفاده می کند. این امواج توسط مبدل های صوتی بر قدرت تولید می شوند. دستگاه HIFU دارای یک مبدل مقعر فراصوتی است که امواج فراصوتی را تولید و متمرکز می سازد. امواج متمرکز شده در ناحیه کانونی از انرژی بسیار بالایی برخوردار هستند و توسط یک کاوند، بافت موردنظر را احاطه می کنند و دما را در مدت بسیار کوتاه بالا می برند، به گونه ای که موجب بافت مردگی یا بسته شدن مجاری عروق در حال خونریزی می شوند. از این روش می توان در متوقف کردن خونریزی های داخلی مانند خونریزی کبد یا از بین بردن تومورهای خوش خیم و بدخیم استفاده کرد. با بافت مردگی توسط HIFU می توان 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 ۳-۹

تراز شدت صوت یک مخلوط کن ۸۰ dB است. شدت این صدا چقدر است؟
پاسخ : با استفاده از رابطه ۳-۱۲ 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 زیاد کردن صدای نوبویونی، شدت صوتی که به گوش ما می رسد ۱۰۰ برابر می شود. تراز شدت صوتی که می شنویم چند نسبی افزایش یافته است؟

آدرک شنوایی؛ وقتی دیپازونی را با ضربه ای به ارتعاش وامی داریم، دیپازون نوسان هایی انجام می دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین جنبه های فیزیکی یا «مختصرترین» گفته می شود. با شنیدن هر فن، 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 دیپازون با بسامدهای مختلف به طور یکسان تراخته 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 دیپازون با بسامد مشخص را با ضربه های متفاوت به ارتعاش وامی داریم، با آنکه بسامد صدایی که می شنویم تغییر نمی کند، اما صداهای 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 آنکارساز 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 نوسان های صدای ۲۰ Hz تا ۲۰۰۰۰ Hz است.

اگر دو فلز؛ فرض کنید یک ماسین آنتنشنایی در حالی که زیر آن روشن است در کنار خودروی شما متوقف باشد، شما همان بسامدی را از آزر می شنوید که مانند ماسین آنتنشنایی می شنود. ولی اگر خودروی شما به ماسین آنتنشنایی نزدیک و یا از آن دور شود، بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. همچنین اگر خودروی شما ساکن بماند و ماسین آنتنشنایی به شما نزدیک و سپس از شما دور شود باز هم بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. اینها مثالهایی از اثر دوپلر است که به افتخار گلف

فصل ۳۳، نویسان و موج

مثال ۳-۲

تراز شدت صوت یک مخلوطی ۸۰ dB است. شدت این صدا چقدر است؟ پاسخ: با استفاده از رابطه ۳-۲ داریم:

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

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

$$\log(I/I_0) = 8.0$$

$$(I/I_0) = 10^{8.0} \Rightarrow I = 10^{8.0} (1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2) = 1.0 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$$

تمرین ۳-۲

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

اخراج شنوایی: وقتی دیافراگم را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی‌داریم، دیافراگم نوسان‌هایی انجام می‌دهد که به دلیل مریایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین جنبه‌هایی **تُن موسیقی** یا **باختصاصاً تُن** گفته می‌شود. با شنیدن هر تُن، 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 نواخته شوند، بسامد آنها را می‌توان از کمترین تا بیشترین مقدار تشخیص داد. اما بلندی، شدتی است که گوش انسان از صوت درک می‌کند. اگر یک دیافراگم با بسامد مشخص را با ضربه‌های متفاوت به ارتعاش وامی‌داریم، با آنکه بسامد صدایی که می‌شنوم تغییر نمی‌کند، اما صدای ما با بلندی متفاوت را حس می‌کنیم که این به شدت ضربه‌ها بستگی دارد. بلندی متفاوت با شدت است. شدت را می‌توان با یک آنتن‌رسانا اندازه گرفت. در حالی که بلندی چیزی است که شما حس می‌کنید. دستگاه شنوایی انسان به بسامدهای متفاوت حساسیت‌های متفاوتی نشان می‌دهد، به‌طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهای در گستره ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz است. در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن تُن‌های صدای ۲۰ Hz تا ۲۰۰۰۰ Hz است.

اثر دوپلر: فرض کنید یک ماشین آنتن‌نشانی در حالی که آژیر آن روشن است در کنار خودروی شما متوقف باشد. شما همان بسامدی را از آژیر می‌شنوید که راننده ماشین آنتن‌نشانی می‌شنود. ولی اگر خودروی شما به ماشین آنتن‌نشانی نزدیک و یا از آن دور شود، بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. همچنین اگر خودروی شما ساکن باشد و ماشین آنتن‌نشانی 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 کانتف

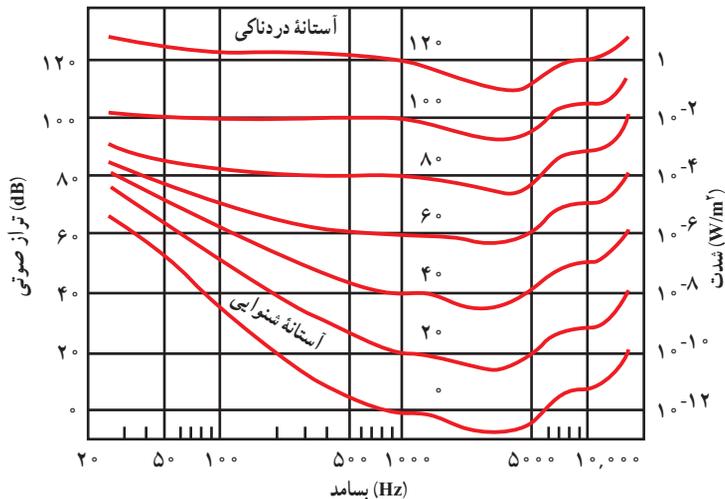
ν_{Loudness} ν_{Pitch} ν_{Timbre}

۸۱

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 به دست می‌دهند.

هر منحنی هم‌بلندی را با تراز صوتی آن برحسب دسی‌بل در بسامد ۱۰۰۰ Hz مشخص می‌کنند و آن را با فون (Phone) نمایش می‌دهند. مثلاً منحنی ۶۰ Phone به معنی صداهای هم‌بلندی‌ای با صدای ۱۰۰۰ Hz با تراز صوتی ۶۰ dB است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که صداهایی با شدت یکسان را می‌توان در بسامدهای متفاوت با بلندی مختلف شنید. منحنی ۰ Phone مربوط به آستانه شنوایی است، یعنی پایین‌ترین تراز ۰ Phone صدایی شنیده نمی‌شود. همچنین منحنی ۱۲۰ Phone مربوط به آستانه دردناکی است، یعنی صداهای بالاتر از ۱۲۰ 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 رویاز 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.

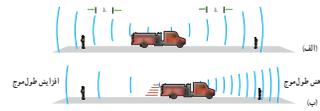


فیلم

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 مدامی 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 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.

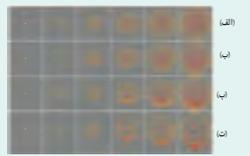
آن برهان کریستین دوپلر (۱۸۵۳-۱۸۰۳ م.) فیزیک دان اتریشی، نام گذاری شده است. اثر دوپلر نه تنها برای امواج صوتی بلکه برای امواج الکترومغناطیسی، مانند میکروموج ها، موج های رادیویی و نور مرئی نیز برقرار است. ما در اینجا نخست امواج صوتی را در نظر می گیریم و به عنوان دو حالت خاص، وضعیت های را بررسی می کنیم که در آنها چشمه صوتی به شونده ساکن نزدیک و یا از او دور شود و یا شونده به چشمه صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود.

الف) چشمه متحرک و ناظر (شونده) ساکن: شکل ۳-۲۷ الف، جبهه های موج حاصل از صدای آتیز یک ماینین آنتن نشانی ساکن را نشان می دهد. همان طور که دیده می شود فاصله این جبهه ها از هم، در جلو و عقب ماینین یکسان است، ولی اگر ماینین آنتن نشانی متلاً به جلو حرکت کند، فاصله جبهه های موج در جلوی ماینین کمتر از پشت آن خواهد بود (شکل ۳-۲۷ ب). بنابراین اگر ناظر ساکنی را روی جری ماینین در نظر بگیریم، این ناظر طول موج کوتاه تری را نسبت به وضعیتی که ماینین ساکن بود اندازه می گیرد، که این به معنی افزایش بسامد برای این ناظر است. در حالی که ناظر ساکن عقب ماینین طول موج بلندتری را نسبت به وضعیتی که ماینین ساکن بود اندازه می گیرد، که این به معنی کاهش بسامد برای این ناظر است.



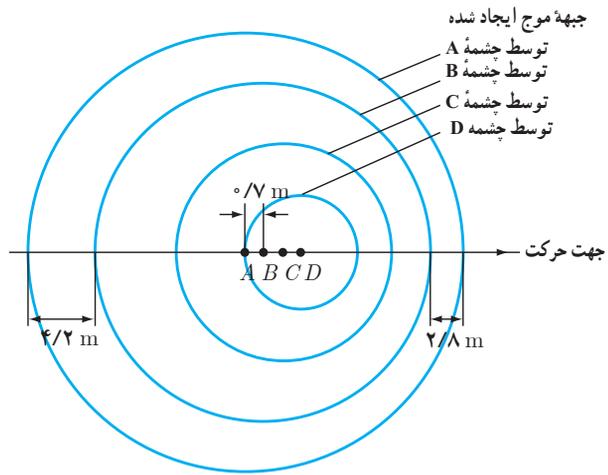
شکل ۳-۲۷ الف و ب: فاصله بین ماینین ساکن است جمع جبهه های موج در طول عقب ماینین یکسان است. با حرکت رو به جلوی ماینین، جمع جبهه های موج در جلوی ماینین بیشتر و در عقب آن کمتر می شود.

روستی ۳-۷



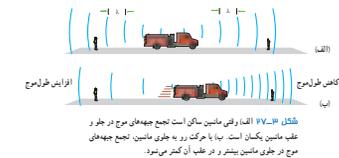
۳-۷ روابط و محاسبات مربوط به اثر دوپلر خارج از برنامه درسی است و نباید در ارزشیابی لحاظ شود.

در تفهیم شکل ۳-۲۷ (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 پوهان کربستین دویل (۱۸۴۳-۱۸۹۳ م.) فیزیکدان اتریشی، نام گذاری 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 های را بررسی می کنیم که در آنها چشمه صوتی به تندی ساکن نزدیک و یا از او دور شود، و یا بشود، به چشمه صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود.

الف) چشمه متحرک و ناظر (متنوعه) ساکن: شکل ۳-۲۷ 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 ۳-۲۷ ب). بنابراین اگر ناظر ساکن را روی روی ماشین در نظر بگیریم، این ناظر طول موج کوتاهتری 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.



پرسش ۳-۷



۱- روابط و محاسبات مربوط به اثر دوپلر خارج از برنامه درسی است و باید در ارزشیابی معالجه نمود.

پاسخ پرسش ۳-۷

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 هر 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 ۳-۷ 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.

۳۳ دوبریک

آن پوهان کینسین دوبریک (۱۸۵۲-۱۸۰۳ م.) فزیکدان اتریشی، نامگذاری شده است. اثر دوبریک تنها برای امواج صوتی بلکه برای امواج الکترومغناطیسی، مانند میکروموج‌ها، موج‌های رادیویی و نور مرئی نیز برقرار است. ما در اینجا نخست امواج صوتی را در نظر می‌گیریم و به‌توان دو حالت خاص، وضعت‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آنها چشمه صوتی به نوسانده ساکن نزدیک و یا از او دور شود، و یا نوسانده به چشمه صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود.

الف) چشمه متحرک و ناظر (نوسانده) ساکن: شکل ۲۷-۳ الف، جبهه‌های موج حاصل از صدای آزیو یک ماشین آنت‌نشانی ساکن را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود فاصله این جبهه‌ها از هم، در جلو و عقب ماشین یکسان است، ولی اگر ماشین آنت‌نشانی 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 روی روی 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 بلندتری 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) فرض ماشین ساکن است جمع جبهه‌های موج در جلو و عقب ماشین یکسان است. یا با حرکت رو به جلوی ماشین، جمع جبهه‌های موج در جلوی ماشین بیشتر و در عقب آن کمتر می‌شود.

پرسش ۲۷-۳

در هر ریزف شکل نوسان رویه‌رو، 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 دوبریک طرح از برنامه درسی است و باید در ارزشیابی لحاظ شود.

۸۲

خوب است در پایان پرسش ۷-۳ 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.

فیلم

شکل ۳۳ نوسان و موج

ب) چشمه ساکن و ناظر (نوسانده) 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 ۲۸-۳).

شکل ۲۸-۳ در مدت زمان یکسان خردی که به چشمه ساکن صوت نزدیک می‌شود یا جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که خردی که از این چشمه دور می‌شود یا جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

اثر دوبریک برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای موج‌های الکترومغناطیسی همانند نور با امواج رادیویی نیز اثر دوبریک برقرار است، ولی بررسی آن با اثر دوبریک در صوت متفاوت است. هر گاه چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آنتن‌رسان) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابه‌جایی دوبریکی) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصدهای نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری سماوی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوبریکی نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها بدست آورد. این جابه‌جایی دوبریکی صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سماوی نیست به ناظر (آنتن‌رسان) است. وقتی چشمه نور از ناظر (آنتن‌رسان) 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 ۲۹-۳).

دور شدن کهکشان
نزدیک شدن کهکشان

طول موج نور کاهش می‌یابد (انتقال به آبی)
طول موج نور افزایش می‌یابد (انتقال به سرخ)

شکل ۲۹-۳ اگر کهکسانی به ما نزدیک یا از ما دور شوند، بسامد و طول موج دریافتی از آن تغییر می‌کند.

۸۳

خوب است به دانش‌آموزان پیشنهاد شود که با خواندن اثبات ریاضی این مباحث و با مشاهده روابط اثر دوبریک، 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 دوبریک را برای حالت‌های مختلف مشاهده می‌کنید.

فیلم

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 موجی 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_D و v_S بهره بگیریم:

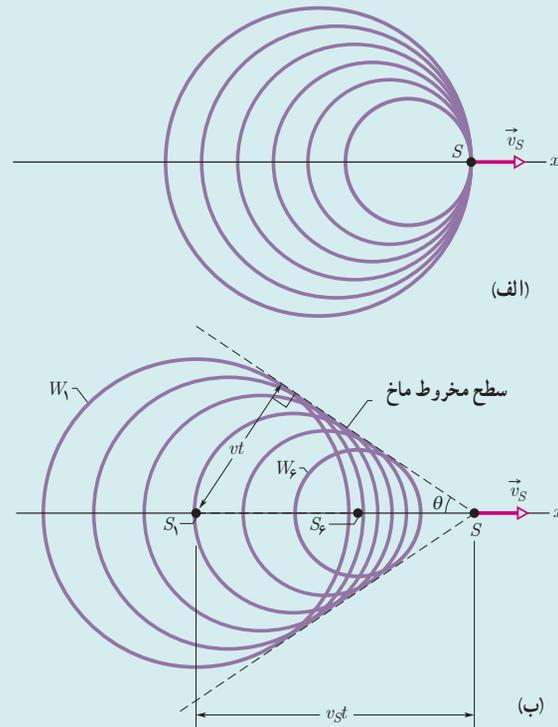
الف) اگر چشمه صوت در جهت مثبت محور x حرکت کند، علامت پشت v_S منفی می‌شود و در صورتی که در خلاف جهت مثبت محور x حرکت کند، علامت پشت v_S مثبت می‌شود.

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.

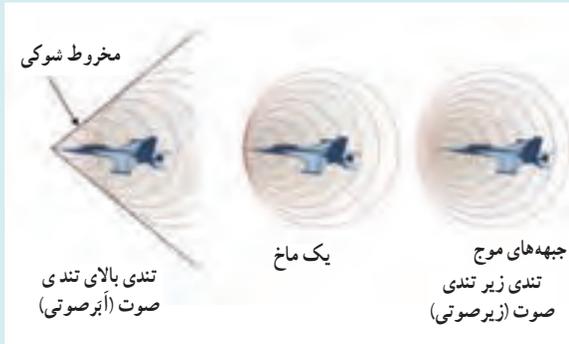


شکل ۱ (الف) چشمه صوتی S با تندی v_s برابر با تندی صوت و در نتیجه با همان سرعتی که جبهه‌های موج ایجاد می‌شوند، حرکت می‌کند. (ب) چشمه صوتی S با تندی v_s بزرگ‌تر از تندی صوت و در نتیجه سریع‌تر از جبهه‌های موج حرکت می‌کند. وقتی چشمه در مکان S_1 قرار دارد، جبهه موج W_1 و وقتی در مکان S_2 قرار دارد، جبهه موج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

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

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 ابرصوتی (شکل‌های ۲ الف و ب) یا موشک‌ها ایجاد می‌شوند، انفجاری از صدا موسوم به غرش صوتی را ایجاد می‌کنند که در آن فشار هوا ابتدا ناگهانی 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، غرش 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 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 آشکار ساز (وقتی در یک چارچوب مرجع اندازه‌گیری شوند) بستگی دارد. اگر f_0 را بسامدی بگیریم که توسط ناظر در چارچوب ساکن چشمه اندازه‌گیری می‌شود و f بسامد آشکار شده توسط ناظری باشد که با سرعت v نسبت به چارچوب ساکن حرکت می‌کند، آنگاه اگر ناظر در جهت دور شدن از چشمه باشد برای بسامد f داریم:

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

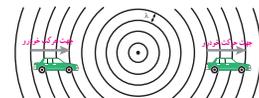
(که در آن $\beta = v/c$ و c تندی نور است) و اگر v در جهت نزدیک شدن باشد علامت‌های پشت β عوض می‌شوند. به همین ترتیب برای طول موج λ داریم:

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

که برای وضعیت نزدیک شدن، علامت‌های β عوض می‌شود.

شکل ۳: نوسان و موج

ب) چشمه ساکن و ناظر (نوسنده) متحرک: در این حالت تجمع جبهه‌های موج در دوسوی 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 ۳-۲).



شکل ۳-۲: در مدت زمان یکسان غورویی که به چشمه ساکن صوت نزدیک می‌شود با جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که غورویی که از این چشمه دور می‌شود با جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای امواج الکترومغناطیسی همانند نور با امواج رادیویی نیز اثر دوپلر رفتار است، ولی بررسی آن با اثر دوپلر در صوت متفاوت است. هر گاه چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکار ساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابجایی دوپلری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصد های نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری سماری، 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 سماری نسبت به ناظر (آشکار ساز) است. وقتی چشمه نور از ناظر (آشکار ساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً انتقال به سرخ می‌گویند و وقتی چشمه نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً انتقال به آبی می‌گویند (شکل ۳-۳).



۸۳

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.

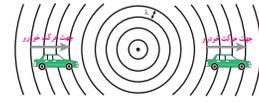
در این فیلم توضیح مصوری از انتقال به سرخ کیهانی را

می بینید.



شکل ۳۱- زمان و مکان و ۲۵۵

بیا چشمه ساکن و ناظر (منشود) متحرک - در این حالت نیجج 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 ۳۰-۳۱).



شکل ۳۰-۳۱ در مدت زمان یکسان خودی که به چشمه ساکن صوت نزدیک می‌شود با جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که خودی که از این چشمه دور می‌شود با جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

اگر دوبلر برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای امواج الکترومغناطیسی همانند نور با امواج رادیویی نیز اثر دوبلر برقرار است، ولی بررسی آن با اثر دوبلر در صوت متفاوت است. هر گاه چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آنتن‌ساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابجایی دوربری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصدهای نجومی ستارگان، کهکشانی‌ها و سایر چشمه‌های نوری ستاره‌ای، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابجایی دوربری نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و جگونگی حرکت آنها به دست آورد. این جابجایی دوربری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام ستاره‌ای نسبت به ناظر (آنتن‌ساز) است. وقتی چشمه نور از ناظر (آنتن‌ساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً انتقال به سرخ می‌گویند و وقتی چشمه نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً انتقال به آبی می‌گویند (شکل ۳۲-۳۳).



۸۳

پاسخ پرسش ۳-۸

همان‌طور که در شکل ۳-۲۹ 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.

خودی ۳۲

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 آنتن‌ساز ساکن دریافت می‌کند بیشتر از f_0 است یا کمتر؟



همچنین همان‌طور که در فصل بعد خواهیم دید، می‌توان با ارسال یک موج رادیویی به سوی خودی 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 ۳۳-۳۴).



شکل ۳۳-۳۴ 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.

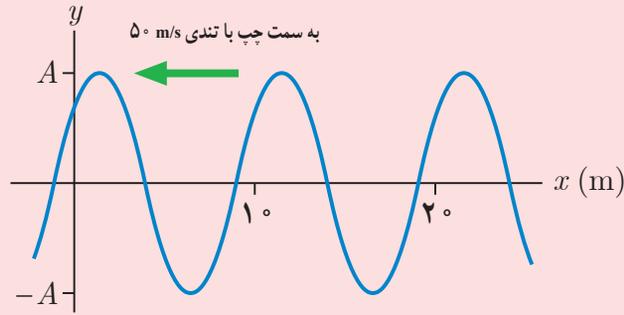
۳ هرگاه خط‌کشی را روی یک میز قرار دهیم، طوری که بخشی از آن بیرون میز قرار گیرد و سپس به انتهای آن بخش ضربه بزنیم، آن بخش شروع به ارتعاش می‌کند. هرچه بخش بیشتری از خط‌کش بیرون میز قرار گیرد صدای بم‌تری می‌شنویم. چرا؟ پاسخ: تخته کوتاه‌تر با سرعت بیشتری ارتعاش می‌کند و صوت‌هایی با ارتفاع زیاد ایجاد می‌کند و بنابراین صدایی زیرتر تولید می‌کند. در حالی 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:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{5.0 \text{ m/s}}{1.0 \text{ m}} = 5.0 \text{ s}^{-1} = 5.0 \text{ Hz}$$

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 به‌طور 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

$$v = \sqrt{\frac{19.6 \text{ N}}{0.25 \text{ kg/m}}} = 88.5 \text{ m/s}$$

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

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{88.5 \text{ m/s}}{2.0 \text{ s}^{-1}} = 44.2 \text{ m}$$

۳ گستره طول موج‌های رادیویی (الف) باند AM در گستره بسامدی 540° تا 1600° کیلوهرتز، و (ب) باند FM در گستره بسامدی $88/0^\circ$ تا 108° مگاهرتز را به دست آورید.

پاسخ: (الف) به ترتیب برای حد بالا و حد پایین داریم:

$$\lambda_{\text{بالا}} = \frac{c}{f_1} = \frac{3/00 \times 10^8 \text{ m/s}}{540 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 5/55 \times 10^2 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{پایین}} = \frac{c}{f_2} = \frac{3/00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1600 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 1/87 \times 10^2 \text{ m}$$

$$1/87 \times 10^2 \text{ m} < \lambda_{\text{AM}} < 5/55 \times 10^2 \text{ m}$$

(ب) به ترتیب برای حد بالا و حد پایین داریم:

$$\lambda_{\text{بالا}} = \frac{c}{f_1} = \frac{3/00 \times 10^8 \text{ m/s}}{88/0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 3/41 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{پایین}} = \frac{c}{f_2} = \frac{3/00 \times 10^8 \text{ m/s}}{108 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 2/78 \text{ m}$$

$$2/78 \text{ m} < \lambda_{\text{FM}} < 3/41 \text{ m}$$

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

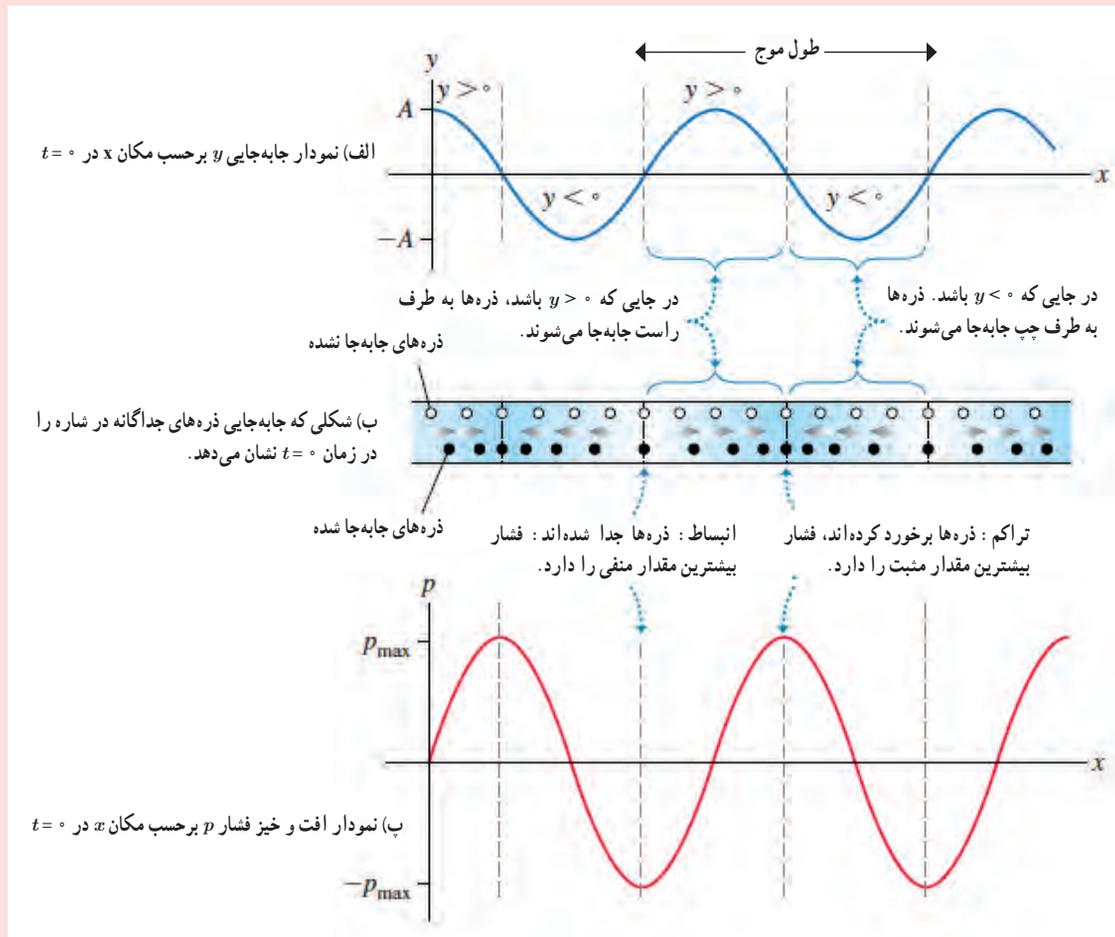
مشخص نمودارهای زیر را رسم کنید.

(الف) نمودار جابه‌جایی y بر حسب مکان x در $t = 0 \text{ s}$

(ب) شکلی که جابه‌جایی ذره‌های جداگانه در شماره را در زمان $t = 0 \text{ s}$ نشان می‌دهد.

(پ) نمودار افت و خیز فشار p بر حسب مکان x در $t = 0 \text{ s}$

پاسخ:



۶ یک چشمه نقطه‌ای $1/0$ W، امواج صوتی را به‌طور یکنواخت در تمام جهات فضا گسیل می‌کند، با فرض آنکه انرژی موج‌ها پایسته بماند، شدت صوت را در فاصله‌ی الف) $1/0$ m از چشمه ب) $1/5$ 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:

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2} = \frac{1/0 \text{ W}}{4\pi(1/0 \text{ m})^2} = 7/96 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2 \approx 8/0 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

$$I_r = I_1 \left(\frac{r_1}{r_r}\right)^2 = (7/96 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2) \left(\frac{1/0 \text{ m}}{2/5 \text{ m}}\right)^2 \quad \text{ب)}$$

$$= 1/27 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2 \approx 1/3 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

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:

$$\log \frac{I}{I_0} = 9/10 \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 1/10 \times 10^9$$

بدیهی است وقتی دو پتک باهم صدا می کنند خواهیم داشت:

$$\frac{I'}{I_0} = 2/10 \times 10^9$$

بنابراین داریم:

$$\beta' = (10 \text{ dB}) \log \frac{I'}{I_0} = (10 \text{ dB}) \log (2/10 \times 10^9) = 93/0 \text{ dB}$$

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 دو برابر از آن حرکت کنید، تراز شدت صوت چقدر تغییر می کند؟

پاسخ:

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

از طرفی $I_2 / I_1 = r_1^2 / r_2^2$ است و در نتیجه:

$$\beta_2 - \beta_1 = (10 \text{ dB}) \log \frac{r_1^2}{r_2^2} = (10 \text{ dB}) \log \frac{1}{4} = -6 \text{ dB}$$

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:

$$P = IA = I(\pi r^2) = (3/2 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2)(\pi)(3/5 \times 10^{-2} \text{ m})^2$$

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 پرسشی‌ها و مسئله‌های فصل ۳

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

۱-۳ و ۲-۳ نیوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده
 ۱. یک وزنه ۲۰ N را از انتهای یک فنر قائم می‌آوریم. فنر ۲۰ cm کشیده می‌شود. سپس این فنر 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 جسی به جرم ۳۳ به فنری متصل شود و به نوسان درآید، با دوره تناوب ۲/۱۵ نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم ۲/۱۰ kg افزایش یابد، دوره تناوب ۲/۱۵ می‌شود. مقدار m چقدر است؟
 ۳. جرم خودروی همراه با سرنشینان آن ۱۶۰۰ kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $۲۰۰ \times ۱۰^۴ \text{ N/m}$ سوار شده است. دوره تناوب، بسامد و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جاده‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.
 ۴. دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $۳ \times ۱۰^{-۲} \text{ m}$ و بسامد آن ۵۰ Hz هر ثانیه 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 x را بدست آورید. (ج) با افزایش x از حالت تعادل، محاسبه کنید.



۲-۴ تشدید
 ۱. هر فرد معمولاً با عرض اندک بدنتش به جیب و راسته، راه می‌رود و بدین ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود ۱-۵ Hz دارند. ارتعاش تشدید پل هوایی ملبورن در آغاز طغیانه جدید را به عبور منظر گروهی از افراد از این پل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب تشدید ارتعاش پل شده باشد؟



۵۵

۳-۴ انرژی در حرکت هماهنگ ساده
 ۱. دامنه نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت فنر ۲۲۸ 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 $۸ \times ۱۰^{-۲} \text{ J}$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای افقی چشم‌پوشی شود.)

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

$$k = \frac{|F|}{x} = \frac{20 \text{ N}}{0.02 \text{ m}} = 1000 \text{ N/m}$$

در نتیجه:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{W/g}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{(50/9.8 \text{ N/kg})}{1000 \text{ N/m}}} = 0.44 \text{ s}$$

۲ از رابطه $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ استفاده می‌کنیم. بنابراین داریم:

$$\frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = \sqrt{\frac{(m + 20)}{m}} = \frac{3}{2}$$

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:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{400 \text{ kg}}{2000 \times 10^4 \text{ N/m}}} = 0.888 \text{ s}$$

و از آنجا و

$$f = \frac{1}{T} = 1/0.888 \text{ s}^{-1} \approx 1.12 \text{ Hz}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(1.12 \text{ s}^{-1}) = 7.07 \text{ rad/s}$$

۴ معادله حرکت نوسانگر با رابطه $x = A \cos \omega t$ داده می‌شود. که در اینجا

$$A = 3.0 \times 10^{-2} \text{ m}, \quad \omega = 2\pi f = 2\pi(5/0.5) = 10\pi \text{ rad/s}$$

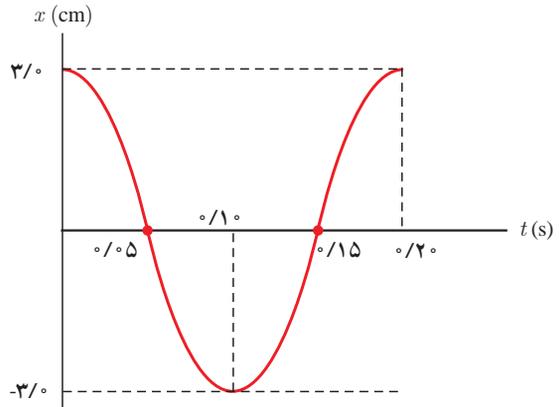
در نتیجه

$$x = (3.0 \times 10^{-2} \text{ m}) \cos(10\pi t)$$

برای رسم نمودار مکان-زمان خوب است دوره تناوب را محاسبه کنیم:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{5/0.5} = 0.2 \text{ s}$$

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

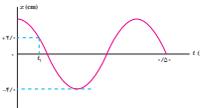
در نتیجه



۸۵ Millennium bridge

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

- ۱-۳ و ۳-۳ نوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده
۱. یک وزنه ۲۰ N را از انتهای یک فن قائم می‌آویزم. فن ۲۰ cm کشیده می‌شود. سپس این فن را در حالی که به یک وزنه ۵۰ N متصل است روی میز بدون اصطکاک به نوسان درمی‌آویزم. دوره تناوب این نوسان چقدر است؟
۲. هرگاه جرم به جرم m 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 ۳۰ s می‌شود. مقدار m چقدر است؟
۳. جرم خودروی همره با سرشتیان آن ۱۶۰۰ kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $2.0 \times 10^7 \text{ N/m}$ سوار شده است. دوره تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جاهای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به طور یکواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.
۴. دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $3.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ و بسامد آن 5.0 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. ب) با اندازه‌تندی نوسانگر را در لحظه t_1 محاسبه کنید.
- ۳-۳ تقدیم
۱. هر فرد معمولاً با چرخش انگشت به چپ و راست، راه می‌رود و بدون ترتیب دوره‌های کوچک و زمین نرم پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود ۱-۲ Hz دارند. ارتعاش شدید پل هرابی ملبورن در آغاز هزاره جدید را در عبور ملنگ گروهی از افراد از این پل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های پل این افراد موجب چنین ارتعاشی شده باشد؟



۳-۳ ارتعاش در حرکت هماهنگ ساده

۱. دامنه نوسان وزنه‌ای که به فنر با ثابت 27 N/m متصل است در راستای افقی نوسان می‌کند. برای $A = 4 \text{ cm}$ است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان $1.0 \times 10^{-2} \text{ J}$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلاقی جنبشی‌یابی نود.)

$$x = A \cos \Delta \pi t$$

$$\frac{A}{2} = A \cos \Delta \pi t_1$$

$$\cos \Delta \pi t_1 = \frac{1}{2}$$

چون t_1 نخستین زمانی است که $x = A/2$ است، در رابطه بالا $\Delta \pi t_1$ را برابر $\pi/3$ می‌گذاریم. در نتیجه $t_1 = \frac{1}{15} \text{ s}$ می‌شود.

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

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

و در نتیجه

$$|a| = \frac{k}{m}|x| = \omega^2|x| = (\Delta \pi)^2|x|$$

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

بنابراین باید x را در زمان t_1 محاسبه کنیم، که البته از روی شکل می‌دانیم برابر با $2/3 \text{ cm}$ است. اگر x را در لحظه t_1 نداشته‌ایم، باید از محاسبه‌ای نظیر محاسبه زیر آن را به دست می‌آوردیم:

$$x(t_1) = A \cos \Delta \pi t_1$$

$$= (0.04 \text{ m}) \cos \left(\Delta \pi \frac{1}{15} \right) = (0.04 \text{ m}) \cos \frac{\pi}{3}$$

$$= 0.02 \text{ m} = 2/100 \text{ cm}$$

در نتیجه

$$|a| = (\Delta \pi)^2 (0.02 \text{ m}) = 4/93 \text{ m/s}^2 \approx 4/9 \text{ m/s}^2$$

$$E = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} (74 \text{ N/m}) (0.08 \text{ m})^2 = 0.2368 \text{ J} \approx 0.24 \text{ J}$$

۶ الف) انرژی کل نوسانگر برابر است با

ب) $E = K + U$ است و بنابراین

$$K = E - U = 0.2368 \text{ J} - 0.18 \text{ J} = 0.0568 \text{ J}$$

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 می شود

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{k}{m}} A = \sqrt{\frac{6 \times 10^3 \text{ N/m}}{1 \text{ kg}}} (0.09 \text{ m}) = 2.2 \text{ m/s}$$

ب) از $E = K + U$ استفاده می کنیم. $E = \frac{1}{2} k A^2$ قرار می دهیم و از آنجا درمی یابیم:

$$U = E - K = \frac{1}{2} k A^2 - \frac{1}{2} m v^2$$

$$= \frac{1}{2} (6 \times 10^3 \text{ N/m}) (0.09 \text{ m})^2 - \frac{1}{2} (1 \text{ kg}) (1.6 \text{ m/s})^2$$

$$= 2.43 \text{ J} - 0.8 \text{ J} = 1.63 \text{ J}$$

الف) وقتی $x = 0$ است، یعنی در زمانی که نوسانگر از نقطه تعادل می گذرد، تندی آن بیشینه است.

چون نخستین بار را خواسته است، $n = 0$ می گذاریم:

$$A \cos \omega t = 0, \quad A \neq 0 \Rightarrow \omega t = (2n+1) \frac{\pi}{2}$$

$$\omega t = \pi/2 \Rightarrow 2 \cdot \pi t = \frac{\pi}{2}$$

و از آنجا $t = \frac{1}{4} \text{ s}$ به دست می آید. (این نتیجه را می توانستیم به طور ساده ای با رسم یک نمودار کسینوسی نیز به دست آوریم، به طوری که در لحظه $t = T/4$ در می یابیم برای نخستین بار $x = 0$ می شود.)

ب) تندی نوسانگر وقتی صفر است که $x = -A$ باشد که این منظر با زمان $t = \frac{3}{4} \text{ s}$ است. این را می شود 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 $t = \frac{3}{4} \text{ s}$ می شود.

پ) در $K = 2U = 2K$ باید $E = 2U = 2K$ قرار دهیم. در نتیجه $E = 2U = 2K$ می شود. از طرفی $E = K_{\max} = \frac{1}{2} m v_{\max}^2$ است.

بنابراین

$$K = \frac{E}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} m v_{\max}^2 \right)$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{4} m v_{\max}^2 \Rightarrow |v| = \frac{1}{\sqrt{2}} v_{\max}$$

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

$$|v| = \frac{1}{\sqrt{2}} A\omega = \frac{1}{\sqrt{2}} (0.05 \text{ m}) (2 \cdot \pi)$$

$$= 2.2 \text{ m/s}$$

پستی ها و مسئله های فصل ۳

۱- جسی به جرم $1/2 \text{ kg}$ به فزنی افقی با ثابت 6 N/cm متصل است. فز به اندازه 4 cm فشرده و سپس رها می شود و جسم روی سطح افقی نوارج نوسان می کند. با چسبندگی از اصطکاک (الف) دامنه نوسان و تندی بیشینه جسم چقدر است؟ (ب) وقتی تندی جسم $1/5 \text{ m/s}$ است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۲- معادله حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به صورت $x = (0.5 \text{ m}) \cos \pi t$ 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؟

۳- تندی نوسانگر چقدر باشد تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

۴- الف) ساعتی آریگدار (یا آریگ ساده) در نهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه ای در استوا برده شود، عقب می افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلو افتادن در یک شبانه روز چقدر است؟

۵- به نظر شما آیا با افزایش دما، یک ساعت آریگدار بطور می افتد یا عقب می افتد؟

۳-۳ تشدید

۱- هر فرد معمولاً با چرخش کمک پدال به چپ و راست، راه می رود و بدن تندی تندی کوچک و زمین تندی تندی دارد. این تندی تندی در حدود 2 Hz دارد. لرزش تشدید بی هوای مینیوم در آغاز هزاره جدید را به عبور منظر گروهی از افراد از این بی ربط داده اند. چگونه ممکن است نوسان های بدن این افراد موجب چنین لرزشی شده باشد؟



۱. Millenium bridge
۸۵

۳-۳ و ۳-۳ نوسان دوره ای و حرکت هماهنگ ساده

۱- یک وزنه 2 N را از انتهای یک فنر قائم می آوریم. فنر 2 cm کشیده می شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنه 5 N متصل است روی میز بدون اصطکاکی به نوسان درمی آوریم.

۲- دوره تناوب این نوسان چقدر است؟

۳- هرگاه جسی به جرم m به فزنی متصل شود و به نوسان درآید، با دوره تناوب T_1 نوسان می کند. اگر جرم این جسم $4k$ افزایش یابد، دوره تناوب T_2 می شود. مقدار m چقدر است؟

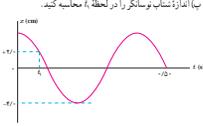
۴- جرم خودروی همراه با سرنشینان آن 1600 kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $2.0 \times 10^5 \text{ N/m}$ قرار داده است.

دوره تناوب، سیاهمه، و سیاهمه زاویه ای از انحراف خودرو وقتی از جاده ای می گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به طور یکواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.

۵- دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $3.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ و سیاهمه آن 50 Hz هر ثانیه است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را در یک دوره رسم کنید.

۶- نمودار مکان-زمان نوسانگری مطابق شکل زیر است. الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید. ب) مقدار A را بدست آورید.

۷- به اندازه شتاب نوسانگر در لحظه t محاسبه کنید.

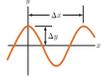


۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

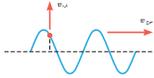
۱- دامنه نوسان وزنه ای که به یک فنر با ثابت 2 N/cm متصل است و در راستای افقی نوسان می کند، برابر با 1 cm است.

اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه ای از مسیر نوسان $1.0 \times 10^{-3} \text{ J}$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای افقی چشمپوشی کنید.)

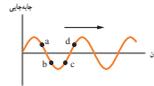
۱۱۰. در نمودار جابه‌جایی - مکان موج عرضی شکل زیر
 $\Delta y = 15^\circ \text{ cm}$ و $\Delta x = 4^\circ \text{ cm}$ است. اگر بسامد نوسان‌های
 چشمه 100 Hz باشد، طول موج، دامنه، تندی و دوره تناوب
 موج چقدر است؟



۱۱۱. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که
 با تندی 100 Hz به سمت راست حرکت می‌کند. در حالی که تندی ذره
 نشان داده شده ریسمان 10 cm/s است. آیا این دو تندی با هم برابرند؟
 توضیح دهید.

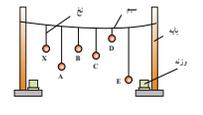


۱۱۲. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه‌ای از زمان نشان
 می‌دهد که در جهت محور x در طول ریسمان کشیده شده‌ای
 حرکت می‌کند. چهار جزء از این ریسمان روی شکل نشان داده
 شده‌اند. در این لحظه هر یک از این چهار جزء بالا می‌روند یا
 پایین؟



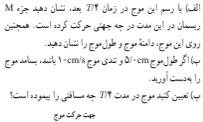
۱۱۳. بسینی با چگالی $7/8 \text{ g/cm}^3$ و سطح مقطع 10 cm^2
 بین دو نقطه با نیروی 156 N کشیده شده است. تندی انتشار
 موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.

۱۱۴. معادله شکل جده آونگ را از بسینی آونگه‌ای به توضیح بدهد با به
 نوسان درآوردن آونگ Δx . آونگ‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟

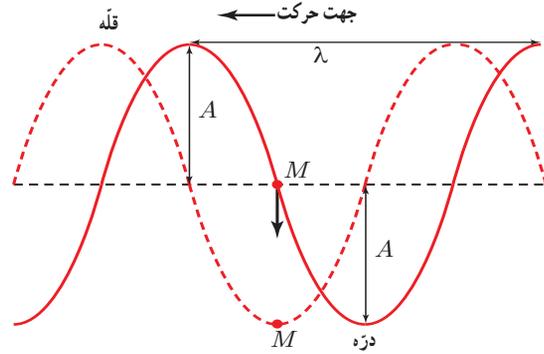


۱۱۵ و ۱۱۶. موج P و انواع آن و مشخصه‌های موج

۱۱۵. یک نوسان‌ساز موج‌های دورهای در یک ریسمان کشیده
 ایجاد می‌کند.
 ابتدا با افزایش بسامد نوسان‌ساز گذار یک از کیت‌های زیر تغییر
 نمی‌کند: بسامد موج، تندی موج، طول موج.
 ب) حال اگر به جای افزایش بسامد، کشش ریسمان را افزایش
 دهیم، هر یک از کیت‌های زیر چه تغییری می‌کند: بسامد موج،
 تندی موج، طول موج.
 ۱۱۶. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک
 ریسمان کشیده شده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت
 می‌کند.
 ابتدا با رسم این موج در زمان $T/4$ بعد، نشان بدهد جزء M
 ریسمان در این مدت در چه جهتی حرکت کرده است. همچنین
 روی این موج، دامنه موج و طول موج را نشان بدهد.
 ب) اگر طول موج 5° cm و تندی موج 10 cm/s باشد، بسامد موج
 را بدست آورید.
 ب) همین کیت موج در مدت $T/4$ چه مسافتی را پیموده است؟



۸۶



ب) بسامد موج برابر است با

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{10 \text{ cm/s}}{5^\circ \text{ cm}} = 2^\circ \text{ s}^{-1} = 2^\circ \text{ Hz}$$

پ) از رابطه $x = vt$ استفاده می‌کنیم:

$$x = vt = v \left(\frac{T}{4} \right) = v \left(\frac{1}{4f} \right) = (10 \text{ cm/s}) \left(\frac{1}{\lambda \cdot 2^\circ \text{ s}^{-1}} \right) = 1/25 \text{ cm} \approx 1/2 \text{ cm}$$

که این همان معادل $\lambda/4 = (5^\circ \text{ cm})/4 = 1/25 \text{ cm}$ است.

۱۱۴. از روی شکل درمی‌یابیم طول موج $\lambda = \Delta x = 4^\circ \text{ cm}$ و دامنه $A = \Delta y = 15^\circ \text{ cm}$ است. با استفاده از رابطه $v = \lambda f$ می‌توانیم
 تندی انتشار موج را به دست آوریم:

$$v = \lambda f = (4^\circ \text{ cm}) (100 \text{ s}^{-1}) = 400 \text{ cm/s} = 4 \text{ m/s}$$

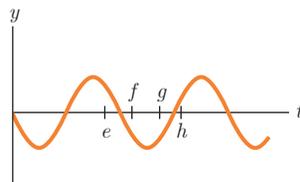
دوره تناوب نیز وارون بسامد است:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{100 \text{ s}^{-1}} = 0.01 \text{ s}$$

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

۱۱۶. با استدلالی مشابه آنچه در حل مسئله ۱۱۳ ارائه کردیم (و نیز با واریسی شکل ۱۱۳-۱۹ کتاب) درمی‌یابیم a و b رو به بالا، و c و d رو
 به پایین حرکت می‌کنند.

(پرسش جالب دیگری هم که می‌شد مطرح کرد در مورد جابه‌جایی یک جزء ریسمان بر حسب زمان، مطابق شکل زیر، است.)



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 تندی 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 :

$$\Delta t = t_T - t_L = t_T - t_T \frac{v_T}{v_L} = t_T \left(1 - \frac{v_T}{v_L}\right)$$

$$= t_T \left(1 - \frac{5 \text{ m/s}}{15 \text{ m/s}}\right) = \frac{2}{3} t_T = 4 \text{ ms}$$

و از آنجا $t_T = 6 \text{ ms}$ می شود و در نتیجه

$$d = v_T t_T = (5 \text{ m/s})(6 \times 10^{-3} \text{ s}) = 0.03 \text{ m} = 3 \text{ cm}$$

۲۳ همان طور که در متن درس آمده است، از گزینه های داده شده تنها دمای هوا بر تندی صوت تأثیر می گذارد. البته در حالت کلی عوامل مؤثر بر تندی 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

$$\omega = 2\pi f = 2\pi (6/7 \times 10^6 \text{ s}^{-1}) = 4/21 \times 10^7 \text{ rad/s} \approx 4/2 \times 10^7 \text{ rad/s}$$

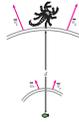
توجه کنید که مقدار ω بسیار زیاد است و این به معنای نوسان های بسیار سریع کاوه است. در حالی که برای یک نوسانگر کند، مانند آونگ یک ساعت پاندولی، ماجرا برعکس است و دوره تناوب زیاد و بسامد پایین است.

(ب) از رابطه $\lambda = v/f$ داریم :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{150 \text{ m/s}}{6/7 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 2/23 \times 10^{-4} \text{ m} \approx 2/2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

شکل ۳۳- انتقال و موج

که در سطح مایه منتشر می شوند. و دو نوع آن: امواج عرضی یا تنیدی $v_T = 5 \text{ m/s}$ و امواج طولی یا تنیدی $v_L = 15 \text{ m/s}$. طرف مایه ای می تواند با استفاده از اختلاف زمانی بین زمان رسیدن این امواج به نزدیک بای خود، فاصله خود از طعمه را تخمین کند. اگر این اختلاف زمان برابر $\Delta t = 2/3 \text{ ms}$ باشد، طعمه در چه فاصله ای از طرف قرار دارد؟



بردهای v	x	بردهای v	x	بردهای v	x
------------	-----	------------	-----	------------	-----

۳۱ شکل زیر میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در نقطه ای معین و دور از چشمه، در یک لحظه نشان می دهد. موج از روی را در خلاف جهت محور x انتقال می دهد. جهت میدان مغناطیسی موج را در این نقطه و این لحظه تعیین کنید.



۳۲ (الف) طول موج نور نارنجی در هوا حدود $6/2 \times 10^{-7} \text{ m}$ است. بسامد این نور چند هرتز 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).
 ۳۳ چشمه مرمی با بسامد 10 Hz در یک محیط که تندی انتشار موج در آن 100 m/s است، نوسان های طولی ایجاد می کند. اگر دامنه نوسان ها 2 cm باشد،
 (الف) فاصله بین دو تراکم متوالی این موج چند است؟
 (ب) فاصله بین یک تراکم و یک انبساط متوالی چند است؟
 ۳۴ طرف های مایه ای وجود طعمه را با امواجی که بر اثر حرکت طعمه در سطح ناشی ایجاد می شود، احساس می کنند. این امواج

۳۰ توضیح دهید کدام یک از عامل های زیر بر تندی صوت در هوا مؤثر است.
 (الف) شکل موج (ب) دامنه موج (ج) بسامد موج (د) تندی امواج
 ۳۱ در سونوگرافی معمولاً از کاوه ای دینی موسوم به تراکنار فرانسوی برای تشخیص وضعیت استفاده می شود که دقیقاً روی ناحیه مودنظر از من پیمار گذاشته و حرکت داده می شود. این کاوه در بسامد 6 MHz عمل می کند.
 (الف) بسامد زاویه ای در این کاوه نوسان چند است؟
 (ب) اگر تندی موج صوتی در بافت نرم از بین 1500 m/s باشد، طول موج این موج در این بافت چند است؟



۱- سونو
۲- Ultrasonic Transducer

$$\approx 6/3 \times 10^{-1} \text{ W/m}^2$$

$$I_T = (10^0 \times 10^{-11} \text{ W/m}^2) 10^{9.2 \text{ dB}} = 1/58 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

$$\approx 1/6 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

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

$$\frac{I_T}{I_1} = 10^{0.5} = 3/1.6 \approx 3/2$$

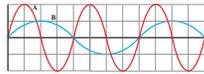
۳۰ از رابطه $I = \bar{P}/A$ استفاده می کنیم که در اینجا $A = 4\pi r^2$ است.

بنابراین داریم :

$$\frac{I_1}{I_T} = \frac{\bar{P}}{4\pi r_1^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \left(\frac{1.6 \text{ m}}{64 \text{ m}}\right)^2 = \left(\frac{1}{4}\right)^2$$

و در نتیجه

۲۸. فرض کنید صوت به طور یکساخت 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 $I = 10^{-11} \text{ W/m}^2$ به شونده‌ای برسد که به فاصله $r_1 = 44 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد، این صوت به شونده‌ای که در فاصله $r_2 = 140 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد یا چه شدتی می‌رسد؟



۲۸ شکل زیر جهت‌های حرکت یک جبهه صوتی و یک ناظر (شونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

جنبه	ناظر (شونده)	جهت
•	•	(الف)
•	•	(ب)
•	•	(ج)
•	•	(د)
•	•	(ه)
•	•	(و)
•	•	(ز)
•	•	(ح)

۲۹ بسامدی را که ناظر در حالت‌های مختلف می‌شنود با حالت الف مقایسه کنید.

۲۸. تندی صوت در یک فلز خاص، برابر v است. به یک سر لوله توخالی بلندی 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 توجی است که از دیواره لوله می‌گذرد و دیگری از موجی است که از طریق هوای داخل لوله عبور می‌کند.

۲۹. بوجی صوتی با توان $1.2 \times 10^{-3} \text{ W}$ از دو صفحه فرضی شکل $2 \times 3 \text{ m}^2$ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به ترتیب $A_1 = 2 \text{ m}^2$ 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 آهسته‌تر می‌شنود.

۳۰ شدت صدای حاصل از یک مته سنگ‌کن در فاصله 10 m از آن 10^{-10} W/m^2 است. تراز شدت صوتی آن بر حسب dB چقدر می‌شود؟

۳۱. اگر به مدت 10 دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت 120 dB باشیم، آسنة شنوایی به طور موقت از 20 dB به 40 dB افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که به طور متوسط اگر به مدت 10 سال در معرض صدای با تراز شدت 120 dB قرار گیریم، آسنة شنوایی به طور دائم به 20 dB افزایش می‌یابد. شدت‌های صوت مربوط به 120 dB و 20 dB چقدر است؟ (راهنمایی: برای پاسخ دادن لازم است از نام‌های مناسب استفاده کنید.)

۳۲. یک دستگاه صوتی، صدای با تراز شدت 100 dB و دستگاه صوتی دیگر، صدای با تراز شدت 90 dB ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این دو تراز (بر حسب W/m^2) به ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_1 را با I_2 تعیین کنید.

۳۳. در یک آنتن‌یابی، موسیقی در بالای آسمان منجر

$$I_T = 1/6 I_1 = 1/6 (10^{-11} \text{ W/m}^2) = 1/6 \text{ W/m}^2$$

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 $f = v/\lambda$ درمی‌یابیم 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 :

$$\frac{I_B}{I_A} = \left(\frac{A_B f_B}{A_A f_A}\right)^2 = \left(\frac{A_B}{A_A}\right)^2 \left(\frac{f_B}{f_A}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{16}$$

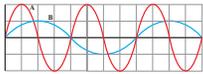
یعنی شدت موج صوتی A ، 16 برابر شدت موج صوتی B است.

۳۲ در حالت‌های (ب) و (پ) ناظر ساکن و چشمه متحرک است که این حالتی است که در وضعیت الف اثر دوپلر در متن درس آن را بررسی کردیم. بنابراین همان استدلال را به کار می‌گیریم. اگر چشمه به طرف ناظر حرکت کند (حالت ب)، تجمع جبهه‌های موج در جلوی آن بیشتر خواهد شد و بنابراین ناظر ساکن روبه‌روی آن طول موج کوتاه‌تری نسبت به وضعیتی که چشمه، ساکن بود اندازه می‌گیرد که این به معنی افزایش بسامد برای این ناظر است. با استدلالی مشابه درمی‌یابیم که با دور شدن چشمه، از بسامدی که ناظر اندازه می‌گیرد کم می‌شود و بنابراین در حالت (پ) کاهش بسامد داریم. حالت‌های (ت) و (ث) نیز همان وضعیتی هستند که در حالت ب اثر دوپلر در متن درس آن را بررسی کردیم. در این وضعیت‌ها تجمع جبهه‌های موج تغییر نمی‌کند، و اگر مانند حالت (ث) ناظر به هدف چشمه حرکت کند با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود که به معنی افزایش بسامد است. ولی اگر ناظر مانند حالت

مشاوره

می‌شود. فرض کنید صوت به‌طور یکساخت در تمام جهت‌ها منتشر شود. از جذب انرژی صوتی در محیط و نیز از بازتابی که ممکن است امواج صوتی از زمین پیدا کند چشم‌پوشی کنید. با فرض اینکه صوت با شدت $I = 0.1 \text{ W/m}^2$ به شونده‌ای برسد که به فاصله $r_1 = 40 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد. این صوت به شونده‌ای که در فاصله $r_2 = 160 \text{ m}$ از

محل انفجار قرار دارد یا چه شدتی می‌رسد؟
پ۱۱. 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.



پ۱۲. شکل زیر جهت‌های حرکت یک جبهه صوتی و یک ناظر (شونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

جهت ناظر (شونده)	جهت
(الف)	•
(ب)	•
(پ)	•
(ت)	•
(ث)	•
(ج)	•
(ح)	•

بسامدی را که ناظر در حالت‌های مختلف می‌شنود با حالت الف مقایسه کنید.

پ۱۳. شدت صوت در یک فتر خاص، برابر 10^{-10} است. به یک سر لوله توخالی بلندی از جنس این فلز به طول L ضرباً محبکی 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 شدت صوت در هوا 10^{-10} باشد، بازه زمانی Δt بین دریافت این دو صدا در گوش شونده چقدر خواهد بود؟
 ب) اگر $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$ و فلز از جنس فولاد باشد، طول L لوله چقدر است؟ ($v = 340 \text{ m/s}$)

پ۱۴. موجی صوتی با توان $1.0 \times 10^{-3} \text{ W}$ از دو صفحه فرضی شکل ۲۶-۳ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به‌ترتیب $A_1 = 4.0 \text{ m}^2$ و $A_2 = 1.0 \text{ m}^2$ باشد، شدت صوت در دو سطح را تعیین کنید و توضیح دهید چرا شونده در محل صفحه دوم صدا را آهسته‌تر می‌شنود.

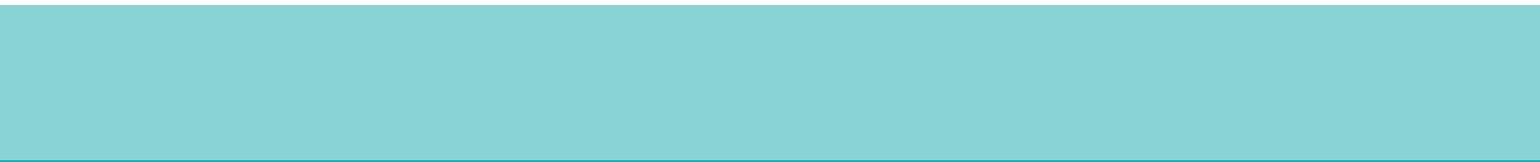
پ۱۵. شدت صدای حاصل از یک مژه سنگ‌سنگی در فاصله 1.0 m از آن $1.0 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$ است. تراز شدت صوتی آن برحسب dB چقدر می‌شود؟

پ۱۶. اگر به مدت 1.0 دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت 120 dB باشید، آستانه شنوایی به‌طور موقت از 10 dB به 140 dB افزایش می‌یابد. اطلاعات نشان داده است که به‌طور متوسط اگر به مدت 1.0 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؟ (راحتی؛ برای پاسخ دادن لازم است از مائین حساب مناسب استفاده کنید.)

پ۱۷. یک دستگاه صوتی، صدایی با تراز شدت 100 dB و 10 و دستگاه صوتی دیگر، صدایی با تراز شدت 95 dB ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این دو تراز (برحسب W/m^2) به ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_1/I_2 را تعیین کنید.

پ۱۸. در یک آتش‌بازی، موشکی در بالای آسمان منفجر

(ت) از چشمه دور شود به معنی کاهش بسامد خواهد بود. در این مسئله می‌شد حالت‌های زیر را نیز از دانش‌آموزان پرسید. وضعیت‌هایی که چشمه و آشکارساز رودررو به سمت یکدیگر نزدیک می‌شوند و وضعیت‌هایی که چشمه و آشکارساز در خلاف جهت از هم دور می‌شوند. در این صورت با تلفیق هر دو استدلال بالا درمی‌یابیم که در وضعیتی که هر دو به هم نزدیک می‌شوند، بسامد دریافتی بیشتر و در وضعیتی که از هم دور می‌شوند، بسامد دریافتی کوچک‌تر می‌شود.



فصل چهارم

برهم کنش‌های موج

۴-۱- بازتاب موج

۴-۲- شکست موج

۴-۳- پراش موج

۴-۴- تداخل امواج

راهنمای پاسخ‌یابی پرسش‌ها و مسئله‌های 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 می گویند.

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 بایی 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 تست 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 صلاحدید مدرس می توان ۱۶ جلسه ۹۰ دقیقه‌ای به آموزش این فصل اختصاص داد.

۴

فصل

برهم کنش های موج



در این تصویر نشی شکست‌انگیز از امواج دریا موسوم به دریای شطرنجی (Cross Sea) را می‌بینید. این نشی آسون‌کننده چگونه ممکن است ایجاد شده باشد؟

یختن ها

- ۱-۲ بازتاب موج
- ۲-۲ شکست موج
- ۳-۲ برش موج
- ۴-۲ تداخل امواج

تصویر شگفت‌انگیز آغاز فصل وقتی ایجاد می‌شود که دو مجموعه از جبهه‌های موج تقریباً به حالت عمود بر یکدیگر، با هم برخورد کنند. این اتفاق معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که جبهه‌های موج حاصل از دو سامانه آب و هوایی در نقطه‌ای دور از هر دو سامانه، با هم برخورد کنند. توجه کنید دریای شطرنجی را به‌سادگی نمی‌توانید مشاهده کنید و باید از فاصله‌ای دور یا از آسمان آن را ببینید. در فیلم زیر چگونگی ایجاد یک دریای شطرنجی را می‌بینید.

در فیلم چگونگی تشکیل دریای شطرنجی را مشاهده می‌کنید.



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.



در این فیلم بازتاب تپ از یک انتهای باز را می بینید.



در این فیلم بازتاب دو تپ از انتهای ثابت و آزاد را با هم می بینید.



در این فیلم بازتاب دو موج سینوسی از تکیه گاه های ثابت و آزاد را می بینید.



دوباره گوشزد می شود وب گاه www.falstad.com/ripple کلیه آزمایش های ممکن با تشتمت موج را دارد.

در این فیلم برهم کنش جبهه های موج دریا را می بیند.



خوب است اشاره شود قانون بازتاب عمومی برای امواج دایره ای و کروی نیز برقرار است. مثلاً اگر در تشتمت 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 تشتمت موج

آیا تاکنون بزواک صدای خود را شنیده اید؟ بزواک نوعی از بازتاب امواج مکانیکی است. برخی از جامدات نظیر خناس از همین ویژگی برای باطن مسر خود یا طعمه استفاده می کنند (شکل ۳-۱۳). امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) نیز بازمی تابند. 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. تشتمت نیز نوع دیگری از برهم کنش امواج با محیط است.



شکل ۳-۱۳: خناس برای باطن طعمه از بزواک موج صوتی خود استفاده می کند. شکل ۳-۱۴: یک کبک در حال پرواز، امواج صوتی خود را از آب بازتاب می دهد.

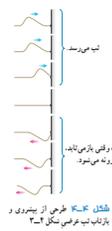


شکل ۳-۱۵: جهت تغییر انتهای عمودی در یک تپ بازتابیده شده است. جهت تغییر در یک تپ بازتابیده شده است.

تشتمت وقتی رخ می دهد که جهت پیشروی موج در ورود به یک محیط جدید تغییر کند. وقتی یک مایه را از بالای یک مایه می بیند، آن را در مکان واقعی خود مشاهده نمی کند، بلکه مکانی ظاهری بر از تشتمت نور را ادراک می کند (شکل ۳-۱۳). همان طور که خواهیم دید، تشتمت برای امواج مکانیکی نیز رخ می دهد. براین نیز نوع دیگری از برهم کنش امواج با محیط است. امواج به تنها با محیط بلکه با یکدیگر نیز برهم کنش می کنند. تاخیر نوعی از برهم کنش امواج با یکدیگر است. در این فصل، بازتاب، تشتمت، پراش و تاخیر را به عنوان برهم کنش های امواج بررسی می کنیم.

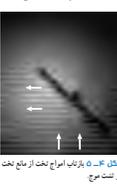
۳-۴ بازتاب موج

تولید صدا در آلات موسیقی، بزواک صداها، دیدن ماه، دیدن صفحه آبن کتاب، گرم شدن مواد غذایی در اجاق های خورشیدی، جمع شدن امواج رادیویی در کانون آنتن های شغالی و ... مثال هایی از کاربرد بازتاب امواج در زندگی هستند. در این بخش، تشتمت بازتاب امواج مکانیکی و سپس بازتاب امواج الکترومغناطیسی را بررسی می کنیم. بازتاب امواج مکانیکی: اگر تپ را در یک تپ (یا یک ریسمان) کشیده بلند به یک سر آن در تکیه گاهی ثابت بسته شده روانه کنیم، وقتی تپ به تکیه گاه (مرز) می رسد تپری به آن وارد می کند و طبق قانون سوم نیوتون، تکیه گاه نیز تپری با اندازه برابر و در جهت مخالف بر تپ وارد می آورد. این تپ در محل تکیه گاه، تپ در فتر ایجاد می کند که روی فتر در جهت مخالف تپ تابیده حرکت می کند (شکل ۳-۱۴). شکل ۳-۱۴: طرحی واضح تر از تابش و بازتابش چنین تپی را نشان می دهد. چنین بازتابی را بازتاب در یک بعد می گویند.



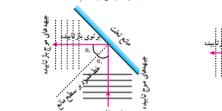
شکل ۳-۱۴: طرحی از پیشروی و بازتاب تپ بر روی شکل ۳-۱۵: تپ می رسد. تپ بر روی تپ می رسد.

شکل ۳-۱۶: برهم کنش امواج



به خاطر داریم وقتی تپه تختی را بر سطح آب تشتمت موج به نوسان درمی آوریم، امواج تختی بر سطح آب تشتمل می کند. اکنون اگر بر سر راه این امواج مایه های قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این مایه بازتاب می یابند. به همین بازتاب، بازتاب در دو بعد می گویند. ساده ترین شکل یک مایه تخت است. در حضور این نوع مایه، امواج بازتابیده نیز تشتمل اند (شکل ۳-۱۵). شکل ۳-۱۵: 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 مایه پی ببریم. طرح معادن دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از نوار پرتویی است. یک پرتو یکنان مستقیم عبور بر جبهه های موج است که جهت انتشار موج از نشان می دهد. بدین ترتیب توان نوار پرتویی شکل ۳-۱۶ را در حضور جبهه های موج به صورت شکل ۳-۱۶ رسم کرد. زاویه بین خط عبور و سطح مایه و پرتوی تابیده (فرودی) را زاویه تابش می نامند و با θ نشان می دهند. زاویه بین خط عبور و سطح مایه و پرتوی بازتابیده را زاویه بازتابش می نامند و با θ_r نشان می دهند. از آزمایش های نظیر آنچه در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است، ثابت می شود که برای هر وضعت مایه و همه امواج دیگر موج، مانند امواج دایره ای یا کروی نیز، همواره زاویه بازتابش برابر با زاویه تابش است حتی: $\theta_r = \theta$ 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 ۳-۲ به تحقیق این امر می پردازیم.



شکل ۳-۱۶: طرحی از جبهه های موج تابیده نظیر نوار پرتویی. شکل ۳-۱۷: نمودار پرتویی همواره با جبهه های موج برای نوار پرتویی بازتابیده نظیر سطح صاف.

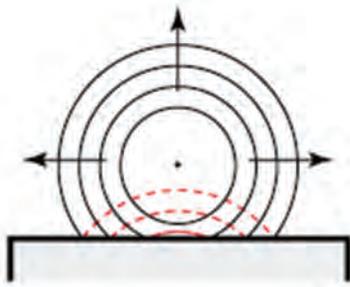
۳-۲ فعالیت



نمایش از آسباب آرمایش بازتاب صوت

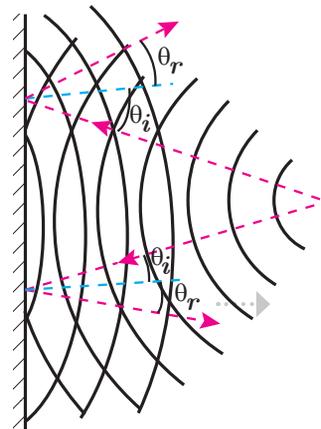
دو جبهه که در شکل مایه به یکدیگر برخورد کرده اند، مثل این اثر را در بحث رانش امواج می بینید. شکل ۳-۲: مرزهای Reflection و Refraction و همچنین بازتاب است.

و شکل ب طرحی از آن را نشان می‌دهد. آزمایش‌هایی نظیر آنچه که در شکل الف نشان داده شده است ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، 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.



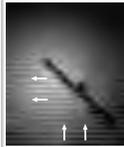
شکل ب) طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط توپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین) و ترکیب آنها در جلوی مانع.

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.



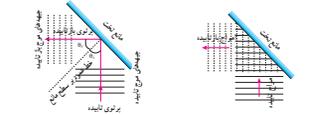
شکل پ) قانون بازتاب در هر نقطه سطح مانع بازتاب‌دهنده برقرار است.

شکل ۳۴ برهم کنش های موج



شکل ۳۵ بازتاب امواج تحت اثر منع تحت درخت موج

به خاطر داریم وقتی تغه تختی را بر سطح آب منتقل می‌کنیم، امواج تختی بر سطح آب تشکیل می‌دهند. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این مانع بازتاب می‌دهند. به چنین بازتابی، بازتاب در دو بعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل شکل یک مانع، مایه تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۳۴-۱). شکل ۳۴-۲ طرحی از چنین بازتابی را نشان می‌دهد. با استفاده از جبهه‌های موج می‌توانیم به‌طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع پی ببریم. طرح معادل دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از نودار بر روی است. یک پرتو، یکگانه مستقیم عمود بر جبهه‌های موج است که جهت انتشار موج را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نودار بر روی شکل ۳۴-۲ را در حضور جبهه‌های موج به صورت شکل ۳۴-۳ رسم کرد. زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (افزودی) را زاویه تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند. و زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را زاویه بازتابش می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند. آزمایش‌هایی نظیر آنچه در شکل ۳۴-۳ 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.



شکل ۳۴-۳ طرحی از جبهه‌های موج تابیده (عطف) شکل ۳۴-۳ نودار بر روی صفحه مانع با جبهه‌های موج بازتابیده (عطف) شکل ۳۴-۳ نودار بر روی صفحه مانع با جبهه‌های موج بازتابیده (عطف) شکل ۳۴-۳ نودار بر روی صفحه مانع با جبهه‌های موج بازتابیده (عطف)



با اسباب نشان داده شده در شکل روبرو، 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.

شکل ۳۴-۴ اسباب از اسباب از مانع بازتاب صوت

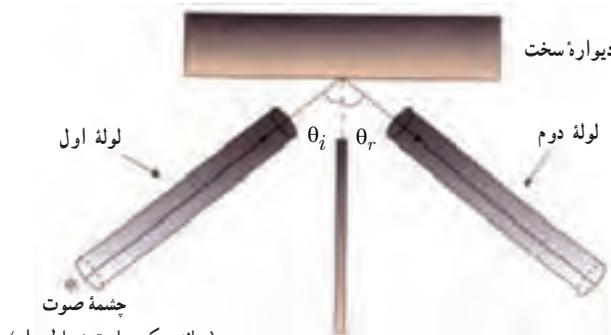
۱- توجه کنید که خط عمود مانع در وسطه اسباب قرار دارد. دلیل این الزام را در بحث بران امواج می‌بینیم.

۲- اسباب را که incident به خط تابش است.

۳- اسباب را که reflection به خط تابش است.

پاسخ فعالیت ۱-۴

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.



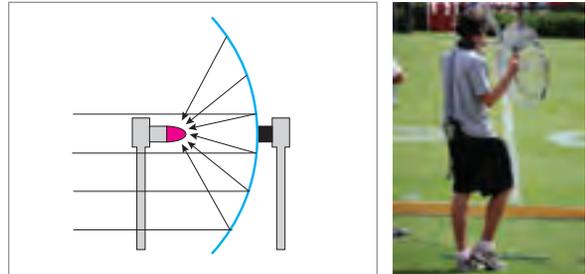
وقتی زاویه تابش θ_i با زاویه بازتابش θ_r برابر باشد، گوش صدای بازتابیده را با بیشترین بلندی دریافت می‌کند.

مانع چوبی برای جلوگیری از انتشار مستقیم صدا به سمت گوش

چشمه صوت (مانند یک ساعت شیشه‌دار)

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 پرنندگان دوردست، و صداهای میدین 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.

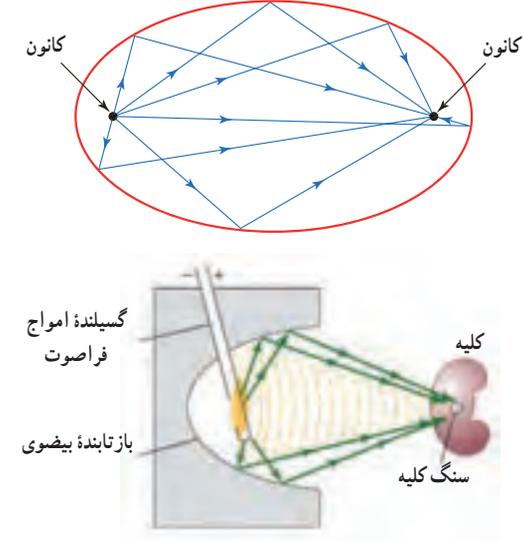


نکات ۲-۴
درباره میکروفون سهموی که از آن برای ثبت صداهای ضعیف و دستگاه لیتوتریپسی که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود تحقیق کنید.

پژواک: در برابر دیواره یا صفحه‌ای پهنی 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 ۱/۸ ثانیه، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

شوری و کاربرد مکان بومی پژواکی
مکان‌هایی پژواکی روشنی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند. مکان‌هایی پژواکی به همراه اثر دوبلر که در فصل پیش آموختیم، در تعیین مکان اجسام 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 آماز گری تندی نبارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود. خفاش، قوزلی از امواج فراصوتی را گسیل می‌کند که این بسته به نوع خفاش از دهان یا سوراخ‌های بینی آن گسیل می‌شود. این امواج از انبساطی که در مسیر خفاش قرار دارند بازتاب می‌یابند و بین ترتیب خفاش را از انبساطی 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 دوبلر را در موج بازتابنده ادراک می‌کند و بین بسته می‌تواند سرعت خود یا شیه متحرک را تعیین کند. خفاش‌ها از این ویژگی برای شناسایی 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.

۱. Lithotripsy ۲. Echo ۳. 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 :

$$L = \frac{1}{2} vt = \frac{1}{2} (340 \text{ m/s})(1/8 \text{ s}) = 21.25 \text{ m}$$

فصل ۴ 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 صدای تندی صوت در هوا را 34 ms در نظر بگیرید.

مثال ۱-۳

والی تشریحی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکانیابی می کند. بنامه 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 مایی که در فاصله 100 m از آن قرار گرفته، جقدر است؟

پاسخ : (الف) با استفاده از رابطه $v = f\lambda$ 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 بر این خواهید 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 با بزرگتر را می تواند تشخیص دهد.

ب) با زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و مایع برابر است با :

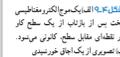
$$t = \frac{2x}{v} = \frac{2 \times 100 \text{ m}}{1520 \text{ m/s}} = 0.132 \text{ s}$$



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 تابیده 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 بنشایی و با امواج فرسوخ برای گرم کردن آب با مواد غذایی در اجاق های خورشیدی (شکل ۹-۵ ب) استفاده می شود.

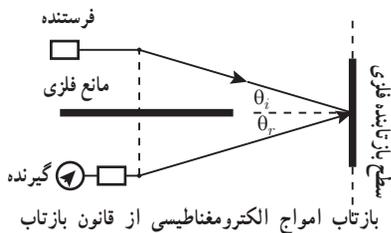


۹-۴ الف تاب امواج الکترومغناطیسی : از امواج الکترومغناطیسی نیز می توان برای مکانیابی بزرگی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید.



۹-۵ ب تاب امواج الکترومغناطیسی : تابش امواج الکترومغناطیسی تحت تاب از یک سطح کار در فضای مقابل سطح کانونی می شود. این تصویر از یک اجاق خورشیدی

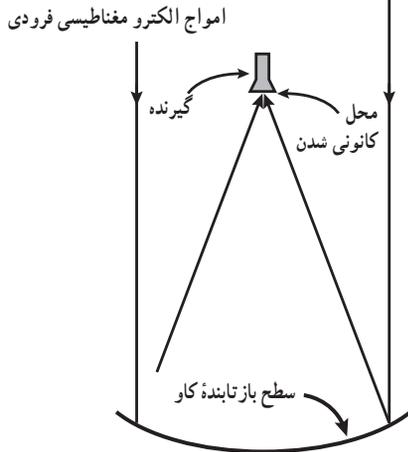
توجه کنید که بازتاب امواج الکترومغناطیسی را می توانید به عنوان نمونه ای از بازتاب در سه بعد مطرح کنید. همچنین چون این مبحث را عمدتاً برای نور مطرح می کنند خوب است به اسباب های آزمایشگاهی ای که قانون بازتاب عمومی را بر فرض برای امواج رادیویی بررسی کرده اند نیز اشاره کنید تا دانش آموزان صرفاً این قانون را برای نور نیندازند. 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 شدیدیتری را دریافت و آشکار می کند و به این ترتیب قانون بازتاب عمومی برای امواج رادیویی تأیید می شود.



بازتاب امواج الکترومغناطیسی از قانون بازتاب عمومی پیروی می کند، به طوری که $\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_r$ است.

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.



مسئله ۳۴: برهم‌کنش امواج موج

تمرین ۱-۴
کترین فاصله بین شما و یک دیوار بلند چقدر باشد تا یزادک صدای خود را از صدای اصلی تندی دهد؟ تندی صوت در هوا را 340 m/s در نظر بگیرید.

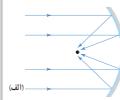
مسئله ۱-۳
والی شریکی از جابجاری است که با استفاده از یزادک امواج فراصوتی، مکانیابی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی‌ای که این وال تولید می‌کند حدود 100 kHz است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۱-۳ حدود 1520 m/s است، الف) طول موج این صوت و بسا زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط آب دریا برای ماهی که در فاصله 100 m از آن قرار گرفته، چقدر است؟
ب) 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 پراش 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) بسا زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و ماهی برابر است با:

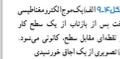
$$t = \frac{2d}{v} = \frac{2 \times 100 \text{ m}}{1520 \text{ m/s}} = 0.132 \text{ s}$$



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 کار 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.



فعالیت ۳-۴
واحد دوپلری: از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکانیابی یزادکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید.



شکل ۳-۴ الف) بازتاب امواج الکترومغناطیسی تخت تابش از یک سطح کار
ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

پاسخ فعالیت ۳-۴

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 گسیل شده 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 $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$ است. 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 گسیل شده و امتداد حرکت خودرو است. یک مثال نوعی برای تابش مستقیم ($\theta = 0^\circ$) را در نظر می‌گیریم. یک پلیس با دریافت بازتاب امواج گسیل شده با بسامد $1.07 \times 10^{14} \text{ Hz}$ به سمت یک خودرو به تغییر بسامدی برابر $4/7 \times 10^6 \text{ Hz}$ می‌رسد. آنگاه با استفاده از رابطه بالا به $v = 150 \text{ km/h}$ برای تندی خودرو می‌رسیم.

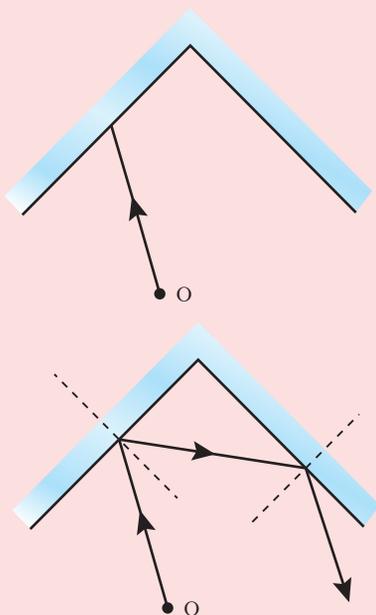
پاسخ فعالیت ۳-۹ کتاب تجربی

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 باریکه 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 است $\Delta f = \frac{v}{v_s} f_0 - \left(\frac{-v}{v_s}\right) f_0 = 2 \frac{v}{v_s} f_0$ است که در آن v_s تندی صوت است. برای تابش زاویه‌دار که در شکل نشان داده شده است

به $\Delta f \approx 2f_s \frac{v \cos \theta}{v_s}$ می رسمیم. آنگاه با دانستن تغییر بسامد ناشی از بازتاب و زاویه تابش امواج فراصوت می توان 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 می رسند که از آن تندی شارش خون حدود 3 cm/s حاصل می شود. خوب است بدانید تندی شارش خون به سطح مقطع رگ بستگی دارد و مثلاً در آئورت حدود 4 cm/s ، و در مویرگ ها حدود 3 cm/s است. البته در هنگام دویدن این عددها افزایش می یابد.

تمرین های پیشنهادی

۱ در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه ها 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 می شنوید. این پژواک مربوط به چندمین بازتاب است؟
پاسخ: به ازای یک رفت و برگشت، زمان پیمودن صوت $T/2$ می شود. بنابراین به ازای n رفت و برگشت، زمان برابر $T/(n+1)$ است. آنگاه برای بازتاب های چندگانه داریم:

$$d = vt = (343 \text{ m/s}) \left(\frac{1/5 \text{ s}}{n+1} \right)$$

و در نتیجه

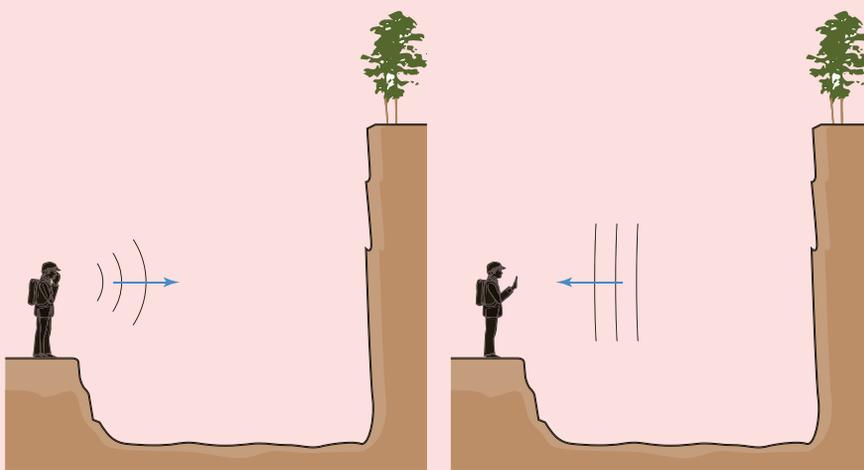
$$n = \frac{(343 \text{ m/s})(1/5 \text{ s})}{25/7 \text{ m}} - 1 = 19$$

یعنی پس از ۱۹ رفت و برگشت، شخص آخرین پژواک را دریافت کرده است.

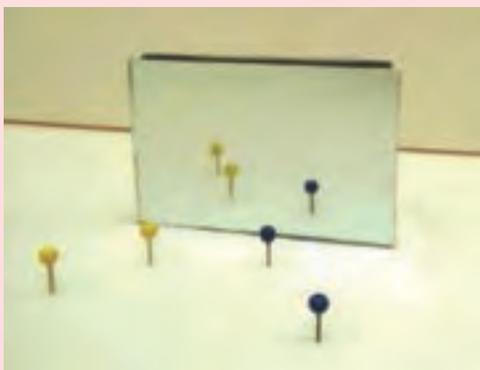
فعالیت‌های پیشنهادی

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 3 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.

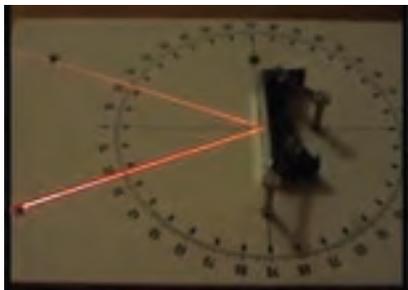


۲) قانون بازتاب را تحقیق کنید.



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 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 بتاباند، 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.



فیزيك ۳۱

همان طور که قبلاً دیدیم نور مرئی بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است. بنابراین نور مرئی نیز از همان قانون بازتاب عمومی امواج عبوری می کند؛ یعنی زاویه تابش و بازتابش در هر بازتابی با هم برابرند (شکل ۱-۳). افزون بر این، برای نور مرئی نیز همچون سایر امواج، پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده، در هر بازتابش در یک صفحه واقع اند (شکل ۱-۳). (ب)

زاویه تابش زاویه تابش
خط عمود

شکل ۱-۳ الف) در هر بازتابش زاویه تابش و زاویه بازتابش با هم برابرند. ب) پرتوی تابش، پرتوی بازتابش و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع اند.

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 بسنی و یکنواختی های سطح بازتابنده، و در تمام جهات پراکنده می شوند (شکل ۱-۳). به دلیل این بازتاب است که شما این صفحه کاغذ، دیوار، دستان، پوست خود، و... را می بینید. در بازتاب آینه ای از یک آینه تخت، بازتابش یک دسته پرتوی موازی را فقط در یک جهت می توانید ببینید. ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته پرتو را می توانید در جهت های 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 طول موج نور هستند، با توجه به اینکه طول موج نور مرئی در حدود ۰.۵ μm است. چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می شود. در مقابل، ناهمواری های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچکتر از ۰.۵ μm است و بنابراین برای نور مرئی سطحی هموار محسوب می شوند.

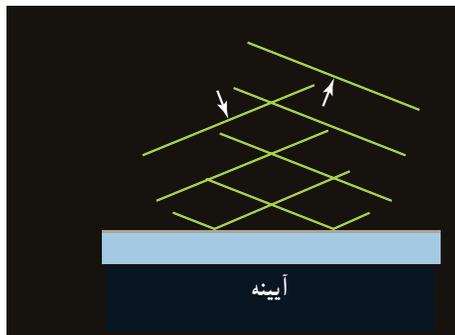
۲-۴ شکست موج

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... مثل های رایجی از شکست شدن امواج نور 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

شکل ۱-۳ الف) طیف از بازتاب پخشنده نور از سطح هموار زاویه تابش و زاویه بازتابش برابرند. ب) پرتوی تابش، پرتوی بازتابش و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع اند.

۱۴

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.



در اینجا خوب است با استفاده از دانشی که دانش آموزان از فصل پیش آموخته‌اند این مبحث را بیشتر باز کنید و در ضمن به توصیف وضعیتی که تپ از بخش ضخیم به بخش نازک می‌رسد نیز بپردازید. در مورد اول اشاره کنید که چون چگالی‌های خطی جرم بخش‌های نازک و ضخیم متفاوت ولی کشش در این دو بخش یکسان است، در قسمت ضخیم که چگالی خطی جرم بیشتر است، تندی کمتر و در قسمت نازک که چگالی خطی جرم کمتر است، تندی بیشتر است. هرچه بخش دوم ضخیم‌تر باشد، انرژی کمتری عبور می‌کند و بنابراین انرژی بیشتری بازمی‌تابد. در حالت حدی که بخش دوم مثلاً دیواره یا تکیه‌گاه صلبی باشد، تقریباً همه انرژی فرودی بازمی‌تابد. بنابراین در توضیح مورد دوم که تپ از بخش ضخیم به بخش نازک وارد می‌شود، انرژی موج عبوری بیشتر است، ولی موج بازتابیده وارون نمی‌شود.

فصل ۱۴: برهم‌کنش‌های موج

این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۱۴-۳). بخشی از این تپ بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۱۴-۴). برای یک موج سینوسی ساده این دو موج هم‌سازمانند موج فرودی است که توسط چشمه موج خمین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، با رابطه $v = \lambda f$ ، طول موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

پرسش ۱۴-۴
اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طباب به قسمت نازک آن وارد شود، ساده، تندی، و طول موج عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟

در حالت‌های دو پایه‌بندی 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 **تنگست** 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 تنگست در نشت موج استفاده کنیم؛ یعنی با تغییر دادن عمق آب در بخشی از نشت 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 تنگست 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 سطحی تنگ ۲-۱۳ 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 فهمیدن این موضوع، مثال یک اسباب‌بازی چرخ‌دار که با عبور از تک صاف افقی وارد فالجچه‌ای می‌شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب‌بازی به فالجچه، تندی آن کم می‌شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می‌کند (شکل ۱۴-۴).

شکل ۱۴-۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۰: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۱: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۲: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۵: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۷: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۰: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۱: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۲: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۵: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۷: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۲۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۰: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۱: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۲: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۵: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۷: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۳۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۰: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۱: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۲: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۵: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۷: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۴۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۰: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۱: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۲: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۵: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۷: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۵۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۰: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۱: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۲: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۵: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۷: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۶۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۰: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۱: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۲: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۵: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۷: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۷۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۰: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۱: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۲: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۵: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۷: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۸۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۹۰: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۹۱: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۹۲: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۹۳: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۹۴: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۹۵: برهم‌کنش‌های موج

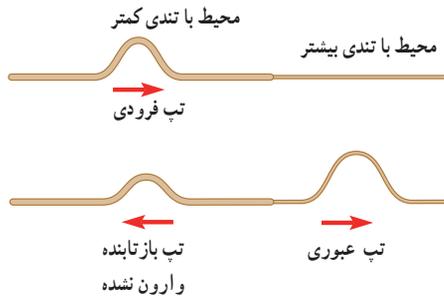
شکل ۱۴-۹۶: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۹۷: برهم‌کنش‌های موج

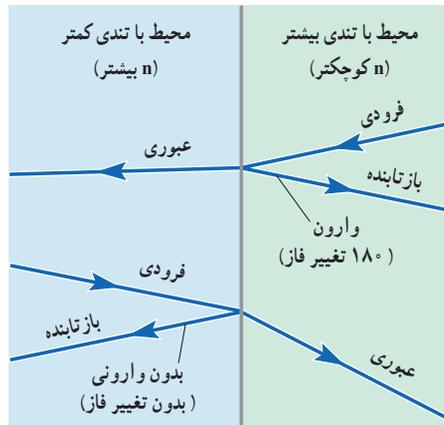
شکل ۱۴-۹۸: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۹۹: برهم‌کنش‌های موج

شکل ۱۴-۱۰۰: برهم‌کنش‌های موج



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.



پاسخ پرسش ۱-۴

وقتی موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب 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 طناب بیشتر است و بنا به رابطه $\lambda = v/f$ درمی 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.)

فصل ۳۴: برهم کنش های موج

این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می رسد (شکل ۱۲-۳). بخشی از این تپ بازمی تابد و بخشی دیگر عبور می کند (شکل ۱۲-۴). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط چشمه موج تعیین می شود. 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 ۱-۴

اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول موج موج عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می کند؟

در حالت های دو یا سه بعدی 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 عبور 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. نباید برای فهمیدن این موضوع، مثال یک اسباب بازی چرخ دار که با عبور از تک صاف اتاق وارد فالجچه ای می شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب بازی به فالجچه، تندی آن کم می شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می کند (شکل ۱۲-۴).

شکل ۱۲-۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۱: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۲: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۱: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۲: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۲۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۱: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۲: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۳۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۱: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۲: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۴۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۱: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۲: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۵۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۱: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۲: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۶۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۱: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۲: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۷۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۱: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۲: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۸۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۱: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۲: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۳: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۴: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۵: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۶: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۷: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۸: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۹۹: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

شکل ۱۲-۱۰۰: تپ در مرز دو بخش نازک و ضخیم

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:

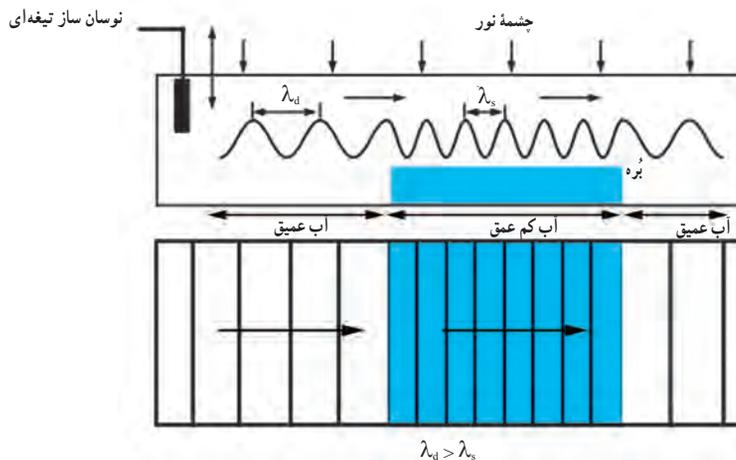
$$\frac{v_d}{10 \text{ cm}} = \frac{0.4 \cdot v_d}{\lambda_s}$$

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

$$v_d = (5 \text{ m/s}) (10 \text{ cm}) = 50 \text{ cm/s}$$

$$v_s = 0.4 \cdot v_d = 0.4 \cdot (50 \text{ cm/s}) = 20 \text{ cm/s}$$

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.



تمرین ۲-۴

در یک تخت موج به کمک یک نوسان‌ساز تیغی که با بسامد 5 Hz کار می‌کند، امواجی تخت ایجاد می‌کنیم. بطوری که فاصله بین دو آزمودگی متوالی آن برابر با 10 cm می‌شود. اگر اکنون برای شیشه‌ای را در کف تخت قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیه کم‌عمق بالای آن شکست پیدا می‌کنند. اگر تندی امواج در ناحیه کم‌عمق، 0.4 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 ۱۵-۴ جبهه‌های موج تختی به‌طور مایل به مرز دو محیط می‌رسند و سپس شکست پیدا می‌کنند. از آنجا که جبهه‌های موج در مرز جابجایی دو محیط می‌شکنند، پرتوهای موج که همواره عمود بر جبهه‌های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می‌دهند. این پرتوها نیز در شکل ۱۵-۴ 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 ۱۵-۴، 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_1 و θ_2 رابطه زیر برقرار است که به آن **قانون شکست عمومی** می‌گویند.

(۱-۴) **قانون شکست عمومی**

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

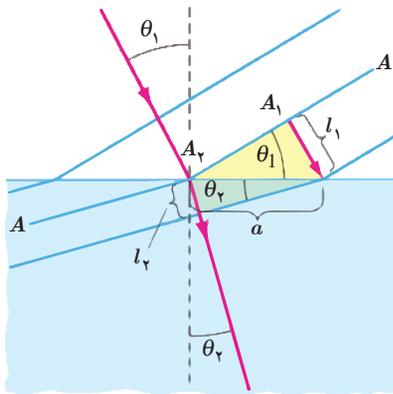
شکل ۱۵-۴: جبهه موجی با زاویه تابش θ_1 از محیط اول دراز وارد محیط دوم می‌شود و با زاویه θ_2 شکست پیدا می‌کند. شکل با فرض $v_2 < v_1$ رسم شده است.

شکل ۱۵-۴: در صورتی که موج از محیطی با تندی کمتر به محیطی با تندی بیشتر برود، زاویه شکست θ_2 بزرگتر از زاویه تابش θ_1 می‌شود.

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 می‌شود (شکل ۱۵-۴).

۱- نامشخص باین ۳ برآورد شده انگلیسی refraction 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 ۴-۲۵ 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 برهم قانون شکست عمومی به دست می آید.

فصل چهارم ۲۱۱

در یک تخت موج به کمک یک نوسان ساز نغزهای که با بسامد 50 Hz کار می کند، امواجی تخت ایجاد می کنیم، به طوری که فاصله بین دو برآمدگی متوالی آن برابر با 1 cm می شود. اگر اکنون برای مشاهده این موج در کف تشت قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیه کوهی بالای θ_2 شکست پیدا می کنند. اگر تندی امواج در ناحیه کوهی، 0.4 برابر تندی در ناحیه عمیق باشد، طول موج امواج در ناحیه کوهی چقدر می شود؟

قانون شکست عمومی: در پدیده های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می پردازیم. فرض کنید سطحی 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 جایی دو محیط می شکستند، برتوهای موج که همواره عمود بر جبهه های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می دهند. این برتوها نیز در شکل ۱۵-۴ نشان داده شده اند. همان طور که دیدیم در یک نمودار برتویی، زاویه پرتوی فرودی با خط عمود بر مرز زاویه تابش می نامند و با θ_1 نشان می دهند، در حالی که زاویه پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز زاویه شکست می نامند و با θ_2 نشان می دهند. در شکل ۱۵-۴، θ_1 با θ_2 و θ_1 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 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 ۱۵-۴). 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).

۱-۶. نامش این پدیده را refraction بگویند. یعنی شکست است.

تمرین ۳-۴

در تمرین ۳-۳ با فرض اینکه زاویه تابش امواج برابر ۳۰° باشد، زاویه شکست چقدر می‌شود؟

شکست امواج الکترومغناطیسی: امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور مرئی) نیز با گذر از یک محیط به محیط دیگر که در آن تندی آنها متفاوت می‌شود، شکست پیدا می‌کنند. به جز گستره نور مرئی که بیشترین و معروفترین موارد شکست برای آنها مطرح می‌شود و به یادماندگار کاربردهای جالبی می‌آید، شکست امواج رادیویی نیز اهمیتی کاربردی در ارتباطات رادیویی دارد.

پرسش ۳-۴

شکل زیر هر یک بر تری موج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که با عبور از محیط اولیه n_1 از طریق محیط‌های n_2 و n_3 بازمی‌گردد. این محیط‌ها را بر حسب تندی موج در آنها از بیشترین تا کمترین مرتب کنید.

وقتی یک بر تری نور از محیطی شفاف وارد محیط شفاف دیگری شود، بخشی از نور باز می‌تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم می‌شود. همان‌طور که انتظار داریم آن بخش نور که وارد محیط دوم می‌شود، به دلیل آنکه تندی آن در محیط دوم تغییر می‌کند، شکسته می‌شود (شکل ۳-۲). به همین دلیل برای هر محیط ضریب شکست تعریف می‌کنند که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3-2)$$

(معرف ضریب شکست) تندی نور در خلأ c تندی نور در یک محیط v

شکل ۳-۲: هر یک بر تری نور از محیطی شفاف به محیط شفاف دیگر بخش می‌تابد و از نور باز می‌تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم می‌شود.

پاسخ تمرین ۳-۴

در اینجا فرض شده است رابطه $v_s = v_d \sin 40^\circ$ همچنان برقرار است. بنابراین با استفاده از قانون شکست عمومی داریم:

$$\frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} = \frac{v_s}{v_d} = \frac{v_d \sin 40^\circ}{v_d} = \sin 40^\circ$$

که در آن $\sin \theta_i = 30^\circ$ است. بنابراین داریم:

$$\sin \theta_r = (\sin 40^\circ) (\sin 30^\circ) = 0.20$$

و در نتیجه $\theta_r = 11.53^\circ \approx 12^\circ$ می‌شود.

در اینجا خوب است با نشان دادن تصاویری مانند شکل زیر تأکید کنید که آنچه در یون‌سپهر رخ می‌دهد یک بازتاب «تیز» نیست و توضیح این بازتاب مانند چیزی است که در پدیده سراب خواهید دید.



پاسخ پرسش ۲-۴

باید بر خط جدایی محیط‌ها، خطوط عمود بر سطح را رسم کنیم و بعد به تحلیل این پرسش بپردازیم. اگر توجه کنید درمی‌یابید در محیط b پرتو از خط عمود دور می‌شود. این یعنی اینکه پرتو از محیطی که در آن تندی نور کمتر است وارد محیطی شده است که در آن تندی نور بیشتر است. ولی پس از آن، در محیط c ، پرتو به خط عمود نزدیک می‌شود. بنابراین تندی نور در محیط c کمتر از تندی نور در محیط b است. و به همین ترتیب، تندی نور در محیط a کمتر از تندی نور در محیط c است: $v_b > v_c > v_a$. به عبارتی، همان‌طور که بعداً خواهیم دید پرتو از محیطی با ضریب شکست بالا (محیط a) وارد محیطی با ضریب شکست کمتر (محیط b) و سپس وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر از b (محیط c) و سرانجام وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر از آن (که دوباره همان a است) می‌شود. پس ترتیب ضریب شکست‌های محیط از کمترین به بیشترین، به ترتیب n_b ، n_c ، n_a است. کمترین ضریب شکست مربوط به محیط b و بیشترین ضریب شکست مربوط به محیط a است.

در این فیلم، نمایشی از شکست نور در آب را می بینید.



در این فیلم تأثیر تفاوت ضریب شکست را در تصویر ایجاد شده می بینید.



توجه کنید ضریب شکست به طول موج بستگی دارد و در این کتاب ضریب های شکست برای طول موج زرد سدیم (589 nm) تعریف شده است.

نویسندگان: ۳-۴

۳-۳ ضریب شکست چند ماده مختلف*

ماده	ضریب شکست
خلاء	۱ دقیقاً
هوا (شرایط معیاره)	۱.۰۰۰۲۹
شیشه	۱.۵
آب (۲۰°C)	۱.۳۳
اسون	۱.۳۴
اتانول	۱.۳۶
محلول آینه‌د (۲۰°C)	۱.۳۸
محلول آینه‌د (۸۰°C)	۱.۳۹
پلاستیک پکسی گلاس	۱.۵۱
پترو	۱.۵۰
نیشه خالص	۱.۵۲
سدیم کلرید اشک خوراکی	۱.۵۴
کوارتز (SiO ₂)	۱.۵۴
الماس	۲.۴۲

* برای طول موج 589nm (نور زرد سدیم)

که در آن، n عددی در خلاء یا مقدار دقیق $258 \text{ m} \times 10^{-9} \text{ m}$ است که در محاسبات آن را برابر با $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ در نظر می گیریم؛ چون عددی در خلاء بیشترین عددی ممکن است. ضریب شکست همواره بزرگتر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلاء است). جدول ۳-۳ ضریب شکست برای چند ماده مختلف را به دست می دهد. بنابراین برای دو محیط خاص ۱ و ۲، ضریب شکست ها به ترتیب $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ است که n_1 و n_2 عددی نرود در آن دو محیط است. حال اگر پرتوی نوری از محیط ۱ با زاویه تابش θ_1 وارد محیط ۲ شود با زاویه θ_2 شکست پیدا کند (شکل ۳-۲). از قانون عمومی رابطه (۳-۲) در می یابیم:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

و یا

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3-2)$$

این رابطه را به اختصار فریک دان هلندی، وایبره اسنل (۱۶۶۶-۱۷۸۸ م.) که آن را به طور تجربی کشف کرد، **قانون شکست اسنل** می نامند.

پرتوی تابنده خط عمود پرتوی فرودی

۳-۴ مثال

پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیفه نیشه ای منوازی سطحی، با زاویه تابش 60° فرود می آید. الف) زاویه شکست (θ_2) پرتو در نیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_3) پرتو از نیشه چقدر است؟

پاسخ: برای ورود پرتوی نور از هوا به نیشه قانون شکست اسنل را به کار می بریم. با توجه به جدول ۳-۳ ضریب شکست هوا $n_1 = 1.00$ و ضریب شکست نیشه $n_2 = 1.52$ است.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (1.00)(\sin 60^\circ) = (1.52)(\sin \theta_2)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{1.00 \sin 60^\circ}{1.52} \Rightarrow \theta_2 = 34.7^\circ$$

و برای خروج پرتوی نور از نیشه نیز دوباره قانون اسنل را به کار می بریم. توجه کنید که زاویه تابش در اینجا برابر زاویه شکست در نیشه است، یعنی $\theta_2 = \theta_3$.

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_3 \Rightarrow (1.52)(\sin 34.7^\circ) = (1.00)(\sin \theta_3)$$

$$\sin \theta_3 = \frac{1.52 \sin 34.7^\circ}{1.00} \Rightarrow \theta_3 = 66.6^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می توانستیم مقدار θ_3 را بیابیم.

در این فیلم تحلیلی از قانون اسنل را می بینید.



در این فیلم تأثیر تفاوت ضریب شکست را در تصویر ایجاد شده می بینید.



پاسخ پرسش ۳-۴

در هر سه شکل باید خط عمود بر سطح جدایی را رسم و با بررسی چگونگی انحراف پرتوی شکسته، آن را تحلیل کرد. در شکل (الف) پرتوی نور از محیطی با ضریب شکست کمتر وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر شده است. وقتی پرتو از محیط با ضریب شکست کمتر وارد محیطی با ضریب شکست بیشتر می شود، پرتو باید به خط عمود نزدیک تر شود که این در شکل (الف) برقرار است و بنابراین شکل (الف) از لحاظ فیزیکی ممکن است. اما شکل های (ب) و (پ) از لحاظ فیزیکی ناممکن هستند. زیرا در شکل (ب) اصلاً پرتوی شکسته در سویی نادرست رسم شده است و در شکل (پ) پرتو از خط عمود دور شده است که همان طور که

نویسندگان: ۳-۴

۳-۲ برش

کدام یک از سه شکل زیر شکست را نشان می دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

۳-۳ مثال

الف) زاویه شکست θ_2 پرتو در نیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_3) پرتو از نیشه چقدر است؟

پاسخ: برای ورود پرتوی نور از هوا به نیشه قانون شکست اسنل را به کار می بریم. با توجه به جدول ۳-۳ ضریب شکست هوا $n_1 = 1.00$ و ضریب شکست نیشه $n_2 = 1.52$ است.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (1.00)(\sin 60^\circ) = (1.52)(\sin \theta_2)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{1.00 \sin 60^\circ}{1.52} \Rightarrow \theta_2 = 34.7^\circ$$

و برای خروج پرتوی نور از نیشه نیز دوباره قانون اسنل را به کار می بریم. توجه کنید که زاویه تابش در اینجا برابر زاویه شکست در نیشه است، یعنی $\theta_2 = \theta_3$.

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_3 \Rightarrow (1.52)(\sin 34.7^\circ) = (1.00)(\sin \theta_3)$$

$$\sin \theta_3 = \frac{1.52 \sin 34.7^\circ}{1.00} \Rightarrow \theta_3 = 66.6^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می توانستیم مقدار θ_3 را بیابیم.

۳-۴ پرسش

کدام یک از سه شکل زیر شکست را نشان می دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

۳-۳ مثال

الف) زاویه شکست θ_2 پرتو در نیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_3) پرتو از نیشه چقدر است؟

پاسخ: برای ورود پرتوی نور از هوا به نیشه قانون شکست اسنل را به کار می بریم. با توجه به جدول ۳-۳ ضریب شکست هوا $n_1 = 1.00$ و ضریب شکست نیشه $n_2 = 1.52$ است.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (1.00)(\sin 60^\circ) = (1.52)(\sin \theta_2)$$

$$\sin \theta_2 = \frac{1.00 \sin 60^\circ}{1.52} \Rightarrow \theta_2 = 34.7^\circ$$

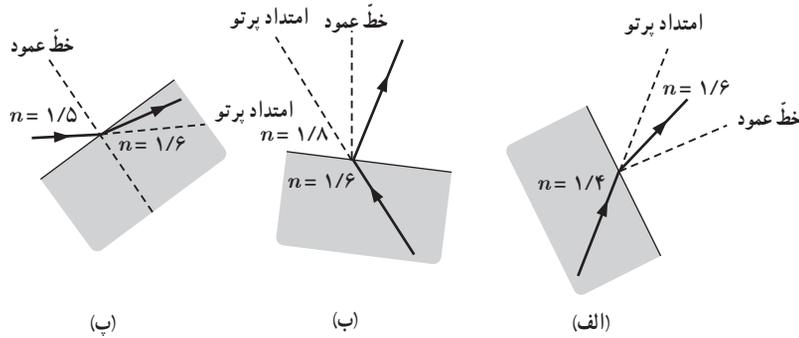
و برای خروج پرتوی نور از نیشه نیز دوباره قانون اسنل را به کار می بریم. توجه کنید که زاویه تابش در اینجا برابر زاویه شکست در نیشه است، یعنی $\theta_2 = \theta_3$.

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_3 \Rightarrow (1.52)(\sin 34.7^\circ) = (1.00)(\sin \theta_3)$$

$$\sin \theta_3 = \frac{1.52 \sin 34.7^\circ}{1.00} \Rightarrow \theta_3 = 66.6^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می توانستیم مقدار θ_3 را بیابیم.

گفتیم در عبور پرتو از محیطی با ضریب شکست کمتر به محیطی با ضریب شکست بیشتر، پرتو باید به خط عمود نزدیک تر شود.



پاسخ فعالیت ۴-۴

یک تیغه متوازی السطوح را در نظر بگیرید و آن را روی کاغذ سفیدی قرار دهید. باریکه نوری را به وجهی از تیغه بتابانید به طوری که از وجه مقابل آن خارج شود. محل تیغه بر کاغذ را با رسم اضلاع آن بر روی کاغذ مشخص کنید. همچنین مسیر باریکه فرودی و مسیر باریکه‌های فرودی و خروجی می‌توانید مطابق شکل الف کاغذ سفید را روی قطعه یونولیتی قرار دهید و مسیر باریکه‌ها را با فروردن سوزن‌هایی در آن مشخص کنید. اکنون تیغه را بردارید و با استفاده از یک خط‌کش، مسیر باریکه نور در درون تیغه را رسم کنید. بر روی مسیر باریکه‌های نور، پیکانه‌هایی رسم کنید تا جهت پرتوها مشخص شود. با استفاده از یک نقاله، خطوط عمود بر وجه‌های تیغه در محل ورود و خروج باریکه‌های نور را رسم کنید و زاویه‌های بین باریکه‌ها و خطوط عمود را اندازه بگیرید. شکل ب، طرحی از چنین ترسیمی را نشان می‌دهد. اکنون می‌توانیم با استفاده از قانون اسنل برای ورود باریکه از هوا به تیغه، ضریب شکست تیغه

را به دست آوریم و با اینکه ضریب شکست را با استفاده از قانون اسنل برای خروج باریکه از تیغه به هوا بیابیم. بدیهی است که این دو مقدار نباید تفاوت چندانی داشته باشند. 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 عددی حاصل گزارش کنید.

فصل ۳۴ برهم‌کنش‌های موج

پرسش ۳-۴
کدام یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

فعالیت ۴-۴
آماده‌گیری ضریب شکست: با توجه به مثال ۳-۴، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغه متوازی السطوح شفاف را اندازه گرفت.

سراب: در روزهای گرم ممکن است در فاصله دوری از جاده یا دریا، آب را ببینید. این پدیده سراب یا سراب آبیگر می‌گویند و نه تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۳-۲۱).
در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، جگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می‌شود (شکل ۳-۲۲). در شکل ۳-۲۱ دیده‌سراب را می‌توان بر جبهه‌های موج نشان داد. برای توضیح این شکل، نخست جبهه‌های موجی را در نظر می‌گیریم که به طرف پایین می‌آیند. با این‌که این موج‌ها بیشتر بر روی زمین قرار می‌گیرند، آنها با ضریب شکست‌های کوچک‌تر و کوچک‌تری روبرو می‌شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می‌شوند (شکل ۳-۲۲ الف). وقتی پرتوها در نزدیکی سطح زمین تقریباً افقی می‌شوند، به سمت بالا خم می‌شوند. این خم شدن رو به بالا را می‌توان با استفاده از جبهه‌های موج توضیح داد. بخش پایینی هر جبهه موج در هوای گرمی که فرود دارد و بنابراین کمتر از بخش بالایی جبهه موج حرکت می‌کند. این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه‌های موج، موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود. زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۳-۲۲ ب). وقتی پرتوها رو به بالا می‌روند، به خشنودی رو به بالای خود ادامه می‌دهند. زیرا اکنون تمام محیط‌هایی با ضریب شکست‌های بزرگ و بزرگ‌تر مواجه می‌شوند و بنابراین در هر مرحله با نزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۳-۲۲ ج). اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می‌آید که منشأ این نور از افق دور رو به عقب پرتوهای است که به چشم ما رسیده‌اند و همان‌طور که در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.

شکل ۳-۲۱: تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده

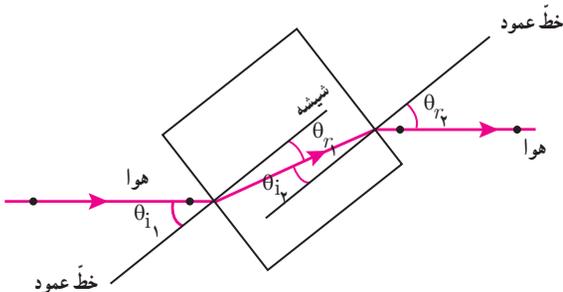
شکل ۳-۲۲: نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

شکل ۳-۲۳: برای گرمی در نزدیکی سطح زمین

شکل ۳-۲۴: نمایش پدیده سراب

شکل ۳-۲۵: پرتوهای نور در جبهه‌های موج بخار که می‌تواند گمان می‌دهد که این پرتوها از یک تصویر آینه‌اند

۹۹



ب) در نمودار پرتویی آزمایش توجه کنید θ_{i_2} زاویه تابش و θ_{r_1} زاویه شکست و $\theta_{r_1} = \theta_{i_1}$ و $\theta_{t_2} = \theta_{i_2}$ است. بنابراین پرتوهای فرودی و خروجی باهم موازی اند

الف) تصویری از اسباب آزمایش اندازه گیری ضریب شکست

فصل ۳۴ برهم کنش های موج

توضیح ۳-۱
 کدام یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟
 (الف) (ب) (ج)

توضیح ۳-۲
 آغازگیری ضریب شکست با توجه به مثال ۳-۲ آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک نغمة موازی السطح شفاف را اندازه گرفت.

در روزهای گرم هرهای سطح زمین نسبتاً راج است. از طرفی، جگالی هوا با افزایش دما کاهش می یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می شود (شکل ۳-۲). در شکل ۳-۱ پدیده سراب را مبنی بر 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 ۳-۲ الف). وقتی پرتوها در نزدیکی سطح زمین تقریباً افقی می شوند به سمت بالا خم می شوند. این خم شدن رو به بالا را می توان با استفاده از جبهه های موج توضیح داد. بخش پایین هر جبهه موج در هوای گرمی گرمتر قرار دارد و بنابراین کمی کمتر از بخش بالایی جبهه موج حرکت می کند. این تفاوت رفتار در 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 ۳-۲ ب). وقتی پرتوها رو به بالا می روند به خم شدن رو به بالای خود ادامه می دهند، زیرا اکنون تمام با محیط های 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 ۳-۲ ج). 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 همان طور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است این حس را ایجاد می کند که گویی از سطح زمین آمده است.

شکل ۳-۱ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

شکل ۳-۲ سراب و سطح گرم جاده

شکل ۳-۳ تصویر یک خودرو در سراب و سطح گرم جاده

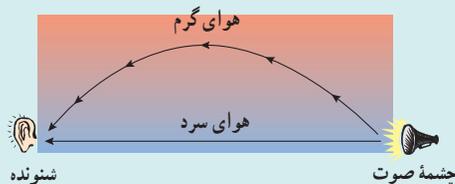
شکل ۳-۴ هوا گرمتر نزدیک سطح زمین

شکل ۳-۵ جبهه های موجی عبور از سراب به کمک جبهه های موج نوری که عمود شکل می یورند که این پرتوها از یک تصویر آسمانند

۹۹

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 حوض خمدگی 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.

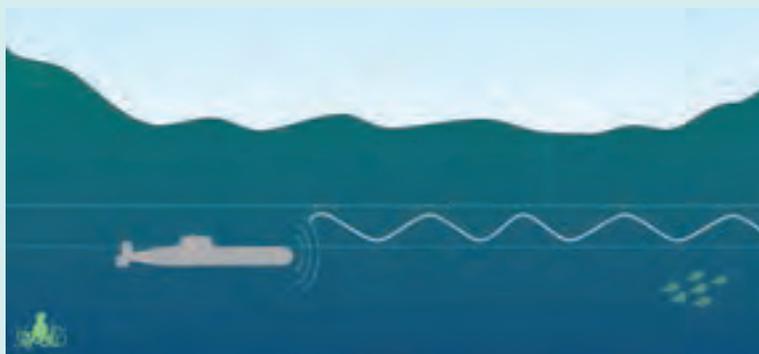


شکل ۳- چگونگی خم شدن جبهه های موج صوتی، وقتی هوای سطح زمین سردتر از هوای بالای آن است.

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:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

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.

شکل ۳۳-۱ پاشندگی نور: همان طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی پرتوی سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۳۳-۱ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیط به جز خلا به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی پرتوی شامل پرتوهای با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، **پاشندگی نور** می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط متناسب با طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۳۳-۲ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای نیترو معمولی نشان می‌دهد. با توجه به آن نمودار اگر عملاً دو پرتوی قرمز و آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد نیترو شوند پرتوی آبی بیشتر از پرتوی قرمز خم می‌شود.

شکل ۳۳-۲ وابستگی ضریب شکست از نور: اگر پرتوی نور سفید از هوا بر یک سطح نیترویی فرود آید بر اثر شکست نور، مؤلفه‌های سازنده پرتوی نور سفید هر کدام به میزان متفاوتی خم می‌شوند که البته این تفاوت چندان محسوس نیست. برای افزایش جدایی رنگ‌ها در پاشندگی نور، معمولاً از یک منشور یا سطح مقطع مثلثی استفاده می‌کنند. پاشندگی ناچیز در سطح اول، سپس با پاشندگی در سطح دوم افزایش می‌یابد و مؤلفه‌های رنگی نور سفید به‌طور محسوس از هم جدا می‌شوند (شکل ۳۳-۳ ب).

۴-۴ تمرین
شکل ۳۳-۳ پرتوی قرمز و آبی در یک منشور شیشه‌ای قرار می‌گیرد. زاویه تابش پرتوی قرمز و آبی را نشان می‌دهد که از هوا و با زاویه تابش 45° بر سطح عمودی از کوارتز می‌تابد. زاویه‌های شکست برای این دو پرتوی را محاسبه کنید. ضریب شکست تهرای قرمز و آبی در کوارتز به ترتیب واروند $n_1 = 1.459$ و $n_2 = 1.467$ است.

شکل ۳۳-۳ پاشندگی نور: همان طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی پرتوی سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۳۳-۱ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیط به جز خلا به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی پرتوی شامل پرتوهای با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط متناسب با طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۳۳-۲ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای نیترو معمولی نشان می‌دهد. با توجه به آن نمودار اگر عملاً دو پرتوی قرمز و آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد نیترو شوند پرتوی آبی بیشتر از پرتوی قرمز خم می‌شود.

شکل ۳۳-۴ پاشندگی نور: همان طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی پرتوی سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۳۳-۱ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیط به جز خلا به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی پرتوی شامل پرتوهای با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط متناسب با طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۳۳-۲ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای نیترو معمولی نشان می‌دهد. با توجه به آن نمودار اگر عملاً دو پرتوی قرمز و آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد نیترو شوند پرتوی آبی بیشتر از پرتوی قرمز خم می‌شود.

شکل ۳۳-۵ پاشندگی نور: همان طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی پرتوی سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۳۳-۱ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیط به جز خلا به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی پرتوی شامل پرتوهای با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط متناسب با طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۳۳-۲ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای نیترو معمولی نشان می‌دهد. با توجه به آن نمودار اگر عملاً دو پرتوی قرمز و آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد نیترو شوند پرتوی آبی بیشتر از پرتوی قرمز خم می‌شود.

در این فیلم چگونگی طرز کار یک تار نوری را ببینید.

شکل ۳۳-۶ پخش‌شدگی نور: همان طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی پرتوی سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۳۳-۱ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیط به جز خلا به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی پرتوی شامل پرتوهای با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط متناسب با طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۳۳-۲ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای نیترو معمولی نشان می‌دهد. با توجه به آن نمودار اگر عملاً دو پرتوی قرمز و آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد نیترو شوند پرتوی آبی بیشتر از پرتوی قرمز خم می‌شود.

۳-۴ پراش موج
اگر در مسیر پخش‌شده یک موج مایع قرار دهیم پخشش از موج که به مایع برخورد می‌کند، توسط مایع بازتاب و یا جذب می‌شود و به پشت مایع می‌رسد و پخشش دیگری، از لبه‌های مایع یا شکاف‌های موجود در آن، می‌گذرد. در صورتی که ابعاد مایع یا شکاف در حدود طول موج باشد، پخشش از موج که از لبه‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، به وضوح به اطراف مایع یا شکاف گسترده می‌شود.

شکل ۳۳-۷ پخش‌شدگی نور: همان طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی پرتوی سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۳۳-۱ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیط به جز خلا به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی پرتوی شامل پرتوهای با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط متناسب با طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۳۳-۲ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای نیترو معمولی نشان می‌دهد. با توجه به آن نمودار اگر عملاً دو پرتوی قرمز و آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد نیترو شوند پرتوی آبی بیشتر از پرتوی قرمز خم می‌شود.

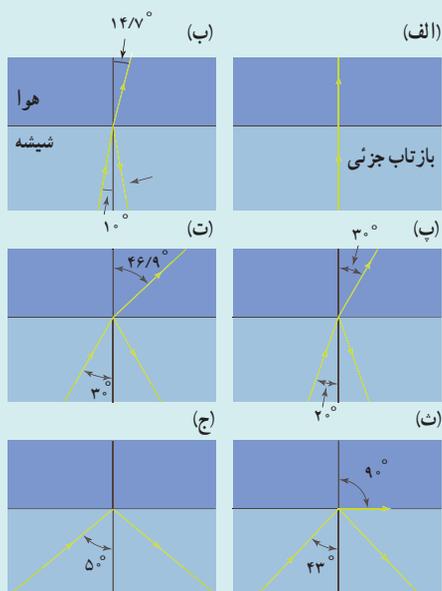
بازتاب داخلی کلی

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 $90^\circ = \theta_2$ 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

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

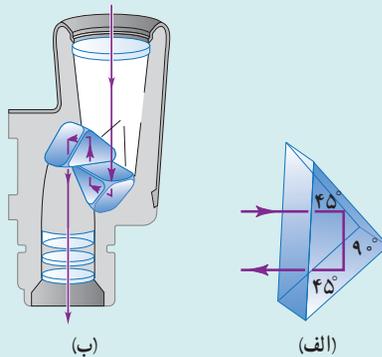


شکل ۱- پرتوی نوری با عبور از شیشه به سطح مشترک شیشه - هوا با زاویه های تابش مختلف برخورد می کند. با بزرگ تر شدن زاویه تابش، زاویه شکست نیز بزرگ می شود تا اینکه به ازای زاویه حد، به 90° می رسد. از آن پس، همه نور فرودی بازمی تابد.

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 $\sin \theta_c = \frac{1}{\sqrt{52}} = 0.658$ 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° 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 بازمی‌تاباند، ضمن اینکه خاصیت بازتابانندگی آن تحت تأثیر کدر شدن سطوح آن قرار نمی‌گیرد. به چنین منشوری، منشور پوروا^۱ می‌گویند و معمولاً از ترکیب دو تایی آنها در دوربین‌های دوچشمی استفاده می‌شود (شکل ۲ ب).



شکل ۲- (الف) بازتاب داخلی کلی در یک منشور پوروا (ب) دوربین‌های دوچشمی از دو منشور پوروا برای بازتاباندن نور به هر عدسی چشمی استفاده می‌کند.

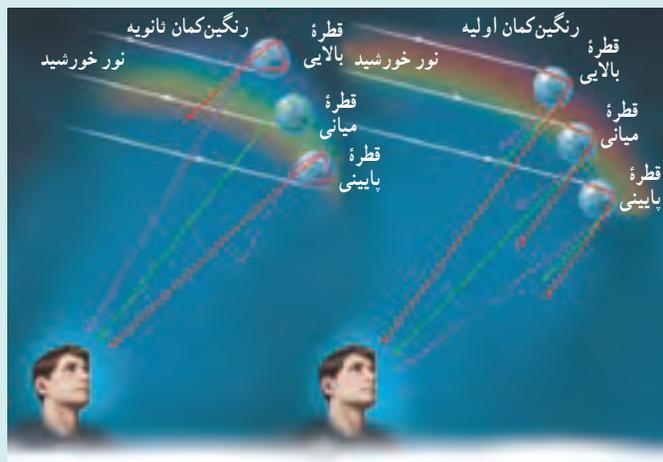
رنگین‌کمان

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 بازمی‌تاباند. 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.



(ب)

(الف)

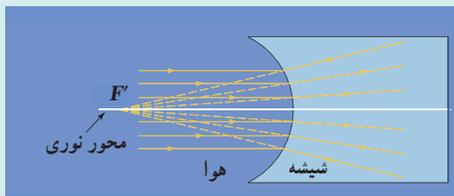
شکل ۴- مقایسه رنگین کمان اولیه و ثانویه

شکست امواج نوری در مرز کروی

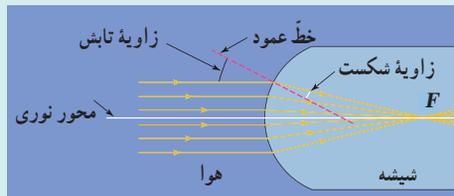
شکست نور در مرزهای کروی اهمیت فراوانی در فیزیک دارد و اساس کار بسیاری از ابزارهای نوری از جمله میکروسکوپ، دوربین‌های نجومی و حتی چشم ما مبتنی بر چنین شکستی است. شکست نور در سطحی کروی از همان قوانین شکست در یک سطح تخت پیروی می‌کند. یعنی پرتوهای تابش و شکست در دو طرف خط عمود بر سطح جدایی دو محیط در نقطه 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:

$$\text{توان عدسی} = \frac{1}{f}$$

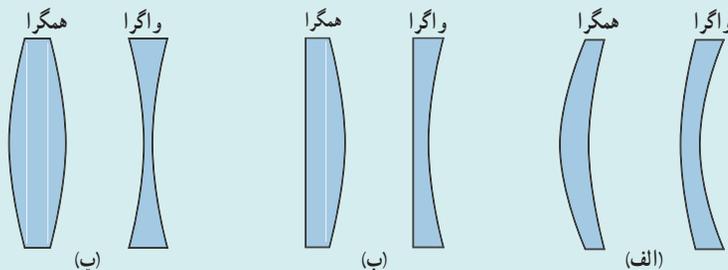
که یکای آن $1/m$ است و آن را دیوپتر می‌نامند و با D نشان می‌دهند. بنابراین هرچه توان یک عدسی همگرا بیشتر باشد، توان آن برای کانونی کردن پرتوهای موازی بیشتر و فاصله کانونی آن کوتاه‌تر است. رابطه بالا و آنچه در مورد توان و مقایسه دو عدسی همگرا گفتیم در مورد عدسی‌های واگرا نیز برقرار است، یعنی هرچه توان 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.



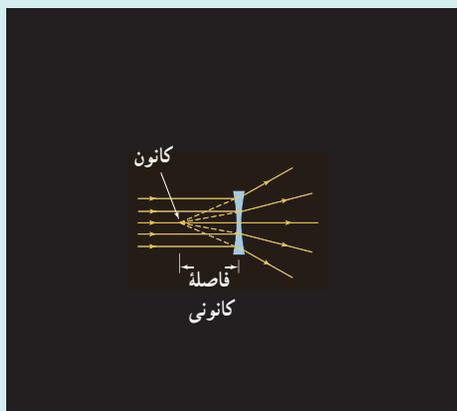
شکل ۲- شکست پرتوهای نور در مرز کاو هوا - شیشه. توجه کنید که پرتوهای فرودی موازی محور نوری و نزدیک به آن هستند و طوری شکست یافته‌اند که گویی از کانون F' ناشی شده‌اند.



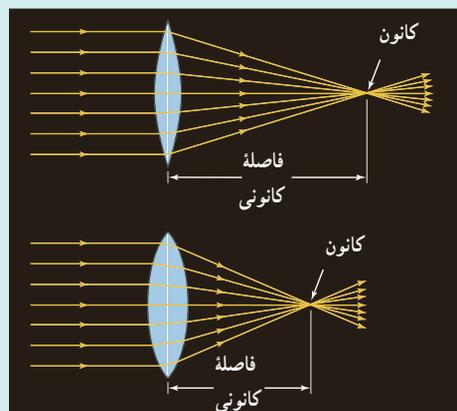
شکل ۱- شکست پرتوهای نور در مرز کوژ هوا - شیشه. توجه کنید که پرتوهای فرودی موازی محور نوری و نزدیک به آن هستند و در کانون F متمرکز می‌شوند.



شکل ۳- مثال هایی از چند نوع عدسی : (الف) کوژ- کوژ چپ، کاو - کاو راست ؛ (ب) تخت - کوژ چپ، تخت - کاو راست؛ (ج) هلالی - کوژ چپ، هلالی - کاو راست.



شکل ۵- چگونه شکست نور در عدسی کاو - کاو که نمونه رایج عدسی های واگرا است.



شکل ۴- مقایسه توان در عدسی همگرا با سطوح خمیدگی متفاوت. توان عدسی خمیده تر در کانونی کردن پرتوها، بیشتر و در نتیجه فاصله کانونی آن کوتاه تر است.

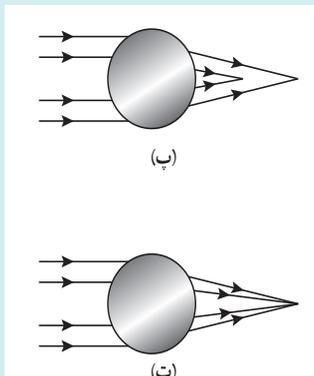
نمره عینک را معمولاً با یک علامت مثبت یا منفی در کنار یک عدد مشخص می کنند. علامت مثبت در کنار عدد به معنی دوربینی، و علامت منفی در کنار عدد به معنی نزدیک بینی است و عددها همان توان عدسی اصلاح کننده بینایی شخص است که همان طور که دیدیم با یکای دیوپتر مشخص می شود. هر چه عدد نمره عینک بیشتر باشد به معنی 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 :

$$f = \frac{1}{\text{توان عدسی}} = \frac{1}{4/25D} = 0/2353m \approx 0/235m = 23/5 \text{ cm}$$

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.

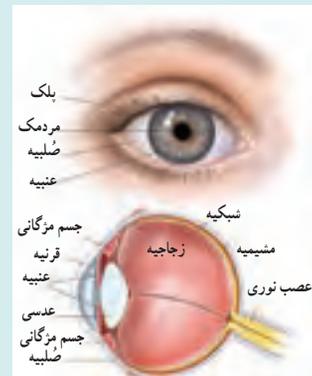
اما در مورد ماهی، چون در درون آب زیست می‌کند عدسی چشم آن به شکل کروی است تا بتواند پرتوها را به دقت بشکند و تصویری در شبکیه ایجاد کند. ولی یک عدسی کروی تمام پرتوهای موازی تابیده به خود را در یک نقطه کانونی نمی‌کند و پرتوها در گستره وسیعی کانونی می‌شوند (شکل پ) و بنابراین قاعدتاً نباید تصویر واضحی تشکیل شود. با این حال ماهی می‌تواند به خوبی در زیر آب ببیند. دلیل این امر آن است که ضریب شکست عدسی چشم ماهی مقدار واحدی ندارد، بلکه در امتداد محور مرکزی دارای ضریب شکست بزرگ‌تر و از آنجا به سمت پیرامون دارای ضریب شکست کوچک‌تر و کوچک‌تری است. شما این واقعیت را می‌توانید با 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

فعالیت های پیشنهادی

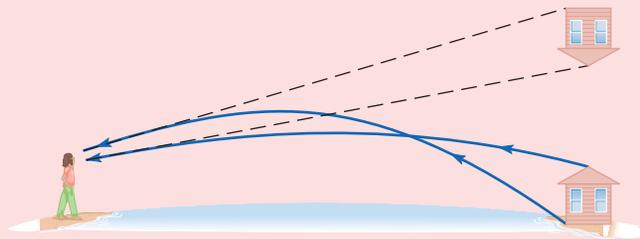
۱ سرتان را مماس بر دیواری طویل که رو به خورشید است قرار دهید، طوری که چشم هایتان نزدیک به سطح دیوار باشد. حال اگر به دوستان نگاه کنید که در سر دیگر این دیوار ایستاده است، تصویری آینه ای از دوست خود را در دیوار می بینید که به نظر می رسد در نقاطی به دوستان وصل شده است. به این، سراب دیوار می گویند.



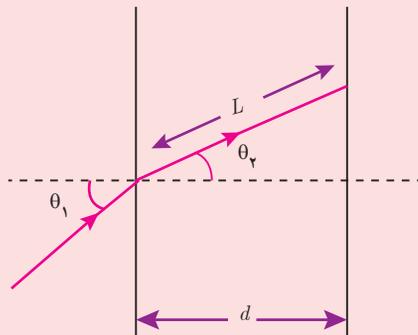
۲ در نواحی بسیار سرد معمولاً سراب دیگری موسوم به سراب فوقانی رخ می دهد که ناشی از سردتر بودن لایه هوای نزدیک سطح زمین نسبت به هوای بالاتر آن است و بنابراین بر اثر تغییر تدریجی دما و در نتیجه ضریب شکست، سراب به جای سطح زمین بر روی هوا تشکیل می شود و تصویر وارونه ای از جسم مورد نظر در هوا دیده می شود. 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 نوری تحت زاویه $\theta = 38/5^\circ$ بر تیغه‌ای با ضریب شکست $n = 1/5$ و ضخامت $d = 5/9 \text{ cm}$ 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

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} = \frac{\sin 38/5^\circ}{1/5} = 0/415$$

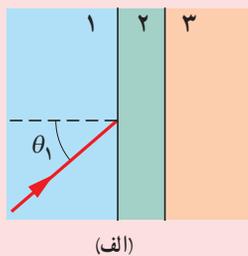
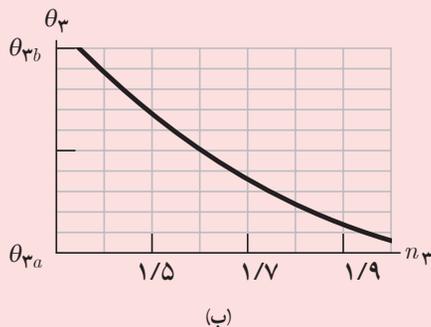
و بنابراین $\cos\theta_r$ چنین می‌شود:

$$\cos\theta_r = \sqrt{1 - \sin^2\theta_r} = 0.910$$

(که حدوداً مربوط به زاویه $24/5^\circ$ است). بنابراین برای L خواهیم داشت:

$$L = \frac{d}{\cos\theta_r} = \frac{5/9 \text{ cm}}{0.910} = 6/485 \text{ cm} \approx 6/48 \text{ cm}$$

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 لایه‌های ۱ و ۳ یکسان است. شکل ب زاویه شکست θ_r در لایه سوم را در حالت کلی برحسب n_r نشان می‌دهد (به عبارتی این نمودار نشان می‌دهد بسته به اینکه جنس محیط سوم چه باشد، زاویه شکست چگونه است). اکنون دو وضعیت را در نظر بگیرید. الف) نخست فرض کنید جنس لایه‌های اول و سوم یکسان است. در این صورت ضریب شکست 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:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_r \sin\theta_r = n_3 \sin\theta_r$$

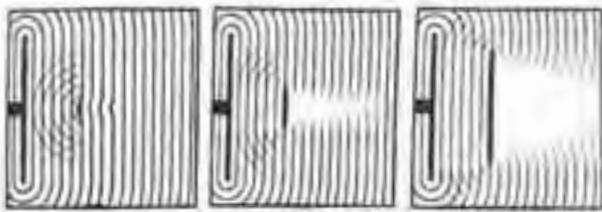
الف) چون جنس لایه‌های ۱ و ۳ یکسان است، $\theta_1 = \theta_r$ می‌شود و بنابراین $\theta_r = 4^\circ$ است. از روی منحنی (ب) درمی‌یابیم $\theta_r = 4^\circ$ حدوداً مربوط به $n_r = 1/6$ است که همان n_1 نیز هست.

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 $\theta_r = 39^\circ$ می‌انجامد.

در این مبحث خوب است دانش آموزان را با موارد ملموس‌تری
 آمادۀ این بحث کنید. صدای امواج صوتی را بر خلاف نور امواج
 نوری می‌توانیم از پشت ساختمان یا دیواری در برابر چشمه موج
 درک کنیم (بشنویم). به عبارتی این امواج «سایه صوتی» ایجاد
 نمی‌کنند. دلیل آن است که ابعاد این موانع در مقایسه با طول موج
 صوتی خیلی بزرگ نیستند، مگر آنکه ساختمان یا دیوار بسیار بزرگی
 باشد. همین تجربه را می‌توانیم با مشاهده تشکیل سایه در آزمایش
 با تشت موج در حضور موانعی با اندازه‌های متفاوت نیز بیازماییم.
 اگر مانند شکل زیر مانع‌هایی با اندازه‌های مختلف را در سر راه موج
 سطحی تخت تشکیل شده در تشت موجی قرار دهیم درمی‌یابیم تا
 وقتی که اندازه مانع‌ها در مقایسه با طول موج قابل ملاحظه باشد
 سایه نسبتاً واضحی تشکیل می‌شود، ولی وقتی مانع کوچک و
 کوچک‌تر شود وضوح سایه کمتر و کمتر می‌شود تا اینکه سایه
 عملاً ناپدید می‌گردد. به عبارتی در این حالت می‌گویید، موج مانع
 را «دور زده» است و طوری به اطراف آن پیشروی کرده است که
 گویی مانعی وجود نداشته است. این دور زدن موج از اطراف مانع
 در هنگامی که اندازه مانع در مقایسه با طول موج بسیار کوچک
 باشد، پراش نامیده می‌شود.



شکل ۳-۴: پراش امواج صوتی

تار نوری؛ وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به‌طور مایل وارد محیطی با ضریب شکست کمتر شود، به‌ازای زاویه تابش خاصی موسوم به زاویه حده، زاویه شکست ۹۰ می‌شود و از آن پس برای هر زاویه تابش بزرگتری همه نور فرودی بازتابد که به این پدیده، بازتاب داخلی گفته می‌شود. تار نوری که هم در پزشکی و هم در فناوری ارتباطات نقش مهمی دارد، بر اساس این پدیده عمل می‌کند. در مرکز یک تار نوری، مغزی استوانه‌ای ششگونی از جنس شیشه یا پلاستیک با ضریب شکست نسبتاً بالا قرار دارد. ضخامت این مغزی می‌تواند تا چند میکرومتر باشد. اطراف مغزی با غلافی پوشیده شده است که آن نیز شفاف است، ولی ضریب شکست بسیار کوچک‌تری از ضریب شکست مغزی دارد تا زاویه حده به اندازه کافی کوچک باشد. نور طوری از یک سر مغزی وارد می‌شود که به مرز مغزی - غلاف تحت زاویه‌ای بزرگتر از زاویه حده تابد و در نتیجه تماماً به درون مغزی بازتاب کند. سپس همین اتفاق در مرز روبروی مغزی تار نیز می‌دهد و نور بر اثر بازتاب داخلی کلی دوباره به مغزی بازتابده می‌شود و این رفت و برگشت نور در مسیری زیگزاگ ادامه می‌یابد (شکل الف) تا اینکه به سر دیگر تار برسد. در یک تار نوری خوب، نور در مغزی کمی جذب می‌کند و بنابراین می‌تواند پیش از آنکه نشتش کاهش یابد، تا مسافت‌های طولانی حرکت کند. تارهای نوری اغلب به‌صورت دسته‌ای کنار هم قرار می‌گیرند تا به شکل یک کابل درآیند، چون تارها بسیار نازک‌اند کابل‌ها نسبتاً کوچک و انعطاف‌پذیر هستند و به این ترتیب می‌توانند در بسیاری موارد، برای انتقال اطلاعات جایگزین کابل‌های فلزی بزرگ شوند (شکل ب). یکی از کاربردهای مهم تارهای نوری در عمل آندوسکوپی در پزشکی است. از آندوسکوپ برای دیدن بدن بدن، بدون انجام جراحی استفاده می‌شود. در آندوسکوپی، جراح دو دسته تار نوری را وارد بدن بیمار می‌کند که یکی نور را به محل موردنظر می‌رساند و دیگری تصویر محل موردنظر را به یک چشمی باصفحه نمایشگر می‌رساند. شکل ب- طرح ساده شده‌ای از چگونه این تصویربرداری و شکل ت، یک اسباب آندوسکوپی معمولی را نشان می‌دهد.

دسته تار نوری ۲ تصویر محل موردنظر را به چشم‌پزشک می‌رساند.
 دسته تار نوری ۱ محل مورد نظر را روشن می‌کند.
 بدنه تار نوری‌ها از طرز کار یک آندوسکوپ

شکل الف: یک کابل کابله در تار نوری شکل است. جیب می‌تواند کابله‌ها را در نظر بگیرد و تصویر از یک کابله می‌تواند تصویر را انتقال دهد.

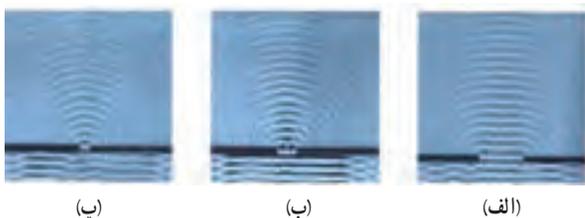
شکل ب: یک کابل کابله در تار نوری شکل است. جیب می‌تواند کابله‌ها را در نظر بگیرد و تصویر از یک کابله می‌تواند تصویر را انتقال دهد.

شکل ت: یک اسباب آندوسکوپی معمولی را نشان می‌دهد.

۳-۴ پراش موج

اگر در مسیر پیشروی یک موج مانعی قرار دهیم بخشی از موج که به مانع برخورد می‌کند، توسط مانع بازتاب و با جذب می‌شود و به پشت مانع نمی‌رسد و بخشی دیگر، از لبه‌های مانع با شکاف‌های موجود در آن، می‌گذرد. در صورتی که ابعاد مانع یا شکاف در حدود طول موج باشد، بخشی از موج که از لبه‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، به‌وضوح به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.

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 ۴-۲۶ موج فرودی و موج پراشیده در شکاف. در شکل (الف)، پهنای شکاف خیلی بزرگتر از طول موج است (مثلاً $a \gg \lambda$)، همان طور که دیده می شود قسمتی از موج که از شکاف می گذرد تقریباً تخت باقی می ماند. در شکل (ب)، پهنای شکاف کمتر شده است (مثلاً $a \approx \lambda$) و همان طور که می بینید قسمتی از موج که از شکاف می گذرد از حالت موج تخت خارج شده و نسبت به حالت قبل، مقدار بیشتری به اطراف گسترده شده است. در شکل (ج)، که پهنای شکاف، $a \approx \lambda/2$ است، قسمتی از موج که از شکاف می گذرد کاملاً از حالت موج تخت خارج و به اطراف شکاف گسترده شده است. به این پدیده که موج در عبور از شکاف با پهنای آن مرتبه طول موج، به اطراف گسترده می شود، **پراش** می گویند. برای نقطه به وضعیت عبور موج از شکاف پراش (با روزنه) محدود نمی شود بلکه هنگام عبور موج از لوله های مایعی که ابعاد آن در حدود طول موج باشند نیز رخ می دهد. برای همه انواع موج اتفاق می افتد. برای مثال شکل ۴-۲۷، پراش امواج طول موج پانصد نانو متر می دهد. برای شکاف بزرگ، هنگام عبور امواج از شکاف پراش نشان می دهد.

شکل ۴-۲۷ پراش امواج صوتی در لوله های مایعی. در این تصویر، امواج صوتی با طول موج ۰.۵ متر از شکاف عبور می کند و پراش می یابد. در این تصویر، امواج صوتی با طول موج ۰.۵ متر از شکاف عبور می کند و پراش می یابد. در این تصویر، امواج صوتی با طول موج ۰.۵ متر از شکاف عبور می کند و پراش می یابد.

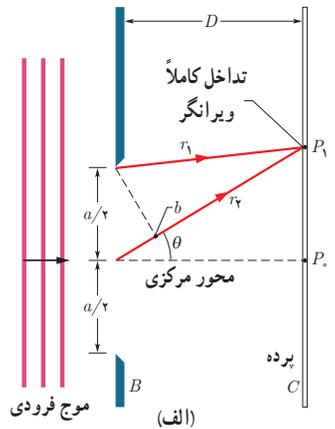
شکل ۴-۲۸ پراش امواج صوتی در لوله های مایعی. در این تصویر، امواج صوتی با طول موج ۰.۵ متر از شکاف عبور می کند و پراش می یابد. در این تصویر، امواج صوتی با طول موج ۰.۵ متر از شکاف عبور می کند و پراش می یابد.



پرسش ۴-۴ در تئوریون های متداول، سیگنال ها از آنتن های روی دکل ها به گیرنده های تلویزیون فرستاده می شود. 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 لوله های مانع دریافت خواهد کرد (اگر سیگنال در اطراف آن مانع به حد کافی به داخل ناحیه سایه مانع برسانده شود). سایه بر این طول موج سیگنال های تلویزیونی در حدود ۵۰ cm بود. دلی طول موج سیگنال های تلویزیونی دیجیتالی 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 می دهد؟

حتماً تأکید شود که این رفتار نور تأییدی بر موجی بودن نور است.

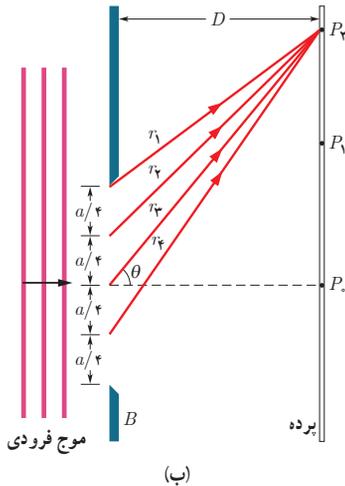
در اینجا به درستی آمده است که تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث تداخل امواج است. اما توجه کنید مفاهیمی که در بخش ۴-۴ آمده است دانشی کافی برای این تحلیل را ارائه نمی کند. در واقع کتاب های مبتنی بر حسابان، نخست به تداخل و سپس به پراش می پردازند تا دانش ریاضی لازم برای تحلیل این مبحث را داشته باشند.



همان طور که در «دانستنی 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 باید داشته باشیم

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$



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 مانعی 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 ۲۳-۴ وضعیت طرح‌آوری را نشان می‌دهد که در آن موجی تخت با طول موج λ به مانی مرسد که شکافی به پهنای «دارد». در شکل ۲۳-۴ الف، پهنای شکاف خیلی بزرگ‌تر از طول موج است ($a \gg \lambda$). همان‌طور که دیده می‌شود قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد تقریباً تخت باقی می‌ماند. در شکل ۲۳-۴ ب، پهنای شکاف کمتر شده است ($a \approx \lambda$) و همان‌طور که می‌بینید قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد از حالت موج تخت خارج شده و نسبت به حالت قبل، مقدار بیشتری به اطراف گسترده شده است. در شکل ۲۳-۴ ج، که پهنای شکاف $a \approx \lambda/2$ شده است، قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد کاملاً از حالت موج تخت خارج و به اطراف شکاف گسترده شده است. به این دیده که موج در عبور از یک شکاف با پهنای از برده طول موج، به اطراف گسترده می‌شود. پراش می‌گویند. پراش فقط به وضعیت عبور موج از یک شکاف باریک (یا روزنه) محدود نمی‌شود بلکه هنگام عبور موج از لبه‌های مانعی که ابعاد آن در حدود طول موج باشند نیز رخ می‌دهد. پراش برای همه انواع امواج اتفاق می‌افتد. برای مثال شکل ۲۳-۴ د، پراش امواج تخت را روی سطح آب در یک تشت موج هنگام عبور امواج از یک شکاف باریک نشان می‌دهد. البته پراش در واقع چیزی فراتر از صرفاً گسترده‌گی بیشتر موج است و مثلاً اگر پراش توری تکدام از یک شکاف باریک با لبه‌ای تیز را روی یک پرده ملاحظه کنیم، همواره نوارهای تارک و روشنی موسوم به **نقش پراش** را موازی با لبه‌های شکاف مشاهده می‌کنیم. شکل ۲۳-۴ د، نقش پراش توری تکدام از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ را نشان می‌دهد. تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث داخل امواج است. داخل امواج را در بخش بعد می‌آموزیم.

شکل ۲۳-۴ الف: پراش به‌طور طرح‌آور برای شکاف با پهنای مختلف و برای یک طول موج مشخص فرود نشان داده شده است. در پهنای شکاف کوچک‌تر شده در این باره‌تر شده است.

شکل ۲۳-۴ ب: پراش امواج تخت هنگام عبور از شکاف باریک در تشت موج

شکل ۲۳-۴ ج: پراش امواج تخت هنگام عبور از شکاف باریک در تشت موج

شکل ۲۳-۴ د: پراش امواج تخت هنگام عبور از شکاف باریک در تشت موج

پرسش ۲۳-۴

در تلویزیون‌های متداول، سیگنال‌ها از آنتن‌های روی دکل‌ها به گیرنده‌های تلویزیون فرستاده می‌شود. حتی وقتی گیرنده به دلیل وجود یک تپه یا ساختمان در معرض ارسال مستقیم امواج یک آنتن نباشد، همچنان سیگنال را به دلیل پراش امواج از لبه‌های مانع دریافت خواهد کرد (اگر سیگنال در اطراف آن مانع به حد کافی به داخل ناحیه سایه مانع برانداخته شود). سابق و 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 نقش‌ها که مانند خال‌های ریز و ساختارهایی موماند هستند ناشی از خرده‌های ریزی در مایع زجاجیه چشم هستند که با گذشت عمر و کم شدن یکنواختی مایع زجاجیه، بر میزان آنها افزوده می‌شود. در واقع آنچه شما هنگام دیدن یک شناور می‌بینید، ناشی از پراش نور از لبه این خرده‌ها و تشکیل یک نقش پراشی بر روی شبکیه است. این نقش از نوارهای تاریک و روشنی تشکیل شده است. اگر بی‌نظمی‌های زجاجیه تقریباً دایره‌ای باشند، نقش حاصل نیز دایره‌ای با یک نقطه مرکزی روشن خواهد بود. یک بی‌نظمی کشیده، نقش پراشی کشیده‌ای را ایجاد می‌کند. شناورها به این دلیل ایجاد می‌شوند که زجاجیه صلب نیست و می‌تواند جابه‌جا شود. برخی از شناورها ناشی از تکه‌های سفت‌شده‌ای از زجاجیه هستند. همچنین آنها می‌توانند ناشی از گویچه‌هایی باشند که در این مایع رخنه کرده‌اند، شناورها را همه دارند و حضور آنها نشانه بیماری نیست، ولی با پیر شدن بر شمار آنها افزوده می‌شود.

دانستنی برای معلم

لکه روشن فرنل

نظریه موجی نور توضیح ساده‌ای برای پدیده پراش ارائه می‌کند. ولی این نظریه که در اواخر سال‌های ۱۶۰۰ میلادی توسط هویگنس ارائه شد و ۱۲۳ سال بعد توسط یانگ برای توضیح تداخل دوشکافی به کار برده شد، به کندی مورد پذیرش قرار گرفت، عمدتاً به این دلیل که در مغایرت با نظریه نیوتون بود که نور را جریانی از ذرات می‌پنداشت.

در سال ۱۸۱۸، آگوستین جان فرنل^۲ یک مدل موجی نور را برای مسابقه‌ای در آکادمی علوم فرانسه^۳ ارائه داد. سایمون دی 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 دایره‌ای (مثل یک سکه یا یک گوی) توسط باریکه‌ای از نور روشن شود، مدل موجی فرنل پیش‌بینی می‌کند که باید نقطه‌ای روشن در مرکز سایه‌ای که آن جسم بر روی یک پرده در فاصله‌ای دور می‌اندازد، ظاهر شود. دومینیک اف. آراگو، عضو دیگر کمیته، ترتیبی داد که به رغم این نتیجه نامعقول پیش‌بینی فرنل را امتحان کند. او، در کمال تعجب، آن نقطه مرکزی روشن را یافت. از عجایب تاریخ آنکه، این نقطه اکنون به عنوان نقطه‌ای پواسون یا نقطه آراگو شناخته می‌شود، هرچند که هیچ یک از آن دو در ابتدا اعتقادی به وجود آن نداشتند.

از زمان کشف این نقطه، پژوهشگران بسیاری اشیاء کدری مثل ساجمه یک یاقاقان را به کار گرفته‌اند تا به عنوان یک عدسی برای ایجاد تصویر عمل کنند. اگر این تصویر بر روی فیلم شکل گیرد، شما می‌توانید درست مثل یک دوربین، عکسی از آن تهیه کنید.

۱_ floaters

۲_ Augustin Jean Fresnel

۳_ French Academy

۴_ Simeon D. Poisson



چرا نقطهٔ پوآسون شکل می‌گیرد؟ و چگونه جسمی مثل یک گوی فلزی می‌تواند نور را به ایجاد یک تصویر وادارد؟

فرض کنید چشمهٔ نور، نقطه‌ای روشن در فاصله‌ای دور است و تصویر توسط یک گوی صلب ایجاد می‌شود. وقتی امواج نوری به گوی می‌رسند، از اطراف آن پراشیده می‌شوند و به طور شعاعی به سمت بیرون و نیز به درون ناحیهٔ سایهٔ گوی پخش می‌شوند. اگر پرده‌ای کاملاً در پشت گوی قرار گیرد، نور نقش پراش کوچکی از دایره‌های هم‌مرکز تاریک و روشن را بر روی آن شکل می‌دهد. مرکز این نقش، نقطه‌ای روشن است، زیرا امواج عبوری از یک سمت گوی همان مسافتی را تا مرکز پرده طی می‌کنند که امواج عبوری از سمت مقابل آن طی می‌کنند و بنابراین، این امواج به طور هم‌فاز به یکدیگر می‌رسند و تداخل سازنده می‌کنند.

نخستین دایرهٔ تاریک، ناشی از تداخل ویرانگر است. بالای این دایره را در نظر بگیرید. امواج عبوری از پایین گوی باید مسافت بیشتری را نسبت به امواج عبوری از بالای گوی طی کنند تا به آن نقطه برسند. این مسافت اضافی برابر با نصف یک طول موج است و بنابراین این دو دسته موج (یکی از پایین و یکی از بالا) وقتی به نقطه‌ای روی پرده می‌رسند، تداخل ویرانگر می‌کنند. بقیهٔ این نقش نیز ناشی از تداخل سازنده و ویرانگر مشابهی است. در بعضی جاها، فاصلهٔ طی شده توسط امواجی که از طرف‌های مقابل هم می‌آیند به اندازهٔ مضرب صحیحی از یک طول موج تفاوت دارند، که این به تداخل سازنده می‌انجامد، زیرا امواج را هم‌فاز می‌کند. در جاهای دیگر، تفاوت مسافت طی شده، برابر با مضرب فردی از نصف یک طول موج است، که این به تداخل ویرانگر می‌انجامد، زیرا امواج را ناهم‌فاز می‌کند.

وقتی یک گوی تصویری از یک جسم را به وجود می‌آورد، هر بخش روشن آن جسم به عنوان یک چشمهٔ نور نقطه‌ای عمل می‌کند و نقطه‌ای نسبتاً روشن را در نزدیکی مرکز نقش پراش ایجاد می‌کند. ترکیب این نقاط روشن، تقریباً شکل آن جسم را دوباره می‌سازد و بنابراین تصویری از جسم به وجود می‌آورد.

در این فیلم، نمایشی از پراش فرنل را می‌بینید.



فیلم

پرسش پیشنهادی

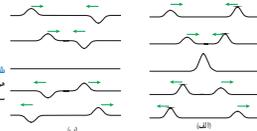
چرا امواج برنامه‌های تلویزیونی برخلاف امواج رادیویی به‌طور مستقیم پخش می‌شوند؟ پاسخ: ایستگاه‌های تلویزیونی در طول موج‌های کمتری از امواج رادیویی کار می‌کنند. برای چنین امواجی یون‌سپهر شفاف است و امواج را مانند امواج رادیویی باز نمی‌گرداند. بنابراین نمی‌توان آنها را مانند امواج رادیویی منتشر کرد. با توجه به بلند بودن طول موج این امواج، آنها را کلاً به‌طور مستقیم انتشار می‌دهند، زیرا از موانعی مانند خانه‌ها و... چندان پراشیده نمی‌گردند. البته همان‌طور که در پرسش ۴-۴ مطرح شده است، طول موج سیگنال تلویزیون‌های دیجیتال کمتر است و این به پراشیدگی بیشتری می‌انجامد.

شکل ۳-۴ برهم کنش های موج

۳-۴ تداخل امواج

وقتی در تالاری به تالی موسیقی گویی می‌دهی، امواج صوتی حاصل از سازه‌های مختلف به‌طور همدان به گونشان می‌رسد. الکترون‌ها در آنتن گیرنده‌های رادیو و تلوویزیون تحت تأثیر همزمان امواج الکترومغناطیسی زیادی که از فرستنده‌های مختلف ارسال می‌شوند، به حرکت می‌افتند. آب یک دریاچه یا بندرگاه، ممکن است بر اثر تأثیر همزمان موج‌هایی که به دنبال خداد زادی قافی در حال حرکت برآید می‌افتد، ملاحظه شود. اینها هنگامی نمودهای از اصل برهم‌کنش امواج هستند که بیان می‌دارد وقتی چندین موج به‌طور همزمان بر ناحیه‌ای از فضا تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برابر مجموع اثرهای مجزای هر یک از آنها است.

شکل ۳-۴.۱. عکس‌های دو تب را که در جهت‌های مخالف هم در یک ریسمان کشیده شده حرکت می‌کنند در چند لحظه متوالی نشان می‌دهد. وقتی این تب‌ها به هم می‌رسند و با یکدیگر هم‌نشانی می‌کنند، تا بر اصل برهم‌کنش تب برآیند با مجموع دو تب برابر است. توجه کنید چه برای تب‌ها و چه برای موج‌هایی که هم‌نشانی می‌کنند، آنها به هیچ وجه شکل و حرکت یکدیگر را تغییر نمی‌دهند، و بنابراین پس از هم‌نشانی، بدون هرگونه تغییر شکلی به حرکت خود ادامه می‌دهند. به ترکیب موج‌ها یا یکدیگر، تداخل می‌گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که همزمان از یک منطقه عبور می‌کنند. در شکل ۳-۴.۲ الف، تب‌ها هنگام هم‌نشانی تب بزرگ‌تری را ایجاد کرده‌اند که به آن تداخل سازنده می‌گویند، در حالی که در شکل ۳-۴.۲ ب، تب‌ها هنگام هم‌نشانی اثر یکدیگر را حذف کرده‌اند که به آن تداخل ویرانگر می‌گویند. تداخل‌های سازنده و ویرانگر برای موج‌ها نیز همچون تب‌ها رخ می‌دهد که آن را در قسمت‌های بعدی بررسی خواهیم کرد.



شکل ۳-۴.۱. در تب پیوسته در جهت‌های مخالف هم در تالاری یک ریسمان کشیده شده که با یکدیگر تداخل سازنده و تداخل ویرانگر انجام می‌دهد.



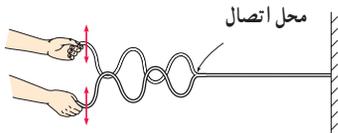
شکل ۳-۴.۲. تداخل امواج سطحی آب: برای مشاهده تداخل امواج سطحی بر سطح آب، دو گوی کوچک را با ساندwich، به‌طور همزمان بر سطح آب به نوسان درمی‌آوریم. دو دسته موج دارای ایجاد می‌شود که می‌تواند بر انتشار یکدیگر تأثیر بگذارد یا یکدیگر هم‌نشانی می‌کنند و قشعی مانند شکل ۳-۴.۲ را بر سطح آب بوجود می‌آورند. امواج در برخی نقاط همدیگر را تقویت می‌کنند و تداخل سازنده انجام می‌دهند و در برخی نقاط همدیگر را تضعیف می‌کنند و تداخل ویرانگر انجام می‌دهند. به عبارتی، دامنه‌ها یا فرکانس‌های دو موج که در یک زمان در نقطه‌ای به همدیگر برسند، سطح آب در آن نقطه به‌شدت بالا یا پایین می‌رود. در خروج بزرگ‌تر باشد چنین قشعی ایجاد می‌شود.

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 می‌شوند.

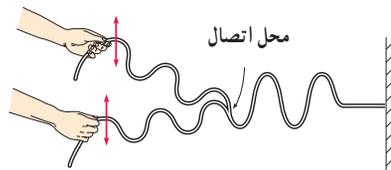
خوب است در اینجا این مفاهیم را برای امواج، با ایجاد دو موج سینوسی در دو ریسمان نیز بررسی کنید.

فرض کنید دو موج سینوسی با طول موج و دامنه یکسان را مطابق شکل الف در دو ریسمان که در نقطه‌ای به ریسمان سومی وصل شده‌اند، روانه کنیم. توجه کنید ریسمان‌ها از هر لحاظ مشابه یکدیگرند و جرم واحد طول آنها با هم برابر است. روش آزمایش به این ترتیب است که یکی از ریسمان‌ها را در دست چپ خود و دیگری را در دست راست خود بگیرید و آنها را مطابق شکل به‌طور همگام به نوسان درآورید؛ یعنی آنها را به شیوه یکسانی بالا و پایین بپرید، به‌طوری که امواج تولید شده در هر دو ریسمان کاملاً مشابه هم باشند.

وقتی این دو موج به محل اتصال ریسمان‌ها برسند، مشاهده خواهیم کرد که موجی با همان طول موج ولی با دامنه‌ای دو برابر بزرگ‌تر در ریسمان سوم ایجاد می‌شود. در واقع آنچه رخ می‌دهد آن است که قله‌های دو موج اولیه و نیز دره‌های آنها در ریسمان سوم بر یکدیگر منطبق می‌شوند و اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج با یکدیگر هم‌فاز بوده‌اند. به این نوع تداخل، تداخل کاملاً سازنده می‌گویند. حال اگر دو ریسمان را مانند شکل ب طوری حرکت دهیم که در حالی که یکی روبه بالا می‌رود دیگری روبه پایین برود، اصطلاحاً می‌گوییم موج‌هایی کاملاً ناهم‌فاز نسبت به یکدیگر ایجاد شده‌اند. و اگر این دو موج دامنه یکسانی داشته باشند، اصل بر هم‌نهی پیش‌بینی می‌کند که وقتی این دو موج به محل اتصال برسند، اثر همدیگر را خنثی می‌کنند و جابه‌جایی خالص صفر می‌شود. در واقع آنچه رخ می‌دهد آن است که در ریسمان سوم قله‌های یک موج درست بر دره‌های موج دیگر منطبق می‌شود. به این نوع تداخل، تداخل کاملاً ویرانگر می‌گویند.

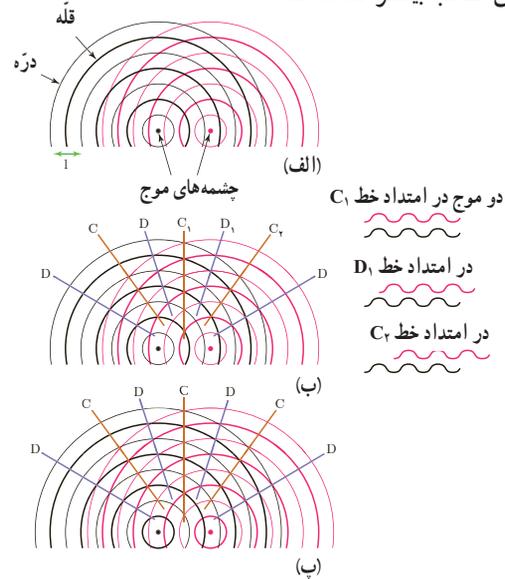


ب) دو موج که به‌طور کاملاً ناهم‌فاز در دو ریسمان مشابه ایجاد شده‌اند، هیچ جابه‌جایی در ریسمان مشابه دیگری که به آنها متصل شده است، ایجاد نمی‌کنند.



الف) دو موج که به‌طور هم‌فاز در دو ریسمان یکسان ایجاد شده‌اند، با رسیدن به ریسمان سوم با جرم واحد طول مشابه، موجی بزرگ‌تر در این ریسمان ایجاد کرده‌اند.

رسم شکل‌هایی مانند شکل‌های زیر می‌تواند دانش‌آموزان را در تفهیم این مطالب بیشتر کمک کند.



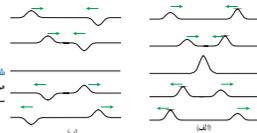
برای رسیدن به هر نقطه‌ای در امتداد خطی که با C مشخص شده‌اند قله‌ها بر هم و دره‌ها بر یکدیگر منطبق می‌شوند، در حالی که در امتداد خطی که با D مشخص شده‌اند قله‌ها بر دره‌ها و بالعکس قرار می‌گیرند.

شکل ۳-۴ برهم‌کنش موج

۳-۴ تداخل امواج

وقتی در تالاری به تراز می‌سوزی گرتن می‌دهی، امواج صوتی حاصل از سازه‌های مختلف به‌طور هم‌زمان به گوش‌ت می‌رسد. الکترون‌ها در آنتن گیرنده‌های رادیو و تلویزیون تحت تأثیر هم‌زمان امواج الکترومغناطیسی زیادی که از فرستنده‌های مختلف ارسال می‌شوند، به حرکت می‌آیند. آب یک دریاچه با بندرگاه، ممکن است بر اثر تأثیر هم‌زمان موج‌هایی که به دنبال تعداد زیادی قایق در حال حرکت برآید می‌آیند، تلاطم شود. اینها هنگامی نموداری از اصل برهم‌نهی امواج هستند که بیان می‌دارد وقتی چندین موج به‌طور هم‌زمان بر ناحیه‌ای از فضا تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برابر مجموع اثرهای مجزای هر یک از آنها است.

شکل ۲۸-۴ عکس‌های دو نب را که در جهت‌های مخالف هم در یک ریسمان کشیده شده حرکت می‌کنند در جهت متوالی نشان می‌دهد. وقتی این نب‌ها به هم می‌رسند و با یکدیگر هم‌نشانی می‌کنند، بنا بر اصل برهم‌نهی، نب برآید با مجموع دو نب برای است. توجه کن که چه برای نب‌ها و چه برای موج‌هایی که هم‌نشانی می‌کنند، آنها به هیچ وجه شکل و حرکت خود را تغییر نمی‌دهند، و بنابراین سی از هم‌نشانی، بدون هرگونه تغییر شکلی به حرکت خود ادامه می‌دهند. به ترکیب موج‌ها با یکدیگر «تداخل» می‌گویند. به بیان دیگر تغییر شکلی که ترکیب دو یا چند موج است که هم‌زمان از یک منطقه عبور می‌کنند. در شکل ۲۸-۴ الف، نب‌ها هنگام هم‌نشانی تب بزرگ‌تری را ایجاد کرده‌اند که به آن «تداخل سازنده» می‌گویند. در حالی که در شکل ۲۸-۴ ب، نب‌ها هنگام هم‌نشانی اثر یکدیگر را حذف کرده‌اند که به آن «تداخل ویرانگر» می‌گویند. تداخل‌های سازنده و ویرانگر برای موج‌ها نیز همچون نب‌ها رخ می‌دهد که آن را در قسمت‌های بعدی بررسی خواهیم کرد.



شکل ۲۸-۴ الف در تب پیروزه در جهت‌های مخالف هم در طول یک ریسمان کشیده که با یکدیگر تداخل سازنده و تداخل ویرانگر انجام می‌دهد.



تداخل امواج سطحی آب: برای مشاهده تداخل امواج سطحی بر سطح آب، دو گوی کوچک را با سازه‌های یکسان، به‌طور هم‌زمان بر سطح آب به نوسان درمی‌آوریم. دو دسته موج دایره‌ای ایجاد می‌شود که می‌تواند بر انتشار یکدیگر تأثیر بگذارد یا یکدیگر هم‌نشانی می‌کنند و قفسی مانند غش تشکیل می‌شود که با شکل ۲۹-۴ را بر سطح آب وجود می‌آورد. امواج در برخی نقاط همدگر را تقویت می‌کنند و تداخل سازنده انجام می‌دهد و در برخی نقاط همدگر را تضعیف می‌کنند.

تداخل ویرانگر انجام می‌دهد. به عبارتی، برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های دو موج که در یک زمان در نقطه‌ای به همدگر می‌رسند، سطح آب در آن نقطه به مدت ۹۰٪ پایین می‌رود. در طول روز بزرگ‌تر باشد قفسی ایجاد می‌شود.

در این فیلم تداخل امواج سطحی آب

را می‌بینید.

فیلم

در این فیلم، طرحی از تداخل انواع دایره‌ای را می‌بینید.

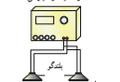
فیلم

توجه کنید در این آزمایش از میکروفون به این دلیل استفاده کردیم که تمایز بین صداهای کم و زیاد را با وضوح بیشتری حس کنیم، وگرنه این آزمایش بدون استفاده از میکروفون، صرفاً با شنیدن نیز قابل انجام است. همچنین در توضیح آنچه رخ داده است، می‌توانید دانش‌آموزان را به تداخل امواج سطحی ارجاع دهید. مانند آنچه، وقتی موج‌های هم‌بسامد (و در نتیجه هم‌طول موج) به‌طور هم‌زمان ایجاد شوند، بر اثر تداخل این امواج، بسته به آنکه تداخل کاملاً سازنده یا کاملاً ویرانگر باشند، مکان‌هایی یافت می‌شود که در آنها دامنه موج برآیند و به عبارتی بلندی صوت بیشینه یا کمینه باشد. این نقاط در شکل ۳۱-۴ به ترتیب با حروف L (سرواژه Loud sound به معنی صدای بلند) و حرف S (سرواژه Soft sound به معنی صدای ضعیف) نشان داده شده است. که یک در میان ظاهر می‌شوند. این آزمایش همچنین مدخلی مناسب برای بحث تداخل امواج نوری از دو شکاف باریک است.

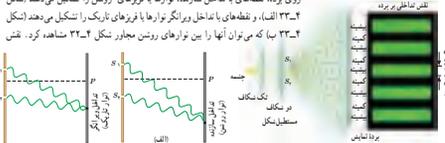
حالی که اگر برآمدگی یک موج در یک زمان و در یک نقطه به فرورفتگی موج دیگر برسد، دو موج یکدیگر را تضعیف می‌کنند و بنابراین سطح آب در چنین نقطه‌ای نوسان چندانی نخواهد داشت. به این ترتیب، در برخی نواحی روی سطح آب دامنه موج برآیند بیشینه و در برخی ناحیه‌ها، کمینه است. چنین غش متناوب یکدردمیانی از بیشینه‌ها و کمینه‌ها را غش تداخلی امواج سطحی آب نامیدیم و آنها را به‌وضوح می‌توانیم در سایه تشکیل شده و سطح ورقه کاغذ رنگی موج مشاهده کنیم (شکل ۳۰-۴).



تداخل امواج صوتی: امواج صوتی نیز می‌توانند تداخل کنند. به این منظور، آزمایشی که جانسون که در سال ۱۸۰۱ میلادی توسط بانگ (۱۸۲۹-۱۷۷۲ م.) داشتند انگلیسی به‌طور تجربی ثابت کرد تور یک موج است که این برخلاف نظر بیشتر فیزیکدانان آن زمان بود. در واقع او نشان داد که تور نیز مانند موج‌های سطحی آب، موج‌های صوتی و همه امواج موج‌های دیگر تداخل می‌کنند.



شکل ۳۲-۴ طرحی از چگونگی آزمایش اولیه بانگ و این تحقیق تداخل امواج صوتی را نشان می‌دهد. تور حاصل از یک چنگوله کشیده (انجاسترنگ) که یک شکاف می‌باشد، سپس تور خروجی از ترازین، کشیده می‌شود و دو شکاف S₁ و S₂ را روشن می‌کند. موج‌های حاصل از ترازین تور توسط این دو شکاف با یکدیگر تداخل می‌کنند و غش حاصل از این تداخل را می‌توان روی پرده‌ای که در ناحیه قسمت راست دو شکاف قرار دارد مشاهده کرد. روی پرده، نقطه‌های با تداخل سازنده، نوارها یا فریب‌های روشن را تشکیل می‌دهد (شکل ۳۳-۴ الف). نقطه‌های با تداخل ویرانگر نوارها یا فریب‌های تاریک را تشکیل می‌دهد (شکل ۳۳-۴ ب) که می‌توان آنها را بین نوارهای روشن مجاور شکل ۳۳-۴ مشاهده کرد. غش



شکل ۳۳-۴ الف در موج هم‌بزرگ را تقویت می‌کند و در نتیجه تداخل آنها سازنده است. اما در موج هم‌بزرگ را تضعیف می‌کند و در نتیجه تداخل آنها ویرانگر است.

پاسخ فعالیت ۴-۵

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 $۸s$ 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 یانگ با نور لیزر را مشاهده می‌کنید.

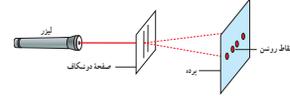


شکل ۳۳: برهم‌کنش موج

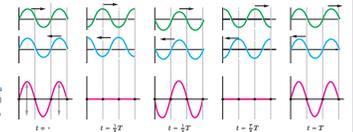
نوارهای روشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل‌های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می‌شود. طرحی از این نقش در سمت راست شکل ۳۳-۴، برای نور تک‌فام سبز نشان داده شده است. در این نقش پهنای هر نوار تاریک یا روشن (که مسأله فرض می‌شود) متناسب با طول موج نور به کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور به کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی‌پردازیم.

فعالیت ۴-۵

مشاهده نقش تداخلی به کمک نور لیزر: اگر از نور لیزر استفاده کنید، دیگر نیازی به استفاده از یک کنتراست در آزمایش یانگ نیست. با استفاده از یک لیزر مدادی، صفحه دو شکاف آزمایش یانگ را مطابق شکل روشن کنید (نماید 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 به‌خوبی دودآلود کنید. سپس با تیغ تیزی در خط نزدیک به هم (با فاصله چند دهم میلی‌متر از یکدیگر) روی تیزه نیشه‌ای بکشید.



موج ایستاده و تعدیل در ریمان کشیده: رسانی را تصور کنید که در یک انتها ثابت شده است و انتهای دیگر آن به نوسان درمی‌آید. وقتی موج یازدهم از انتهای ثابت (که در شکل ۳۳-۴ با رنگ آبی مشخص شده است) و به سمت چپ حرکت می‌کند (با موج نهم که در شکل ۳۳-۴ با رنگ سبز مشخص شده است) و به سمت راست حرکت می‌کند (با رنگ نهم که در شکل ۳۳-۴ با رنگ قرمز مشخص شده است) شکل آن از اصل برهم‌تهی حاصل می‌شود (این موج در شکل ۳۳-۴ با رنگ قرمز مشخص شده است). مشخصه بارز این موج بر این 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 بر ایند در آنجا بیشینه است. نقش موج بر ایند را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند. زیرا نقش‌های این موج به چپ



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 ۴-۷ مثال‌هایی از تداخل امواج الکترومغناطیسی هستند. همچنین بررسی فعالیت پیشنهادی «تداخل برای امواج میکروموج» خالی از لطف نیست.

دانشنی معلم

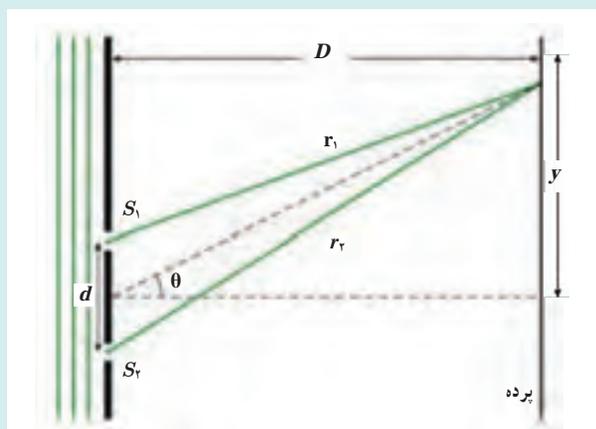
اختلاف طول مسیر و مکان نوارهای تداخلی

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 ۴-۳۳ 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 مسیری 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 بیشینه ها می رسیم، 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 رسیم. به عبارتی برای اختلاف راه ΔL داریم

$$\Delta L = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی روشنی)}$$

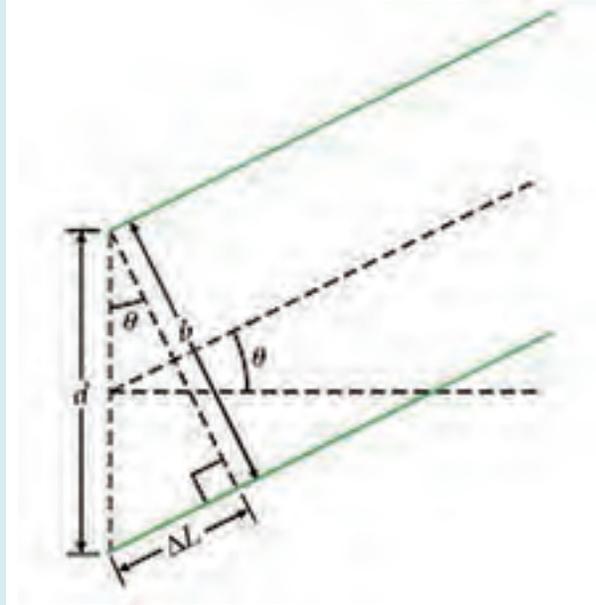
$$\Delta L = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی تاریک)}$$



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 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.

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی روشن)}$$

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی تاریک)}$$

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

$$y = \frac{m\lambda D}{d}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی روشن)}$$

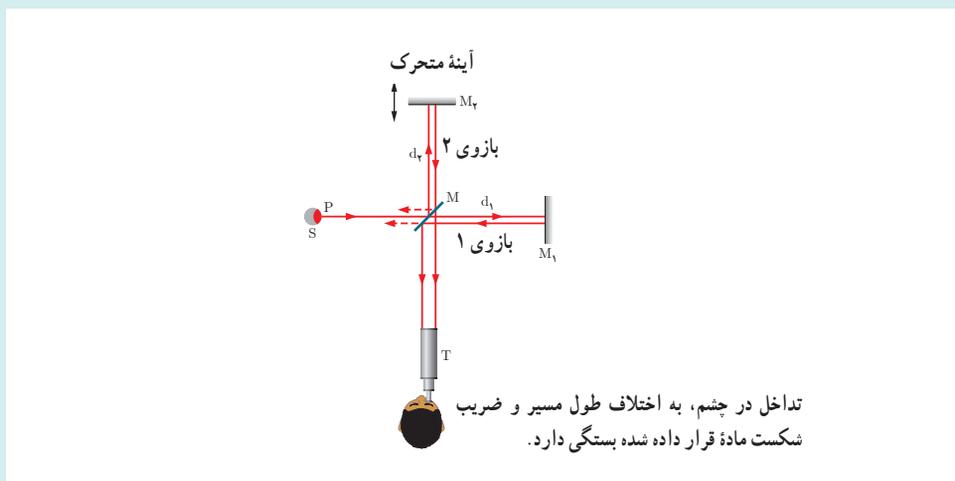
$$y = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda D}{d}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \text{ (برای نوارهای تداخلی تاریک)}$$

تداخل سنج مایکلسون

تداخل سنج^۱ وسیله‌ای است که به کمک فریزهای تداخلی می‌تواند برای اندازه‌گیری 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 می‌دهیم.

نوری را در نظر بگیرید که نقطه P واقع بر چشمه گسترده S در شکل ۱ را ترک می‌کند و به شکافنده باریکه M می‌رسد. شکافنده باریکه، آینه‌ای است که نیمی از نور فرودی را عبور می‌دهد و نیمی دیگر را بازمی‌تاباند. در شکل، برای راحتی کار، فرض کرده‌ایم ضخامت آینه ناچیز است. بنابراین، در نقطه M نور به دو موج تقسیم می‌شود 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 می‌رود. این موج‌ها از آینه‌ها کاملاً بازمی‌تابند و در امتداد جهت‌های فرودی خود بازمی‌گردند و سرانجام هر یک وارد دوربین T می‌شوند. آنچه ناظر می‌بیند نقشی تداخلی از فریزهای خمیده یا تقریباً مستقیم است که این آخری شبیه نوارهای روی پوست یک گورخر است.

اختلاف طول مسیر دو موج وقتی دوباره در دوربین با هم ترکیب می‌شوند برابر با $2d_2 - 2d_1$ است، و هر چیزی که این اختلاف طول مسیر را تغییر دهد، موجب تغییر در اختلاف فاز بین این دو موج در چشم می‌شود. مثلاً اگر آینه M_2 به اندازه $\frac{1}{4}\lambda$ حرکت کند، اختلاف طول مسیر به اندازه λ تغییر می‌کند و نقش فریز به اندازه یک فریز جابه‌جا می‌شود (گویی هر نوار تاریک گورخر به محل نوار تاریک مجاور حرکت کرده است). به همین ترتیب، حرکت آینه M_2 به اندازه $\frac{1}{4}\lambda$ موجب جابه‌جایی به اندازه نیم فریز می‌شود (هر نوار تیره گورخر به محل نوار روشن مجاور جابه‌جا می‌شود).



شکل ۱- تداخل سنج مایکلسون که مسیر نوری را نشان می‌دهد که از نقطه P چشمه گسترده نشأت گرفته است. آینه M نور را به دو باریکه تقسیم می‌کند، که از آینه‌های M_1 و M_2 به سمت M و سپس به دوربین T بازمی‌تاباند. ناظر در دوربین فریزهای تداخلی را می‌بیند.

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

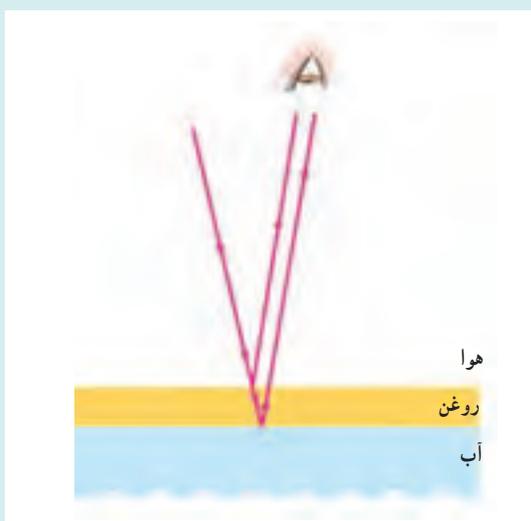
در این فیلم چگونگی آشکارسازی امواج گرانشی در لایگو را می‌بینید.



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 $(n-1) \frac{2L}{\lambda}$ 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.

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 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

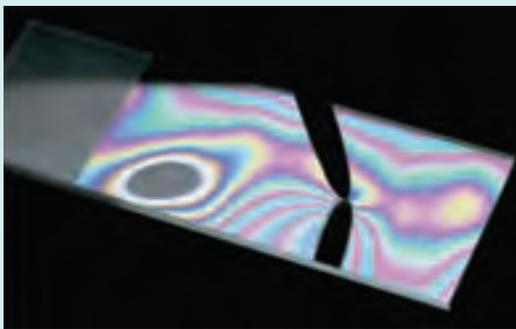
تغییر می‌کند. شاه‌ماهی^۱ نیز از همین ویژگی استفاده می‌کند و خود را به رنگ سفید نقره‌ای می‌نمایاند تا شکارچی‌ها کار سختی در یافتن آن داشته باشد. وقتی به برخی از سوسک‌های آبرزی استوایی^۲ از زاویه خاصی نگاه شود، رنگ‌های زیبایی را نشان می‌دهند. برخی سوسک‌ها از این ویژگی جهت استتار خود استفاده می‌کنند.

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،

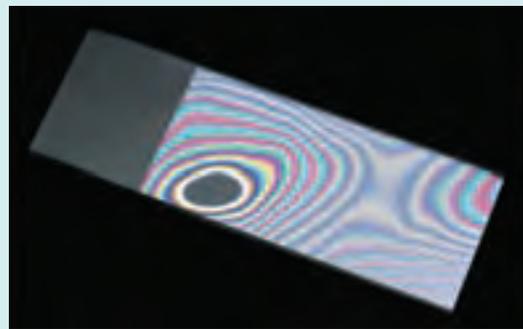
بازتاب‌های حاصل از پوسته‌های متوالی (مثلاً پوسته بالایی و پوسته پایین تر بعدی) به تداخل ویرانگر می‌انجامد و بنابراین شما رنگی آبی از این بال می‌بینید. با تغییر زاویه دید خود، مسیر نوری که به شما می‌رسد را تغییر می‌دهید و این موجب تغییر طول موجی می‌شود که به تداخل سازنده می‌انجامد.

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- Eropal Gyrinid Beetle

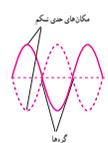


در این فیلم تشریح جامعی از انتشار امواج و برهم کنش‌های آنها را می‌بینید.

شاید از لحاظ اطلاعات عمومی خوب باشد اشاره شود که به این آزمایش، آزمایش ملد (Meld's experiment) می‌گویند. به خصوص اگر دانش‌آموزان بخواهند آن را به عنوان واژه‌ای کلیدی در اینترنت جست‌وجو کنند مفید خواهد بود. در واقع این آزمایش را نخستین بار فیزیکدان آلمانی فرانتز ملد (۱۸۳۲-۱۹۰۱ م.) برای تشکیل موج‌های ایستاده در یک ریسمان انجام داد. در آزمایش‌های اولیه از یک دیپازن به عنوان چشمه نوسانی استفاده می‌شد. همچنین می‌توانید مانند فیلمی که در سایت گروه فیزیک بارگذاری شده است دانش‌آموزان را ترغیب به ایجاد موج‌های ایستاده بکنید.

با راست حرکت نمی‌کنند و محل شکوها و گره‌ها تغییر نمی‌کند. شکل ۳۳-۲. چند عکس در لحظه‌های مختلف از موج‌های تابیده، بازتابیده، و موج برانده آنها را نشان می‌دهد. از روی شکل درمی‌یابیم که فاصله گره‌های مجاور از هم برابر با نصف طول موج (λ/۲) و بنابراین فاصله گره‌ها از شکهای مجاور برابر با ربع طول موج (λ/۴) است. شکل ۳۳-۳. طرحی از موج ایستاده در این ریسمان را نشان می‌دهد که در آن حالت‌های مختلف ریسمان در لحظات مختلف شکل ۳۳-۲ دیده می‌شود. اگر در شکل ۳۳-۲ به موج‌های تابیده و بازتابیده در مکان گره‌ها و در لحظه‌های مختلف نگاه کنیم، می‌بینیم که در تمام لحظات وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در هر یک از گره‌ها به گونه‌ای است که یکدیگر را حذف و اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند (تداخل ویرانگر). در این حالت اصطلاحاً می‌گویم این دو موج در این نقطه ها (گره‌ها) کاملاً باهم فاز (در فاز مخالف) اند. اما در مکان هر یک از شکوها وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در تمام لحظات به گونه‌ای است که همدیگر را تقویت می‌کنند (تداخل سازنده). در این حالت اصطلاحاً می‌گویم این دو موج در این نقاط هم‌فازند.

پسامدهای تشدید تار: شکل ۳۴-۱. تصویری واقعی از اسباب آزمایشی را نشان می‌دهد که در آن تازی کشیده شده، از یک سر به یک مولد نوسان و از سر دیگر به گره‌ای متصل است. به‌ازای بسامدهای معینی از مولد نوسان، تداخل موجب ایجاد موج ایستاده بارزی (با اصطلاحاً یک‌گانه نوسان) در تار می‌شود. گفته می‌شود تار در این بسامدهای معین که بسامدهای تشدید می‌خواند می‌نویسد. به تشدید درآمده است. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدید می‌نوسان کند موج ایستاده بارزی ایجاد نمی‌شود.

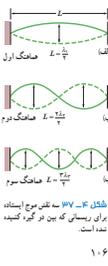


شکل ۳۳-۳. شکل یک موج ایستاده که با گره‌ها و شکوها بر یک ریسمان نشان داده شده است. هر دو سمت در رسم موج‌های ایستاده، دو مکان‌های شکوه نشان داده شده.

شکل ۳۴-۱. اسباب آزمایشی برای ایجاد موج ایستاده در تار کشیده. توجه کنید سری که مولد نوسان متصل است، تقریباً در محل گره واقع است.

توجه کنید که اگرچه در این آزمایش از یک نوسان‌ساز الکتریکی برای ایجاد ارتعاش در تار استفاده کرده‌ام، اما در سازهای موسیقی، موج‌های ایستاده را می‌توان با ضربه زدن بر تارها (مانند سنتور، سه‌تار، پیانو) و پوسته‌ها (مانند طبل، دف، تنبک)، و با دمیدن در ستون‌های هوا (مانند نی، فلوت، آرنج) ایجاد کرد.

در آزمایش نشان داده شده در شکل ۳۴-۲، و در بسامدهای تشدید می‌تار، ساده‌ترین نقش موج ایستاده فقط یک شکم دارد که در مرکز ریسمان واقع است (شکل ۳۴-۲ الف). نقش ساده بعدی وضعیتی است که سه گره و دو شکم داریم (شکل ۳۴-۲ ب). نقش سوم، چهار گره و سه شکم دارد (شکل ۳۴-۲ ج). در حالت کلی اگر طول این تار را با L نشان دهیم برای نقش موج ایستاده‌ای با



در اینجا خوب است تأکید شود که اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدید می‌نوسان کند موج ایستاده بارزی تشکیل نمی‌شود. شکل زیر برای درک این موضوع بسیار آموزنده است.



در حالی که به ازای بسامدی تشدید می‌نوسان، f_0 ، $2f_0$ و $3f_0$ موج‌های ایستاده بارزی در یک تار ایجاد شده‌اند، به ازای بسامد غیر تشدید می‌نوسان $1/1 f_0$ موج ایستاده بارزی تشکیل نشده است.

در این فیلم می‌بینید که چگونه می‌توان موج‌های ایستاده را به‌سادگی ایجاد کرد.



در این فیلم آزمایشی مشابه را برای تشکیل گره و شکم می‌بینید.



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 ۴ برهم کنش های موج

n تکرار داریم :

و در نتیجه :

$$L = n \left(\frac{\lambda}{2} \right)$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4-4)$$

بنابراین بسامدهای تشدید متنظر با این طول موج ها چنین می شود :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5-4)$$

توسان 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 ... به دست می آید. به n عدد هماهنگ گفته می شود.

مثال ۳-۴

طول یکی از تارهای پیانو ۱/۱۰ m و جرم آن ۹/۱۰ g است. اگر بسامد اصلی این تار ۱۳۱ 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 :

$$f_n = \frac{nv}{2L} \Rightarrow (131 \text{ Hz}) = \frac{(1)v}{2(0/11 \text{ m})} \Rightarrow v = 288.2 \text{ m/s} = 288 \text{ m/s}$$

ب) از رابطه ۵-۴ استفاده می کنیم.

$$v = \sqrt{\frac{F}{m}} \Rightarrow \sqrt{\frac{F}{(9/10 \times 10^{-3} \text{ kg})}} = 288.2 \text{ m/s} \Rightarrow \sqrt{\frac{F(0/11 \text{ m})}{(9/10 \times 10^{-3} \text{ kg})}} = 288.2 \text{ m/s} \Rightarrow F = 679/6 \text{ N} = 680 \text{ N}$$

ب) بیهی است که بسامد هماهنگ اول همان بسامد اصلی است و بنابراین $f_1 = 131 \text{ Hz}$ ، بسامد هماهنگ های بعدی طبق رابطه ۵-۴، به ازای $n = 2$ ، $n = 3$ ، و $n = 4$ به دست می آید و بنابراین $f_2 = 262 \text{ Hz}$ ، $f_3 = 393 \text{ Hz}$ و $f_4 = 524 \text{ Hz}$.

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 266 N قرار دارد. این تار در هنگام ارتعاش، شش با بسامد 164 Hz را ایجاد می کند که بسامد اصلی تار است. الف) طول تار را به دست آورید. ب) پس از مدتی که یک ترازنده، این گیتار را می ترازد، 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؟

پس پرسش ۵-۴ الف) چرا با سخت کردن سیم گیتار، بسامدی که هنگام نواختن می شنوید زیاد می شود؟ ب) چرا ترازندگان گیتار شش از نواختن روی صفحه نمایش، گیتار را به حد کافی می ترازند 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 رسیم و از آنجا

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

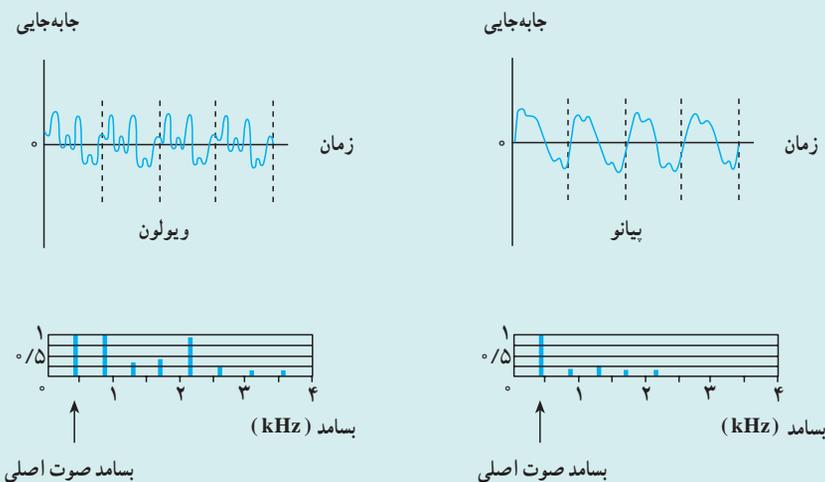
زیاد می شود و بنابراین بسامد گسیل یافته تغییر محسوسی نمی کند.

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 مشخصه 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 دامنه هماهنگ‌ها به دامنه صوت اصلی نیز آمده است. در هر دو مورد، بسامد صوت اصلی 440 هرتز است. ولی تعداد و دامنه 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 دامنه 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 دو نت 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 مقادارهای $146/81, 163/13, 174, 195/75, 217/5, 244/69$ هرتز به دست می آیند. هر یک

از این نت ها اکتاو نت متناظر در گام اول است (چرا؟) به همین ترتیب برای گام سوم به ترتیب مقادارهای $261, 293/6, 326/25,$

$348, 391/5, 435, 489/38$ 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 و ایده 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 تشدیدی، می‌گویند. وقتی شما برخی از این بسامدها را می‌شنوید می‌توانید از روی هر یک از آنها مُد متناظر آنها را بگویید. افزون بر این، اگر اتفاقاً چگالی و کشش تار را از قبل بدانید، می‌توانید از روی پایین‌ترین بسامد طول تار را نیز بگویید. یک پوست طبل صاف مدهای تشدیدی و بسامدهای هماهنگ مشابهی دارد. اما، این مدها با توجه به این واقعیت که پوست طبل دوبعدی است پیچیده‌تر می‌شوند. برای طبل‌های دایره‌ای کار آسان است، 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.



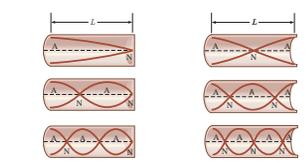
۱- این مقاله تحت عنوان «Can One Hear the Shape of a Drum» نوشته Mark Kac در اینترنت موجود است. تاکنون به این مقاله «۱۸۶» بار ارجاع داده شده است.

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.



موج ایستاده و تشدید در لوله های صوتی : در مورد ریسمان کشنده 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 کشنده اگر طول لوله مضرب های مبتنی از طول موج صوتی باشد، برهم نهی موج های پیش رونده در جهت های مخالف، نقش موج ایستاده 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 $\frac{\lambda}{2}$ و فاصله گره ها از شکم های مجاور برابر $\frac{\lambda}{2}$ 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 شکمها با $\frac{\lambda}{2}$ گره ها با $\frac{\lambda}{4}$ مضرب شده اند.
شکل ۳۹-۴ سه مد نخستین یک لوله صوتی با یک انتهای باز شکمها با $\frac{\lambda}{4}$ گره ها با $\frac{\lambda}{2}$ مضرب شده اند.

توسعه ۴-۳

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیوارهای قائم مثل لیوان یا برج می ریزید، بسامد صدای که می شنوید افزایش می یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می شنوید (از صدای صدای حاصل از بریدن ظرف 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 صدای بدون آن انتها قرار دارد که در آن کتاب آن در نظر گرفته می شود.

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 لوله‌ی روبین را می‌بینید.



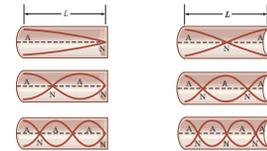
در این فیلم لوله‌ی روبین دو بعدی یا تخته‌ی پایرو را می‌بینید.

خوب است با مثال‌هایی که جنبه‌ی 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 لوله‌ی صوتی یک سر باز است.



فیزيك ۳۱

موج ایستاده و تشدید در لوله‌های صوتی: در مورد رسانان کشنده دخیم چگونه برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف تنش 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 بازمی‌گردند، حتی اگر آن انتها باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می‌دهد). درست مانند تار کشنده اگر طول لوله مضرب‌های معینی از طول موج صوتی باشند، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، تنش موج ایستاده‌ی بزرگی را در لوله ایجاد می‌کند. بسیاری از مشخصه‌های این موج ایستاده مشابه موج‌های ایستاده در رسانان است؛ انتهای بسته لوله مانند انتهای ثابت بند رسانان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد. همچنین فاصله گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصله گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۳۸-۴ تنش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۳۹-۴ این تنش 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 هر دو انتهای باز (شکل‌ها با λ مشخص شده‌اند).
شکل ۳۹-۴ سه مد نخستین یک لوله صوتی با یک انتهای باز (شکل‌ها با λ مشخص شده‌اند).

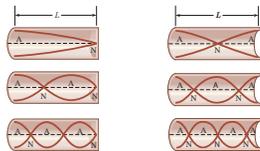
توسعه ۴-۶

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 زیرتری را می‌شنوید؟ (رضمنظری: صدای حاصل از برشیدن ظرف گستره وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین‌ترین بسامد تشدید می‌شود. صدای درون ظرف - بسامد مد اول - متعلق است.)

^۱ البته برای انتهای باز یک لوله صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدید، شکم‌های موج در آن انتها قرار دارد که در این کتاب آن را در نظر نمی‌گیریم.
^۲ حالت‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید 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 می‌گیرد.

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 انتها باز می یابند و به درون لوله بازمی گردند، 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 معینی از طول موج صوتی باشند، برهم نهی موج های پیش رونده در جهت های مخالف، قش موج ایستاده یازاری 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 ۳۸-۲ قش چنین موج ایستاده ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۳۸-۳ این قش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است.



شکل ۳۸-۲ سه مد نخستین یک لوله صوتی با دو انتهای باز (شکوها با A و گره ها با N مشخص شده اند)

پوستی ۳۸-۳
چرا وقتی آند را به درون طرفی یا دیواره های 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 برشیدن ظرف گشتره 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 گره صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت های تشدید، شکم آندی بیرون از این انتها قرار دارد که در این کتاب از آن نظر نمی گردد.
۲- مشخصه های مربوط به قش های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نیامده مورد ارزشمندی قرار گیرد.

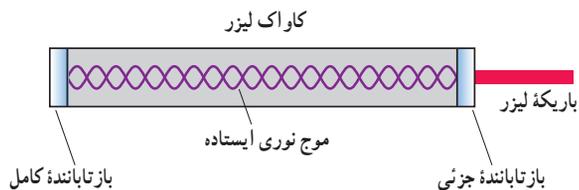
خوب است در اینجا به یک تداخل در یک بُعد دیگر نیز که مربوط به امواج الکترومغناطیسی است و بعداً دانش آموزان به ترتیبی دیگر با آن نیز آشنا می شوند اشاره کرد. به عبارتی امواج الکترومغناطیسی ایستاده را می توان میان دو آینه موازی که نور را به جلو و عقب بازمی تابانند نیز ایجاد کرد. این آینه ها مشابه دو انتهای 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

$$n = \frac{2L}{\lambda} = \frac{2 \times 30 \times 10^{-2} \text{ m}}{600 \times 10^{-9} \text{ m}} = 10^6$$

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.



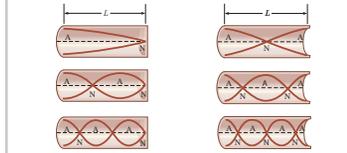
یک کاواک لیزر شامل یک موج نوری ایستاده بین دو آینه موازی است.

پاسخ پرسش ۴-۶

باریختن آب، فضای هوای داخل ظرف کمتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴-۲۹ کتاب دیده می‌شود، هرچه فضای هوای داخل کمتر شود، طول موج‌های تشدید می‌گردند و بنابراین بسامدهای تشدید بیشتر 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 کشنده 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 می‌مانند و به درون لوله بازمی‌گردند. حتی اگر آن‌ها تنها باز باشند (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می‌دهد). درست مانند تار کشنده اگر طول لوله مضرب‌های معینی از طول 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 پایه یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد. همچنین فاصله گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصله گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل ۴-۳۸ نقش چنین موج ایستاده‌ای در یک لوله با دو انتهای باز و در شکل ۴-۳۹ این نقش در یک لوله با یک انتهای باز، برای سه مد اول رسم شده است.



شکل ۴-۳۸ سه مد نخستین یک لوله صوتی با دو انتهای باز (شکم‌ها با $\lambda/4$ فاصله هستند).
شکل ۴-۳۹ سه مد نخستین یک لوله صوتی با یک انتهای باز (شکم‌ها با $\lambda/4$ فاصله هستند).

پرسش ۴-۳

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دو دره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزید، بسامد صدایی که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنوید؟ (از فصلی: صدای حاصل از پرشدن 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 - منطبق است.)

۱- البته برای انتهای باز یک لوله صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدید، شکم‌های بزرگ‌تری در انتهای باز دارد که در آن شکم‌ها در هر لحظه حرکت می‌کند.
۲- جملات مربوط به لوله‌های صوتی خارج از انحصار آزمون این کتاب است و باید مورد ارجاسی قرار گیرد.

دانستنی برای معلم

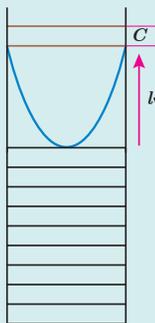
تصحیح دهانه لوله

همان‌طور که در پانویس 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

$$l = (2n-1) \frac{\lambda}{4} \quad \text{و به ازای} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

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:

$$l = 2n \frac{\lambda}{4} \quad \text{و} \quad \text{به ازای} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

در اینجا نیز می توانیم با طول های تصحیح شده برای دو نخستین مُد نوسان، c را به دست آوریم:

$$\frac{2\lambda}{4} = l_1 + 2c$$

$$\frac{4\lambda}{4} = l_2 + 2c$$

و

$$c = \frac{l_2 - 2l_1}{2} \quad \text{و از آنجا}$$

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 دانش‌آموزان با دانش قبلی‌ای که دارند درک بهتری از مفاهیم این بحث پیدا کنند.



شکل ۳-۴: برهم‌کنش‌های موج

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز: اگر در دهانهٔ باریک یک بطری بدمید، می‌تواند آن را به صدا درآورید (شکل ۳-۴). در واقع یک بطری مانند یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدیدي معینی دارد. وقتی در دهانهٔ یک بطری می‌دمید گسترهٔ وسیعی از بسامدها ایجاد می‌شود. حال اگر یکی از این بسامدها یا یکی از بسامدهای تشدیدي بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می‌شود. البته نوسان‌های بطری دقیقاً مانند نوسان‌هایی هستند که در یک لولهٔ صوتی ساده ایجاد می‌شود، زیرا بطری یک گردن دارد و هوای موجود در این گردن با هوای موجود در بقیهٔ قسمت‌های بطری چیزی موسوم به **تشدیدگر هلمهولتز** را تشکیل می‌دهد که این موجب نوسانات هوای درون بطری می‌شود. نوع اولیهٔ تشدیدگر هلمهولتز که‌هایی توخالی با دهانه‌ای باز به شکل یک گردن است که در سال ۱۸۵۰ میلادی توسط دانشمند آلمانی، هرمن فون هلمهولتز، ساخته شد (شکل ۳-۴). تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدیدي معینی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدیدي آنها باشد، تشدیدگر باسج قوی‌تری به این صوت می‌دهد.

شکل ۳-۴: با دمیدن در دهانهٔ یک بطری، می‌تواند آن را به صدا درآورد.

شکل ۳-۴: طرحی از تشدیدگر اولیهٔ هلمهولتز و یک تصویر از چه تشدیدگر هلمهولتز گازی با اندازه‌های متفاوت

شکل ۳-۴: (الف) لوله‌های مختلف با طول‌های مختلف، (ب) تشدیدگر هلمهولتز با طول‌های مختلف، (ج) تشدیدگر هلمهولتز با طول‌های مختلف.

فعالیت ۳-۴

یک بلندگو را در برابر دهانهٔ یک تشدیدگر هلمهولتز با بسامدهای تشدیدي معینی قرار دهید و جوی زامهٔ خروجی آن یک شمع روشن یا یک فرقهٔ کوچک و کواصطفاک بگذارید. بسامد صوت ایجاد شده توسط بلندگو را در نزدیکی بسامد تشدیدي تشدیدگر آن قدر کم و زیاد کنید تا شعلهٔ شمع، منحرف شود و یا فرقه شروع به چرخیدن کند. در صورتی که شمع صوتی با بسامد قابل تنظیم ندارید می‌توانید از چند دیپازون با بسامدهای معلوم و متفاوت، که بسامد یکی از آنها با یکی از بسامدهای تشدیدي تشدیدگر برابر باشد، استفاده کنید. دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

۱- می‌تواند از رانده‌هایی با فرکانس‌های Sound Generator و Signal Generator، Function Generator، Audio Generator که روی گوشی همراه نصب می‌شوند نیز به عنوان منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم استفاده کند.

۱-۹

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 شنوایی‌سنجی انجام دهد.

محض اطلاعات عمومی خوب است بدانید رابطهٔ بسامد f با قطر دهانه در تشدیدگر هلمهولتز از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$f = \frac{nv}{2(L + \frac{1}{2}d)}$$

که در آن L طول لوله، v تندی صوت در هوا، و d قطر دهانهٔ تشدیدگر است.

فصل ۴- برهم کنش های موج

هرمن فون هلمهولتز (۱۸۱۷-۱۸۹۴ م)
 از آلمان و بنیانگذار رشته فیزیک به حساب می آید. او در زمینه فیزیک و مهندسی در حد بسیار بالایی توانایی داشت و به همین دلیل به او لقب «پادشاه فیزیک» داده اند. او در سال ۱۸۶۲ دانشیار فیزیولوژی دانشگاه گوتینگن شد. در سال ۱۸۵۵ به دانشگاه اشتراسمبرگ در آلمان و فیزیولوژی استاد شد. در سال ۱۸۶۱ به دانشگاه هومبولت برلین منتقل شد. او در سال ۱۸۶۳ به دانشگاه هومبولت برلین منتقل شد. او در سال ۱۸۶۳ به دانشگاه هومبولت برلین منتقل شد. او در سال ۱۸۶۳ به دانشگاه هومبولت برلین منتقل شد.

شکل ۴-۳ با دین در دهانه یک بطری می‌تواند آن را به صدای دراز تبدیل کرد. این تصویر از پدیده تشدیدگر هلمهولتز برای اندازه‌گیری تفاوت

شکل ۴-۴ الفبا طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و بیا تصویر از پدیده تشدیدگر هلمهولتز برای اندازه‌گیری تفاوت

فعالیت ۴-۳
 یک بشکه را در برابر دهانه یک تشدیدگر هلمهولتز با بسامدهای تشدید معین قرار دهید و جلی را تا عمق خروجی آن یک شمع روشن یا یک فرفره کوچک و کرماسطکاف بگذارید. بسامد صوت ایجاد شده توسط بلندگو را در نزدیکی بسامد تشدید تشدیدگر آن قدر کم و زیاد کنید تا بسامد تشدید متحرک شود و با فرفره شروع به چرخیدن کند. در صورتی که بسامد صوتی با بسامد قابل تنظیم تغییر می‌تواند از چند دایزون با بسامدهای معلوم و متفاوت، که بسامد یکی از آنها با یکی از بسامدهای تشدید تشدیدگر برابر باشد، استفاده کنید. دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

۱- سر تونل از برده‌های با دینامی Audio Generator، Function Generator، Signal Generator و Sound Generator که روی فرس هراب می‌شوند نیز به عنوان منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم استفاده کنید.

پاسخ فعالیت ۴-۳

همان طور که در متن درس نیز اشاره شده است یک تشدیدگر هلمهولتز بسامدهایی تشدید دارد و اگر بسامد صوت ایجاد شده 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 هلمهولتز گذرگاهی برای انتقال تلاطم ایجاد شده در درون تشدیدگر به فضای بیرون است.

در این فیلم آزمایش تشدید در تشدیدگر هلمهولتز را با دستگاه مولد نوسان می‌بینید.

فیلم

دانشتنی برای معلم

سی‌شی‌ها، پارادوکس بندرگاه و مشابهت آن با بطری هلمهولتز وقتی یک ظرف درباز، مثل کاسه‌ای حاوی آب را قدم‌زنان حمل می‌کنید، مایع شروع به چلپ و چلپ می‌کند. ولی حتماً متوجه شده‌اید که گاهی چنان چلپ و چلپ 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 به صورت افقی و عمودی حرکت کند. یعنی، امواجی در سطح مایع شکل می‌گیرند. اکثر امواج به صورت تصادفی تداخل می‌کنند و امواج ایستاده را تشکیل می‌دهند که در آنها نقش نوسان‌های عمودی تکرار می‌شود. برخی نقاط بیشترین نوسان را دارند و برخی کلاً فاقد هرگونه نوسانی هستند. بسامد اصلی (پایه) نوسان به ابعاد افقی ظرف و عمق آب بستگی دارد. وقتی بسامد قدم‌های شما تقریباً با بسامد اصلی برابر شود، تشدید رخ می‌دهد و در این وضعیت چلپ و چلپ 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. به عنوان یک آزمایش جالب می‌توانید با چوب پارویی پهنی نیز به گونه‌ای دیگر این پدیده را مشاهده

کنید. چوب پارویی پهن را در آب وان حمام جلو و عقب بپريد و باعث چلپ و چلوپ آب آن شويد. آنقدر بسامد حرکت پارو را تغيير دهيد تا آنکه بسامد اصلي نوسان را به دست آوريد. 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 بپرند می توانند مُد اصلي نوسان را ایجاد کنند و آب را به چلپ و چلوپ بارزی در آورند.

بندرگاه ها و آبگیرهای کشندی نیز اگر توسط جزر و مد یا آشفته گي های 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 ۴-۷

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 می متفاوتی نیز دارند (هرچه سطح مایع درون ظرف ها بالاتر و حجم فضای بالای آنها کمتر باشد بسامد تشدید می 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 می بطری ها منطبق می شود و هر بطری با بسامد متفاوتی به صدا در می 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

فیلمک ۳۱

پرسش ۴-۷

با دمیدن در بطری های بکسان با سطوح مایع مختلف می توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد. دلیل آن چیست؟



فناوری و کاربرد امواج ایستاده در اجاق های میکروموج



تصویری یک نمی 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 یا پره های با مویزهای تابیده، موج های ایستاده ای را در داخل محفظه اجاق ایجاد می کنند که از گره ها و شکلهای تشکیل شده اند. در محل شکلهای دامنه نوسان میدان الکتریکی بیشینه است. مولکول های آب موجود در مواد غذایی در این نقاط پهنند

به ارتفاعی در می 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 شود و در گره ها اصطلاحاً نقاط سرد داریم. بنابراین غذا به طور یکساخت 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 ۴-۷

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.

پاسخ فعالیت ۷-۴

نوسانگر هرتز در شکل الف نشان داده شده است. 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 ایستاده 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 مغناطیسی بر گره های موج ایستاده میدان الکتریکی منطبق می شود و بالعکس. حال اگر حلقه آشکارساز در گره موج ایستاده 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 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.

فیزیک ۳

پوشش ۷-۴



با دیدن در طری های یکسان با سطوح مایع مختلف می توان آنکی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد. دلیل آن چیست؟

فناوری و کاربرد امواج ایستاده در اجاق های میکروویو

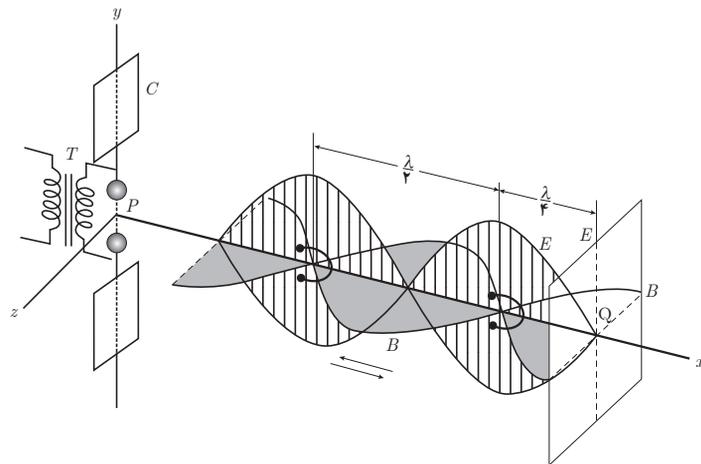


تصویری یک نوعی از اجاق امواج ایستاده در داخل یک اجاق میکروویو

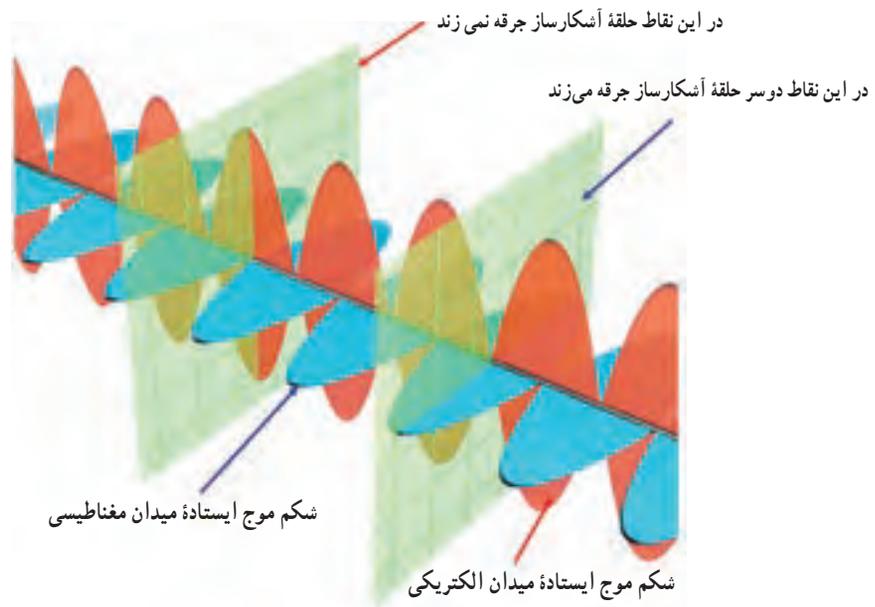
اجاق های میکروویو (مایکروفر) بر اساس تداخل امواج الکترومغناطیسی و تشکیل امواج ایستاده کار می کنند. بسامد امواج ایستاده ایجاد شده در این اجاق ها ۲۴۵۰ GHz و طول موج آنها حدود ۱۲cm است. میکروویوهای بازتابیده از دیوارهای فلزی اجاق یا پره های یا موج های تابیده، موج های ایستاده ای را در داخل محفظه اجاق ایجاد می کنند 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 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 شود و در گره ها اصطلاحاً نقاط سرد داریم. بنابراین غذا به طور یکجواخت پخته یا گرم نمی شود. به همین دلیل اجاق های میکروویو صفحه های گردانی دارند تا با گرداندن غذا در اجاق، 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 آزمایش ها تا زمانی که تداخل خود که به تولد 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 مثلثی 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؟



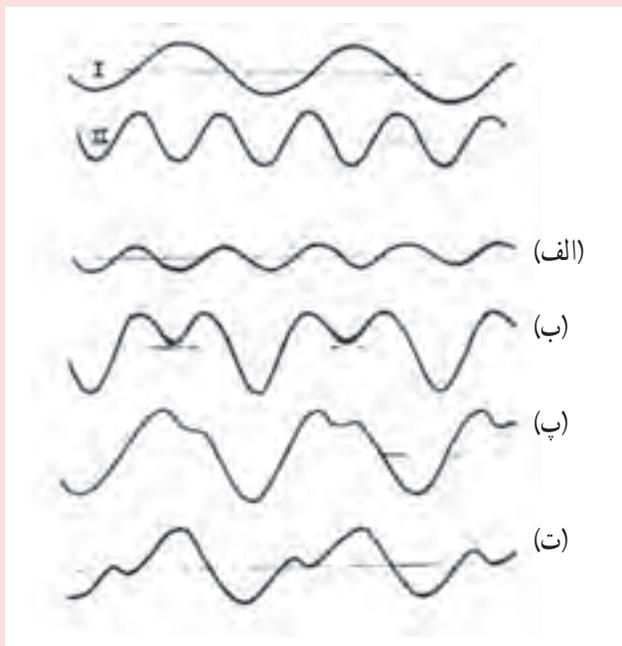
پاسخ : صفر

۲ دیابازنی 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؟

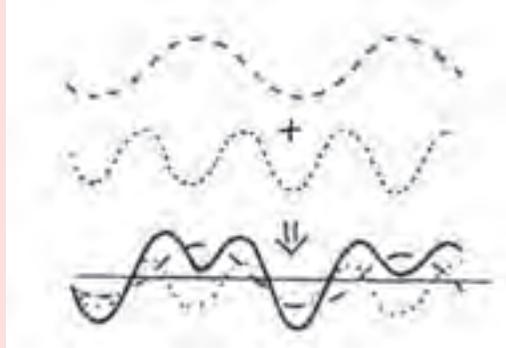
پاسخ : در ارتفاع خاصی از آب، صدای دیابازن به طور قابل ملاحظه ای شدید خواهد شد. زیرا بسامد نوسان طبیعی ستون هوا در لوله با بسامد دیابازن یکی می گردد.

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؟

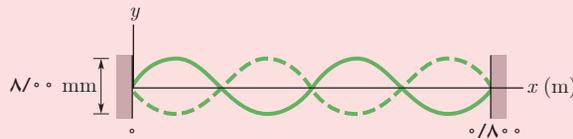


پاسخ: شکل ب. زیرا تقریباً از برهم نهی چنین چیزی حاصل می‌شود.



تمرین پیشنهادی

۱ الف) شکل زیر نقشی از نوسان‌های تشدید تار به طول $L = 0.800 \text{ m}$ و جرم $m = 2/500 \text{ g}$ را نشان می‌دهد که تحت کشش 325 N قرار دارد. الف) طول 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 $L = 0.800 \text{ m}$ تار نشان می‌دهد. بنابراین داریم:

$$2\lambda = L$$

و یا

$$\lambda = \frac{L}{2} = \frac{0.800 \text{ m}}{2} = 0.400 \text{ m}$$

با شمردن تعداد حلقه‌ها (یا نیم - طول موج‌ها) در شکل درمی‌یابیم که عدد هماهنگ $n=4$ 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:

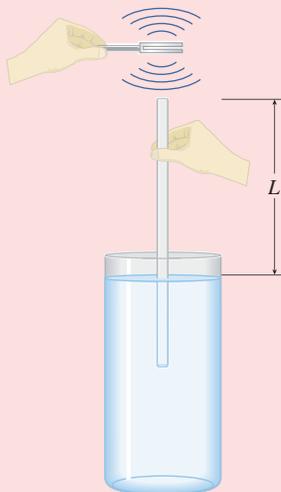
$$f = n \frac{v}{2L} = 4 \frac{322/49\text{ m/s}}{2(0.800\text{ m})} \approx 806\text{ Hz}$$

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 انتهایی 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.

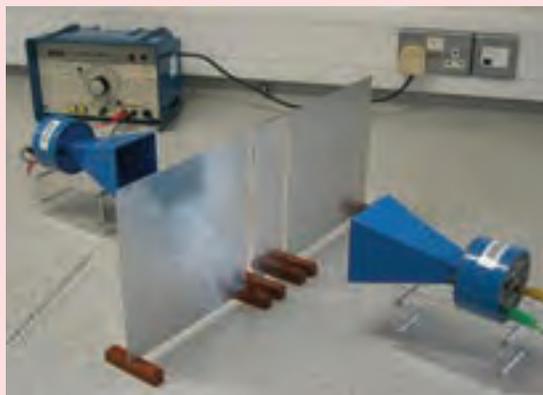


۲ بررسی پدیده تشدید در لوله‌های صوتی باز

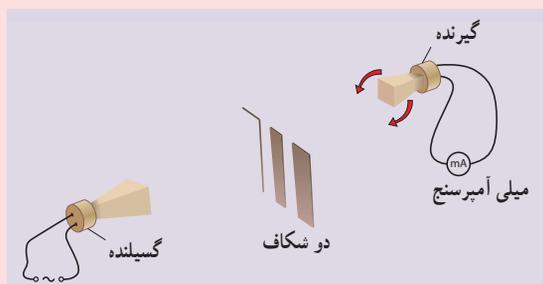
دو لوله دوسر باز را انتخاب کنید که یکی بتواند در داخل دیگری بالا و پایین برود. در این صورت می‌توان طول لوله را به دلخواه تغییر داد و آن را طوری تنظیم کرد که هوای درون لوله بر اثر ارتعاشات شاخه دیاپازن به تشدید درآید. در این صورت با توجه به اینکه همیشه دو سر لوله باز محل تشکیل شکم نوسان‌ها است، طول لوله 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

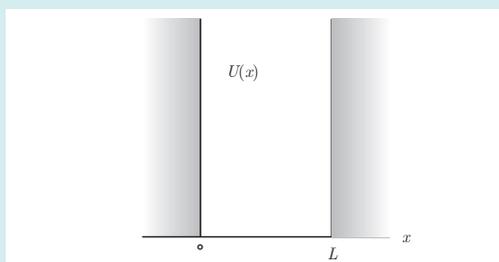
۴ لوله روبین

با کمک دیر 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، بدندانستم پایان مباحث فصل ۴ را به رهیافتی اختصاص بدهم که برخی کتابها 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 آنهاست 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

و پیش‌تر دیدیم که $\lambda = h / \sqrt{2mE}$ است. بنابراین خواهیم داشت

$$E_n = \left(\frac{h^2}{8mL^2} \right) n^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

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 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:

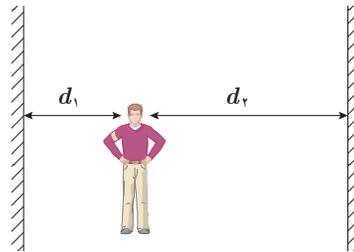
$$y_n = A \sin(n\pi x / L), \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

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:

$$2d_1 = vt_1 \quad , \quad 2d_2 = vt_2$$

(الف) تندی صوت را از رابطه اول به دست می آوریم

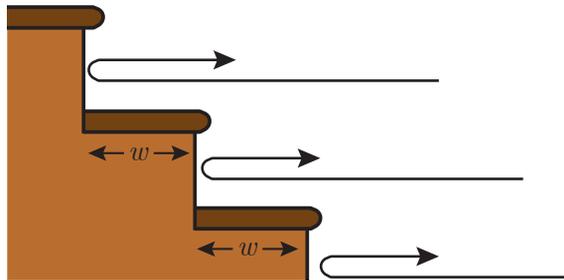
$$v = \frac{2d_1}{t_1} = \frac{48 \cdot m}{1/5^{\circ}s} = 32 \cdot m/s$$

(ب) اکنون با دانستن تندی v می توانیم با استفاده از رابطه دوم، d_2 را محاسبه کنیم:

$$d_2 = \frac{vt_2}{2} = \frac{(32 \cdot m/s)(2/5^{\circ}s)}{2} = 40 \cdot m$$

پس فاصله بین دو صخره $d = d_1 + d_2 = 64 \cdot m$ 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 $w = 0.75^{\circ}m$ باشد، بسامد ادراکی

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v}{2w} = \frac{34 \cdot m/s}{2(0.75m)} = 2/27 \times 10^2 \text{ Hz} \approx 2/3 \times 10^2 \text{ Hz}$$

پرسش ها و مسئله های فصل ۴

۳-۴ شکست موج

۱. دانش آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیک تر $22 \cdot m$ است. دانش آموز فریاد می زند و اولین پژواک صدای خود را پس از $1/5^{\circ}s$ و صدای پژواک دوم را $1/3^{\circ}s$ بعد از پژواک اول می شنود.

(الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟
(ب) فاصله بین دو صخره را بیابید.

۲. اگر در فاصله مناسبی از یک رسته پلکان بنشینید و یک بار تکف زنده، پژواکی بیشتر از یک صدای بوم زدن دست می شنوید. نمونه جالبی از این پدیده در پل رسته بهای معبد قدیمی کورکوکان در مکزیک رخ می دهد. این معبد از ۹۲ پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کورکوکان

۳. ضرب تکست آب $1/3$ و ضرب تکست نیشته $1/5$ است.

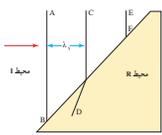
اگر توری به طور مایل از آب به مرز نیشته با آب بنهد، با رسم نموداری، جهه های موج را در محیط نشان دهید.

۴. شکل زیر جهه های موجی را نشان می دهد که بر مرز بین محیط A و محیط B فرود آمده اند.

(الف) ادامه جهه موج EF را در محیط B رسم کنید.

(ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.

(ج) آیا با استفاده از این نمودار می توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟



Kukulcan Temple

برش‌ها و هسته‌های فصل ۴

۳-۴ شکست موج

۱. دانش‌آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیکتر ۲۴۰ م است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از ۱۵ ثانیه و صدای پژواک دوم را ۱۰ ثانیه بعد از پژواک اول می‌شنود.
الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟
ب) فاصله بین دو صخره را بیاید.

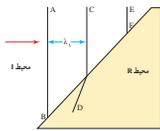
۳-۵ بازتاب موج

۱. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیبدار، تغییر می‌کند.
۲. شکلی زیر بر روی را نشان می‌دهد که از هوا وارد نشسته شده است. کدام گزینه‌های A، B، C، D می‌تواند تندی داخل نشسته را نشان دهد؟
۳. اگر در فاصله تناسلی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار تک بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای بوم زدن دست می‌شنوید. نمونه جالبی از این پدیده در برابر رشته به‌های معدنی قدیمی کوه‌گراگان در مکزیک رخ می‌دهد. این معدن از ۹۲ پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.

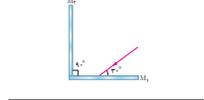


تصویری از معدن کوه‌گراگان

۴. ضربت تکست آب ۱۷۳ و ضربت تکست نشسته ۱۱۵ است. اگر توری به‌طور مایل از آب به مرز نشسته با آب بناید، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.
۵. شکلی زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط A و محیط B فرود آمده‌اند.
الف) ادامه جبهه موج EF را در محیط B رسم کنید.
ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.
ج) با A یا استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟



۶. وقتی یک پارکله فز را به دیوار کلاس می‌تابانید، همه دانش‌آموزان فقط رنگ ایجاد شده روی دیوار را می‌بینند. دلیل آن چیست؟
۷. در شکلی زیر برتوهای بازتابیده از آب‌های تخت M₁ و M₂ را رسم کنید.



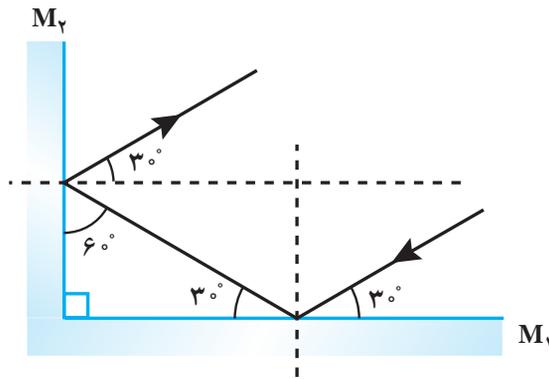
Kukulcan Temple

یا به عبارتی 23° Hz می‌شود. این صدا به‌صورت رشته‌ای دوره‌ای از تپ‌ها بازمی‌گردد و مانند یک نت نواخته شده درک می‌شود. بدیهی است اگر پهنای پله‌ها کوچک‌تر باشد، با توجه به اینکه $f \propto \frac{1}{w}$ است، بسامد ادراک‌شده بیشتر می‌شود.

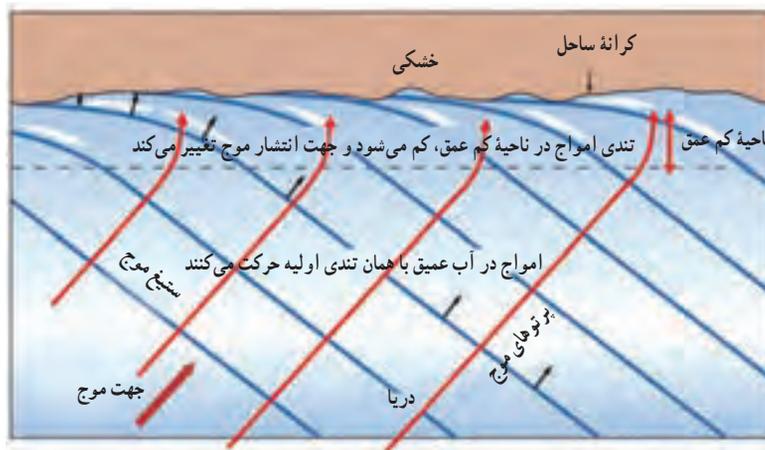
البته در واقع امر، مسیر تپ‌های متوالی که هر کدام از یک پله نشأت گرفته‌اند، موازی نیست و بسامد ثابتی را برای رشته تپ‌های متوالی درک نمی‌کنید؛ بلکه گستره‌ای از بسامدها را درک می‌کنید که به تدریج کم می‌شوند. به‌طوری که بسامد دریافتی از پله‌های پایینی (که تپ‌های بازتابیده از آنها را زودتر می‌شنویم) بیشتر از بسامد دریافتی از پله‌های بالایی است (که تپ‌های بازتابیده از آنها را دیرتر می‌شنویم) و بدین ترتیب صدا را به‌صورت رشته‌ای دوره‌ای از تپ‌ها می‌شنوید.

همان‌طور که در متن کتاب اشاره شد، این ناشی از بازتاب پخشنده است.

شکلی مانند شکل زیر خواهیم داشت.



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

۴-۳ بازتاب موج

۱. دانش آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیکتر ۲۲۰m 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 بیاید. ج) اگر در فاصله تناسلی از یک رشته یکان بند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای بوم زدن دست می شنود. نمونه جالبی از این پدیده در برابر رشته بهای معبد قدیمی کورنگکان در مکزیک رخ می دهد. این معبد از ۹۲ پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.

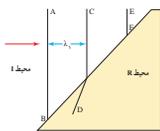
۴-۴ شکست موج

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. شکلی زیر بر روی را نشان می دهد که از هوا وارد تیشه شده است. کدام گزینه های A، B، C، D می تواند بر روی داخل تیشه را نشان دهد؟

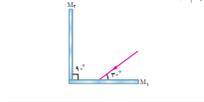


تصویری از معبد کورنگکان

۳. ضربت تکست آپ ۱۷۳ و ضربت تکست تیشه ۱۷۵ است. اگر توری به طور مایل از آب به مرز تیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه های موج را در دو محیط نشان دهید. ۴. شکلی 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. ج) آیا با استفاده از این نمودار می توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟

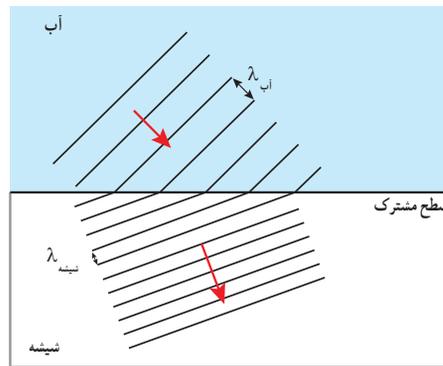


۵. وقتی یک پارکة افروز را به دیوار کلاس می تابانید، همه دانش آموزان نقطه رنگی ایجاد شده روی دیوار را می بینند. دلیل آن چیست؟ ۶. در شکلی زیر برتوهای پرتابیده از آبهای تخت M₁ و M₂ را رسم کنید.



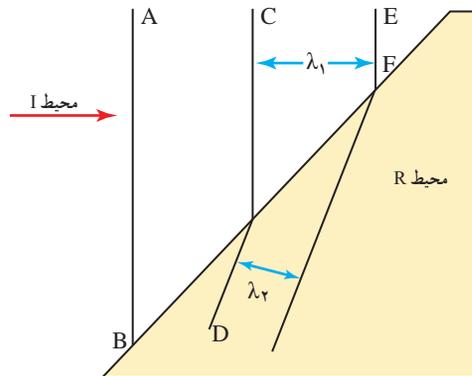
۶ شیشه ضریب شکست بزرگ تری نسبت به هوا دارد. بنابراین انتظار می رود که پرتوی شکسته شده در شیشه به خط عمود نزدیک شود. بنابراین پرتوی A نمی تواند درست باشد، زیرا از خط عمود دور شده است. اگر نور از شیشه وارد هوا می شد، این گزینه درستی بود. پرتوی B نیز پاسخ درستی نیست، زیرا این پرتو خم نشده است و در امتداد پرتوی فرودی است. پرتوی C پاسخ درست است زیرا به سمت 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 $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$.

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، آب $\lambda <$ تیشه 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

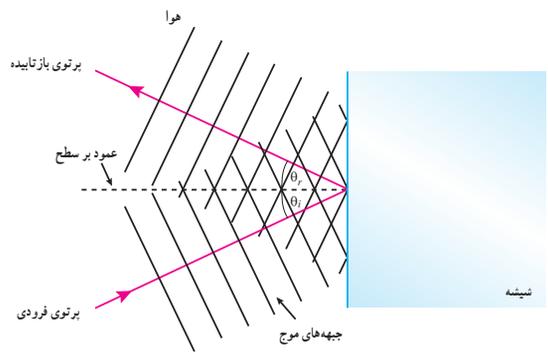
$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$



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_1 به λ_2 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.



۱۱۲

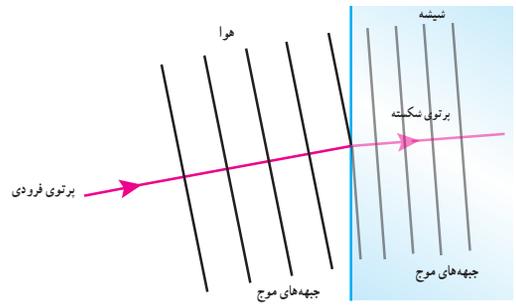
۱. در شکل زیر موج توری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط باز می‌ماند و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود. الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست یافته را با موج فرودی مقایسه کنید. ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست یافته را رسم کنید.

۲. طول موج نور فرم‌تور طیم - تون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجه جنس ۱.۵۲۳ است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجه برای این نور چقدر است؟ ج) تندی این نور در زجاجه را محاسبه کنید. د) فرکانس نور در هوا را در گوشه فضای خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار دهید که بتوانید سکه را ببینید. سپس آنکه سوزن را حرکت دهید باز هم در همان آب بماند، به طوری که آب رختن شما موجب جابه‌جایی سکه شود. با برداشتن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیدن شدن سکه را توضیح دهید.

۳. مطابق شکل، پرتو توری که از ماهی به چشمان منحنی می‌رسد تحت زاویه ۶۰° به هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

۴. گونی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از مواع برتابیده می‌شوند و به منطقه سایه‌مانع می‌رسند.

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 :

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3/0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{633 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 4/739 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \approx 4/74 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

ب)

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{633 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{474 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 1/335 \approx 1/34$$

۱۱۱

۹. در شکل زیر موج فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل پرتوهای فرمژ و بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود. البته مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید. (با جبهه‌های موج بازتابیده و شکست‌یافته را رسم کنید.)

۱۰. طول موج نور فرمژ قرمز طیف - تون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجه جنس ۲۷۷mm است. البته بسامد این نور چقدر است؟ (با ضرب شکست زجاجه برای این نور چقدر است؟) (با تندی این نور در زجاجه را محاسبه کنید.)

۱۱. سکه‌ای را در گوشه فنجان خالی قرار دهید و طوری ملاحظ آن قرار دهید که نتوانید سکه را ببینید. سپس یک آنکه سوزن را حرکت دهید تا آن در همان آب بیفتد. به طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه شود. با برداشتن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوهای پدید شدن سکه را توضیح دهید.

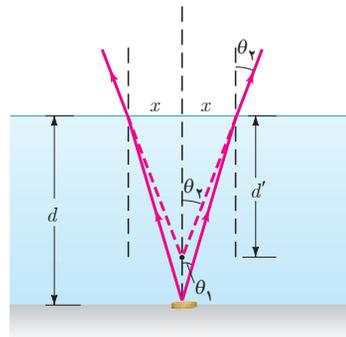
۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان منحنی می‌رسد تحت زاویه 60° به مرز آب-هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

۱۳. گونی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از مواع برانیده می‌شوند و به منطقه سایه‌ای می‌رسند.

پ)

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3/0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1/335} = 2/247 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 2/25 \times 10^8 \text{ m/s}$$

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 $d' \approx \frac{d}{n_1}$

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 همان‌طور که در شکل زیر برای داده‌هایی خاص نشان داده شده است، تصویر در هر دو امتداد قائم و افقی به ناظر نزدیک می‌شود. البته محل این تصویر یکتا نیست و هر چه پرتوهایی که به چشم ناظر می‌رسند افقی‌تر گردند، تصویر به ناظر نزدیک‌تر می‌گردد که بدیهی است. بیشترین آن برای پرتوهایی است که نزدیک به زاویه حد به سطح جدایی می‌تابند.

۱۲ از قانون اسنل استفاده می‌کنیم:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

۱۱ در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازتاب می‌دهد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود. البته مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید. با جبهه‌های موج بازتابیده و شکست‌یافته را رسم کنید.

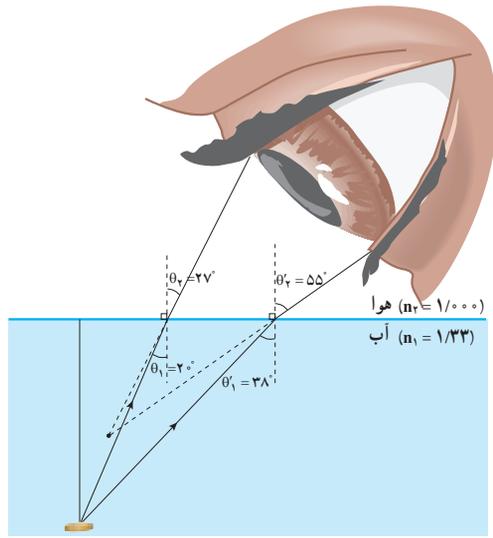
۱۲ در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل پرتوهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوا رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

۱۳ طول موج نور قرمز لیزر هلیوم - نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجه جنس ۲۷۲۸mm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجه برای این نور چقدر است؟ ج) تندی این نور در زجاجه را محاسبه کنید.

۱۴ سکای را در گوشه‌های داخلی خالی قرار دهید و طوری مایل آن قرار دهید که توانید سکای را ببینید. سپس آن‌که سران را حرکت دهید باز آن را در همان آب بویید. به طوری که آب رختن شما موجب جابه‌جایی سکای شود. با برداشتن فنجان، سکای را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکای را توضیح دهید.

۱۵ مطابق شکل، پرتوی نوری که از ماغی به چشمان منحنی می‌رسد تحت زاویه ۳۰° به مرز آب - هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

۱۶ گوشه‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۱GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از مواع برانیده می‌شوند و به منطقه سایه‌ساز می‌رسند.



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

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} = \frac{(1/33) \sin 30^\circ}{1/000} = 0/665$$

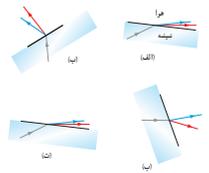
و از آنجا $\theta_2 = 41/7^\circ \approx 42^\circ$ می‌شود.

۱۲ 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 کنید درمی‌یابید 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.

۱۴ چون این پرسش در بخش شکست نور مطرح شده است، بنابراین باید به آن با استفاده از دانش ارائه شده در این بخش و با استفاده از پاشندگی نور پاسخ دهیم. با استفاده از یک منشور به‌سادگی می‌توانیم بین این دو نظر، یکی را انتخاب کنیم. اگر نور زرد، ترکیبی باشد در منشور تجزیه می‌شود و می‌توانیم نورهای قرمز و سبز را مشاهده کنیم.

اما با توجه به اینکه در 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 چینی وضوحی نخواهیم داشت و نتیجه کار از برهم نهی امواج تداخلی

۱۱. در شکل های زیر، برتری فرودی که شامل فرودهای فرمزد و بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد نشیبه می‌شود.



۱۲. در شکل های زیر، برتری فرودی که شامل فرودهای فرمزد و بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد نشیبه می‌شود.



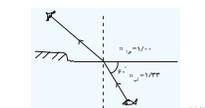
۱۳. طول موج نور قرمز قرمز طیم - تون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجیه جنس ۲۷۲mm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟

۱۴. دو دانش آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور فرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه ای می‌توان بین این دو نظر یکی را انتخاب کرد؟

۱۵. در یک تشت موج، مطلق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.



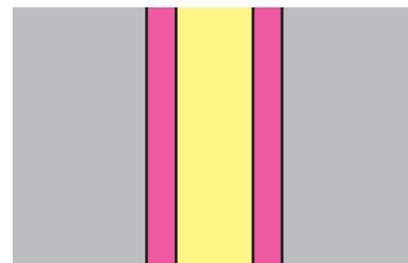
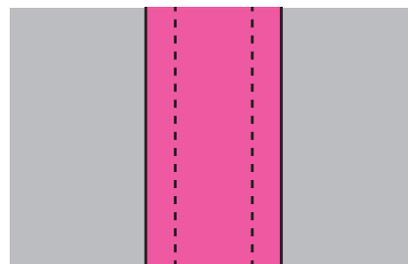
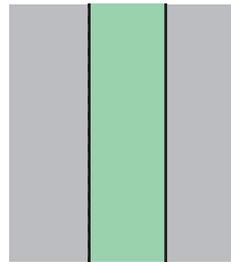
۱۶. مطابق شکل، برتری نوری که از مایع به چشمان مشخص می‌رسد تحت زاویه ۶۰° به هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این برتری در هوا چقدر است؟



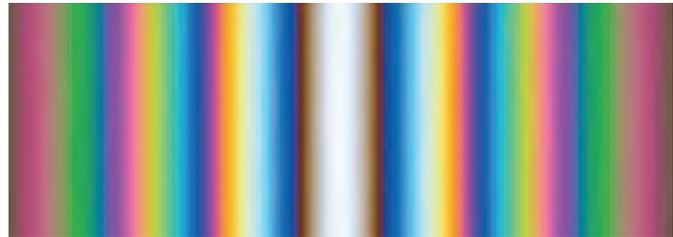
۱۷. گونی های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع باریکتر می‌شوند و به منطقه سایه ای می‌رسند.

قرمز و سبز حاصل می‌شود. به عبارتی، توجه کنید که اگر نور سبز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک در میان از قرمز و تیره حاصل می‌شد، و اگر نور قرمز را نداشتیم، نوارهای تداخلی یک در میانی از سبز و تیره حاصل می‌شد. حال در حضور این دو نور، نوارهای داخلی آنها روی هم می‌افتد. ولی توجه کنید که این برهم افتادن 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 نمی‌شوند.

برای مثال، نوار روشن مرکزی را در نظر بگیرید. وقتی نوارهای تداخلی حاصل از نور سبز و حاصل از نور قرمز را بر هم بنهیم، گل نوار سبز به نوار زرد تبدیل می‌شود، ولی اطراف آن تا سر نوارهای تاریک حاشیه های قرمز خواهند داشت. بنابراین نتیجه می‌گیریم که نور زرد ترکیبی باعث نوار مرکزی زرد رنگی می‌شود که کوتاه تر از نوار زرد مرکزی حاصل از یک نور زرد تکفام است؛ ضمن آنکه اطراف آن نیز ته رنگ قرمزی می‌گیرد.



(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).



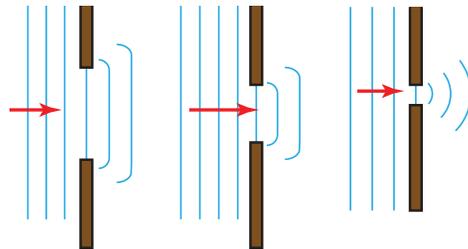
۱۴. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط باز می‌ماند و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود. الف) مشخصه‌های موج بازمانده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید. ب) جبهه‌های موج بازمانده و شکست‌یافته را رسم کنید.

۱۵. طول موج نور فرمت‌نور طیم - تون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجیه چشم ۲۷۲nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ ب) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید. ج) سکای را در گوشه‌های داخلی خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که توانید سکای را ببینید. سپس می‌توان سکای را حرکت دهید باز می‌در فضا آب می‌ریزد، به طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکای شود. با نوشتن فضا، سکای را خواهید دید. با رسم برخواطت دید، سکای را توضیح دهید.

۱۶. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان منحنی می‌رسد تحت زاویه ۶۰° به هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

۱۷. گونی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موافق برانیده می‌شوند و به منطقه سایه‌مانع می‌رسند.

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.

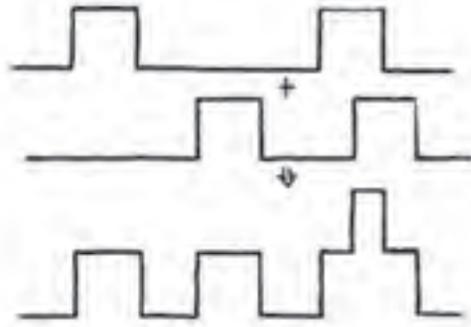


۱۶ نخست طول موج این امواج را محاسبه می‌کنیم:

$$\lambda = v / f = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 10^9 \text{ s}^{-1}} = 0.15 \text{ m} \approx 15 \text{ cm}$$

این امواج از اجسامی به قطری حدود ۱۵cm یا کوچک‌تر، به خوبی پراشیده می‌شوند.

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 (ستیغ) 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

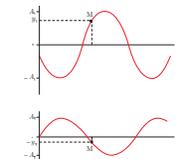
قله (ستیغ) یک موج با دره (پاستیغ) موج دیگر تلاقی کرده است (توجه کنید که Q بر یک منحنی آبی و در میان دو منحنی قرمز است) و بنابراین همدیگر را تضعیف می کنند و دامنه کمینه است.

فصل ۴: برهم کنش های موج

۴-۱ در آزمایش تداخل صوتی (شکل ۳-۲ کتاب)، فاصله بین هر نقطه یا صدای بالا (L) تا نقطه یا صدای صاف (S) مجاورش، متناسب با طول موج صوتی به کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش بسادگی انجام پذیر باشد باید فاصله نقطه های S و L مجاور نه خیلی زیاد، و نه خیلی کم باشد. الف) بسامد صوت گسیل شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه های S و L مجاور به هم نزدیک شوند؟



ب) بسامد صوت گسیل شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه های S و L مجاور از هم دور شوند؟

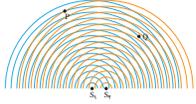


۴-۲ در آزمایش یانگ الف) اگر آزمایش را به جای تور تکفام سبز یا تور تکفام قرمز انجام دهیم پهنای تور تاریک یا روشن چه تغییری می کند؟

ب) اگر آزمایش را به جای آنکه در هوا انجام دهیم، در آب انجام دهیم، پهنای تور تاریک یا روشن چه تغییری می کند؟

۴-۳ تازی که بین دو کبکگاه محکم شده است در هواک اول خود یا بسامد f به نوسان درمی آید. شکل زیر جابه جایی اثر $t = 0$ را نشان می دهد.

الف) جابه جایی تازی در $t = \frac{1}{4}T$ و $t = \frac{1}{2}T$ رسم کنید. ب) فاصله بین تازی که m ام است، اگر تندی موج عرضی در تازی m ام باشد، بسامد نوسان تازی چقدر می شود؟



۴-۴ اگر بسامد اصلی یک تازی در 800 Hz و طول تازی 22 cm برابر 22 Hz باشد، الف) تندی موج عرضی در این تازی را به دست آورید. ب) کنش تازی چقدر است؟

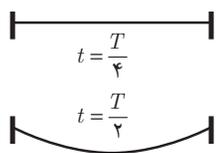
۲۰ الف) چون فاصله نقطه های S و L متناسب با طول موج به کار رفته است، بنابراین برای آنکه نقطه های S و L به هم نزدیک باشند باید طول موج به کار رفته کوچک باشد. با توجه به اینکه $f = v/\lambda$ است نتیجه می گیریم که این معادل با افزایش بسامد صوت است.

ب) برای آنکه نقطه های S و L 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.

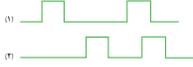
ب) چون پهنای نوارهای تداخلی با طول موج به کار رفته متناسب است، با توجه به اینکه در حضور آب طول موج به n/λ تغییر پیدا می کند و کم می شود، بنابراین طول موج به کار رفته کاهش می یابد که این به معنای کاهش پهنای نوارها است. (توجه! در متن درس فقط به رابطه پهنای نوارها با طول موج پرداخته شده است. خوب است بدانید 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 $t = \frac{1}{3f}$ معادل با $\frac{1}{3}T$ است. به عبارتی در زمان — ، $\frac{1}{4}$ دوره گذشته است و در زمان $t = \frac{1}{3f}$ ، نصف دوره. پس شکل ها (در مشابهت با شکل های ۴-۴ کتاب) چنین می شوند :

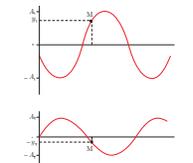


فصل ۱۰: بررسی تئوری موج

۴-۳ در آزمایش‌های صوتی (شکل ۳-۳ کتاب)، فاصله بین هر نقطه با صدای بالا (B) تا نقطه با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول موج صوتی به کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش بسادگی انجام شود باید فاصله نقطه‌های S و A مجاور به خیلی زیاد، و نه خیلی کم باشد. (الف) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و A مجاور به هم نزدیک شوند؟
 (ب) بسامد صوت گسیل‌شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و A مجاور از هم دور شوند؟
۴-۴ در شکل‌های زیر، وقتی موج ۱ بر موج ۲ برهم نهاده شود، شکل موج برهم‌نهاد را رسم کنید.



۴-۵ شکل‌های زیر نمودار جابه‌جایی مکان دو موج را در لحظه مشخصی نشان می‌دهد. جابه‌جایی برانده نقطه M در این لحظه چقدر است؟

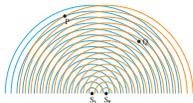


(ب) اگر آزمایش را بجای آنکه در هوا انجام دهیم، در آب انجام دهیم، بهنای هر تار نازک یا روتن چه تغییری می‌کند؟
۴-۶ تاری که بین دو نیکه‌گاه محکم شده است در هاله‌گ اول خود با بسامد f_1 به نوسان درمی‌آید. شکل زیر جابه‌جایی تار در $t=0$ را نشان می‌دهد.



(الف) جابه‌جایی تار را در $t = \frac{1}{4}T$ و $t = \frac{1}{2}T$ رسم کنید.

(ب) فاصله بین نیکه‌گاهها 1.0 m است. اگر تندی موج عرضی در تار 22 m/s باشد، بسامد نوسان تار چقدر می‌شود؟
۴-۷ تار ویولنی که طول آن 150 cm است و در دو انتها بسته شده است، در $t = 0$ خود نوسان می‌کند. تندی موج عرضی در این تار 250 m/s و تندی صوت در هوا 343 m/s است. (الف) بسامد و بسا طول موج صوتی گسیل‌شده از تار چقدر است؟
۴-۸ اگر بسامد اصلی یک تار ویولن به جرم 80 mg و طول 22 cm برابر 440 Hz باشد، (الف) تندی موج عرضی در این تار را به دست آورید. (ب) کشش تار چقدر است؟



(ب) از $v=f\lambda$ استفاده می‌کنیم. با توجه به اینکه $\frac{\lambda}{v} = 1/0\text{ m}$ است، خواهیم داشت:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{24\text{ m/s}}{2\text{ m}} = 12\text{ Hz}$$

و یا به عبارتی 12 Hz می‌شود.

۲۳ الف) باید از رابطه ۴-۵ استفاده کنیم

که در اینجا $n=1$ است:

$$f_n = \frac{nv}{2L}, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{(1)(250\text{ m/s})}{2(0.15\text{ m})} = 833\text{ Hz}$$

توجه کنید که بسامد موج روی تار همان بسامد موج صوتی است که تولید می‌شود. (ب) همان‌طور که گفتیم f_1 بسامد موج صوتی است و بنابراین برای طول موج موج صوتی گسیل‌شده داریم

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343\text{ m/s}}{833\text{ s}^{-1}} \approx 0.41\text{ m}$$

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 ۴-۴ کتاب نیز می‌توانید ببینید). بسامد برابر $f = v/\lambda = v/2L$ است که در آن v تندی موج روی تار ویولن است. بنابراین

$$v = 2Lf = 2(0.22\text{ m})(92\text{ Hz}) = 40.4\text{ m/s} \approx 40.5\text{ m/s}$$

که البته می‌توانستیم آن را به‌طور مستقیم با استفاده از رابطه ۴-۵ نیز به ازای $n=1$ به دست آوریم.

(ب) تندی موج با $v = \sqrt{F/\mu}$ داده می‌شود که در آن $\mu = m/L$ است. بنابراین کشش تار چنین می‌شود:

$$F = \mu v^2 = \left(\frac{m}{L}\right)v^2 = \left(\frac{80 \times 10^{-6}\text{ kg}}{22 \times 10^{-2}\text{ m}}\right)(40.4\text{ m/s})^2$$

$$= 0.9595\text{ N} \approx 0.96\text{ N}$$

(ب) برای بسامد اصلی، طول موج عرضی در تار $\lambda = 2L$ است و بنابراین

$$\lambda = 2L = 2(0.22\text{ m}) = 0.44\text{ m}$$

بسامد صوت در هوا همان بسامد نوسان سیم است. ولی به خاطر تندی متفاوت صوت، طول موج متفاوت می‌شود. اگر هوا را با شاخص پایین a نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\lambda_a = \frac{v_a}{f} = \frac{340\text{ m/s}}{92\text{ s}^{-1}} = 3.696\text{ m} \approx 3.7\text{ m} = 370\text{ cm}$$

۲۸ الف) اگر بررسی کنید درمی یابید تفاوت بسامدهای تشدیدی برابر ۷۵Hz است و چون بسامد کمتر از ۴۰۰ Hz خواسته شده است، پس بسامد مورد نظر همان ۷۵Hz است.

ب) بسامد پنجم هماهنگ اول به ترتیب برابر با ۷۵Hz، ۱۵۰Hz، ۲۲۵Hz، ۳۰۰Hz و ۳۷۵Hz شده است که به ترتیب هماهنگ‌های اول تا پنجم هستند. بنابراین بسامد هماهنگ هفتم برابر است با: $f_7 = 7(75 \text{ Hz}) = 525 \text{ Hz}$.

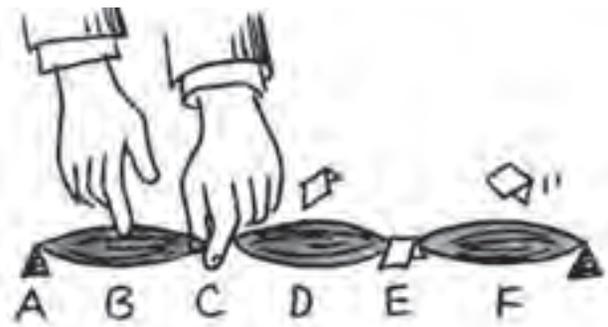
۲۹ توجه کنید آنچه در توصیف چگونگی انجام این آزمایش آمده است، صرفاً برای آن است. که مسئله از جنبه انتزاعی خارج شده و عملاً انجام پذیر باشد. اگر تار در نقطه C محکم گرفته شود، نوسان‌های تار به سمت راست منتقل نمی‌شوند. بنابراین در انجام این تجربه، چگونگی گرفتن تار در نقطه C مهم است و تا آنجا که ممکن است 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 الف) این بسامد کدام است؟
ب) بسامد هماهنگ هفتم چند است؟
ج) در شکل نشان داده شده، نقاط A، B، C، D، E، F، G و H به فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. تار را در نقطه C به آرامی می‌گزیم. طوری که نوسان‌های بخش از تار که سمت چپ نقطه C است، بتواند به سمت راست این نقطه منتقل شود. اکنون تار را در نقطه B می‌نوازیم. بین ترتیب موج ایستاده‌ای در طول تار تشکیل می‌شود، به طوری که در نقطه‌های A و C گره و در نقطه B شکم آن قرار دارد. به گمان شما برای کاغذهای تاشده‌ای که در نقاط E، D، F و قرار دارند، چه رخ می‌دهد؟

۳۱ الف) چه بسامدهای سبب به نوسان درآمن تار شده است؟
ب) بسامد اصلی تار چند است؟
ج) بسامدهای A و B، طول و چگالی خطی جرمی یکسانی دارند. ولی ریسمان B تحت کشش بیشتری نسبت به ریسمان A قرار دارد. شکل زیر چهار وضعیت (الف) تا (د) را نشان می‌دهد که در آنها کشش‌های موج ایستاده در دو ریسمان وجود دارد. در کدام وضعیت‌ها، احتمال دارد که ریسمان‌های A و B در بسامد تشدید یکسانی نوسان کنند؟

۳۲ وقتی گالن آبی را خالی می‌کنیم، با خالی شدن آب صدای گلوب گلوب را می‌شنویم. موقع خالی شدن گالن بسامد این صدا کمتر می‌شود (صدای تریز) یا بیشتر (صدای زیر) چرا؟

۳۳ در گذشته برای آگاه کردن کشتی‌ها از خطر صخره‌ها، در صدف‌های حلزونی می‌دیدند. امروزه بیشتر برای جشن‌ها و شادی‌ها در آنها می‌بندند. چگونه این صدف‌ها می‌توانند چنین صدایی ایجاد کنند؟



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. هر چه فضای هوای خالی افزایش یابد، اندازه بسامدهای تشدیدی 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 تشدیدی هوای درون ظرف منطبق می‌شود، بنابراین موقع خالی شدن گالن، مدام صداهای بم‌تر و بم‌تری (با بسامد کمتری) را می‌شنویم.

۳۱ هنگام دیدن 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، امواج صوتی را با همان بسامدهای نوسان لب به وجود می‌آورد. اگر برخی از این امواج با یکی از بسامدهای تشدید صدف منطبق شوند، در این صورت یک موج صوتی قوی را ایجاد می‌کنند. از لحاظ تجربی خوب است به یک آزمایش اشاره کنیم. در آن آزمایش، پایین‌ترین بسامد تشدید صدف ۳۳۲/۵Hz بود و بنابراین نوسان‌های لب در آن بسامد باعث تشدید در درون صدف در همان بسامد می‌شد.

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

پیامدها

- دانش‌آموزان با درک مفاهیم اساسی در برخی از مباحث فیزیک جدید به این شناخت می‌رسند که :
- فیزیک کلاسیک قادر به تبیین درست و کامل برخی از پدیده‌های فیزیکی نیست.
 - نظریه‌ها و قانون‌های فیزیک کلاسیک در 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 اختراع‌های قرن بیستم است که براساس گسیل القایی تابش کار می‌کند.

چه شناختی مطلوب است؟

- نظریه‌ها و فرضیه‌های فیزیک جدید قادر به تبیین پدیده‌هایی شدند که فیزیک‌دانان کلاسیک در اواخر قرن هیجدهم و اوایل قرن نوزدهم برای بررسی آنها مشکل جدی داشتند.

چه پرسش‌هایی اساسی است و باید 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 اصلی 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.

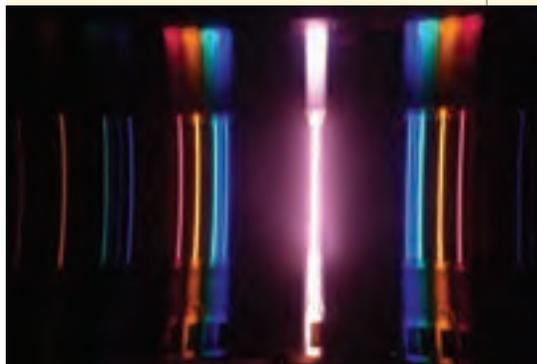
بودجه‌بندی پیشنهادی

- جلسه اول و دوم : نگاهی به تصویر شروع فصل و مقدمه فصل + بخش ۱-۵
 - جلسه سوم و چهارم : بخش ۲-۵
 - جلسه پنجم و ششم : بخش ۳-۵
 - جلسه هفتم : بخش ۴-۵ 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 اوضاع الکترون‌های دو سر لایه‌های خارجی گاز رقیق و کم‌فشار عناصری مانند هیدروژن، هلیوم، جیوه یا نئون، ولتاژ بالایی را اعمال می‌کنیم تا بروج به گسیل نور به رنگ‌های مختلف می‌کنند؟

بخش‌ها

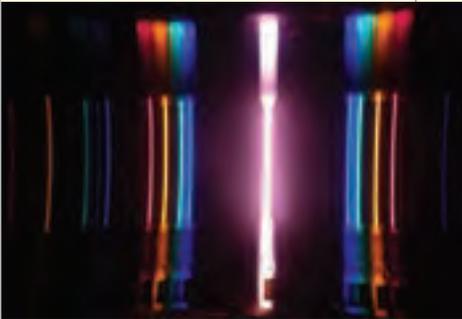
- ۱-۵ از فوتوالکتریک و فوتون
- ۲-۵ طیف خطی
- ۳-۵ مدل اتم رادرفورد-بور
- ۴-۵ لیزر

راهنمای تدریس



فصل

آشنایی با فیزیک اتمی



پرا رفتی، الکتروهای دو سر لامپهای حاوی گاز رقیق و کم فشار عناصری مانند هیدروژن، هلیوم، جیوه یا نئون، و گاز لایس را اعمال می‌کنیم. شروع به گسیل نور به رنگ‌های مختلف می‌کنند.

پدیده‌ها

- 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 فرانفش در اختیار داشته باشید، به کمک یک چشمه لامپ رشته‌ای معمولی و لامپ فرانفش 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 فرانفش بین 10 nm تا 400 nm است، بنابراین در حالتی که برق‌نما دارای بار منفی است، با لامپ‌های فرانفش معمولی که به سادگی در دسترس اند و طول موج بالایی دارند نیز می‌توان این پدیده را مشاهده کرد، در حالی که برق‌نما دارای بار مثبت باشد، لازم است از لامپ فرانفش 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 فرانفش (UV) با طول موج کم دارد.

در شکل ۳-۵ اثر فوتوالکتریک بر مبنای مشاهده انحراف عقربه گالوانومتر ارائه شده است که معمولاً در آزمایشگاه‌ها از چنین اسپای (البته با مداری کامل‌تر) استفاده می‌شود. لازم است توجه شود که پنجره کوارتزی امکان عبور درصد بیشتری از باریکه نور فرابنفش را می‌دهد.

در ادامه به ناکامی فرض‌های فیزیک کلاسیک برای تبیین اثر فوتوالکتریک اشاره شده است که لازم است این قسمت به خوبی با دانش‌آموزان بحث شود. سپس دو فرض پیشین برای حل معضل ۲۰ ساله فوتوالکتریک مورد بررسی قرار گیرد.

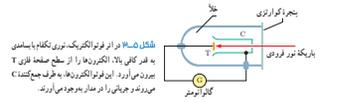
فرض اول: نور فرودی به سطح فلز ماهیت موجی ندارد بلکه دارای ماهیت ذره‌ای است و از بسته‌های انرژی ($E = hf$) تشکیل شده است.

فرض دوم: هر بسته انرژی صرفاً با یک الکترون از سطح فلز برهم‌کنش می‌کند.

شکل ۳-۵: آشنایی با فیزیک کلاسیک



ماکس پلانک (۱۸۵۸-۱۹۴۷) در سال ۱۸۸۵ دانش فیزیک نظری در دانشگاه گتینگن و در سال ۱۸۸۸ در دانشگاه کیل شد و در سال ۱۸۸۹ در دانشگاه هلمهولست در برلین به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۰۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۱۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۲۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۳۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۳۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۳۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۳۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۳۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۳۶ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۳۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۳۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۳۹ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۴۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۴۱ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۴۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۴۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۴۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۴۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۴۶ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۴۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۴۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۴۹ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۵۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۵۱ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۵۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۵۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۵۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۵۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۵۶ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۵۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۵۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۵۹ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۶۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۶۱ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۶۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۶۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۶۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۶۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۶۶ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۶۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۶۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۶۹ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۷۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۷۱ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۷۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۷۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۷۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۷۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۷۶ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۷۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۷۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۷۹ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۸۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۸۱ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۸۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۸۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۸۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۸۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۸۶ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۸۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۸۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۸۹ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۹۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۹۱ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۹۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۹۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۹۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۹۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۹۶ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۹۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۱۹۹۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۱۹۹۹ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۰۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۰۱ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۰۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۰۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۰۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۰۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۰۶ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۰۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۰۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۰۹ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۱۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۱۱ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۱۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۱۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۱۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۱۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۱۶ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۱۷ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۱۸ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۱۹ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۲۰ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۲۱ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۲۲ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۲۳ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد. او در سال ۲۰۲۴ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد و در سال ۲۰۲۵ به عضو هیئت مدیره آکادمی علوم شد.



این نور، گالوانومتر عدد بزرگتری را نشان می‌دهد، حال آنکه آزمایش نشان می‌دهد که اگر بسامد نور فرودی از مقدار معینی کمتر باشد، هر چقدر هم که شدت نور فرودی افزایش یابد این پدیده رخ نمی‌دهد و گالوانومتر عبور جریان را نشان نمی‌دهد. همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم نور، موجی الکترومغناطیسی است. بنابراین می‌توان انتظار داشت هنگام برخورد موج الکترومغناطیسی (نور فرودی) با سطح فلز میدان الکتریکی این موج، نیروی $E = hf$ به الکترون‌های فلز وارد کند آنها را به نوسان وادارد. به این ترتیب، وقتی دامنه نوسان برخی از الکترون‌ها کلاسیکی، این پدیده باید با هر بسامدی رخ دهد در حالی که این نتیجه با تجربه سازگار نیست. یکی دیگر از پیامدهای نظریه الکترومغناطیسی ماکسول این است که شدت نور با مربع دامنه میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($E = hf$). به این ترتیب انتظار می‌رود به‌ازای یک بسامد معین، اگر شدت نور فرودی و سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی بیشتری از فلز خارج شوند، نتیجه‌ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند.

پس از ترتیبی که به ۲۰ سال که تلاش بسیاری از دانشمندان برای توجیه اثر فوتوالکتریک به کمک مفاهیم و قانون‌های فیزیک کلاسیک به نتیجه نرسیده بود در سال ۱۹۰۵ توضیحی قانع‌کننده، در مورد این اثر ارائه داد و جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۲۱ میلادی را به خاطر تبیین آن دریافت کرد. اینشتین در نظریه فوتوالکتریک خود با توجه به کارهای قبلی پلانک در زمینه تابش گرمایی اجسام، فرض کرد که نور با بسامد f می‌توان به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفت. هر بسته انرژی، که بعدها «فوتون» نامیده شد، دارای انرژی‌ای است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E = hf \quad (۱-۵)$$

در این رابطه h ثابت پلانک نامیده می‌شود و به‌طور تجربی معلوم شده است که مقدار آن $h = 6.63 \times 10^{-34}$ است.

بنا بر نظر اینشتین، وقتی نوری تک‌بام و سطح فلزی می‌تابد، هر فوتون صرفاً با یکی از الکترون‌های فلز برهم‌کنش می‌کند. اگر فوتون انرژی کافی داشته باشد تا فرایند خارج کردن الکترون از فلز را انجام دهد، الکترون به‌طور آنی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون خارج‌شده تبدیل می‌شود.

۱. این اثر را نیلسن فرینک، کمبریج، ماساچوست، در سال ۱۹۱۶ میلادی نخستین بار پیشنهاد کرد.

توجه

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 به‌صورت موج الکترومغناطیسی در نظر می‌گرفت. کوانتیده گرفتن تابش و ارائه نظریه ذره‌ای نور به‌صورت بسته‌های انرژی بنابه فرضی بود که اینشتین نخستین بار در سال ۱۹۰۵ میلادی برای تبیین اثر فوتوالکتریک به کار برد.

فیزیک ۳

این نظر اینشتین را می‌توان به کمک قانون پایستگی انرژی به‌صورت زیر نوشت:

$$hf = W + K \quad (۲-۵)$$

قانون پایستگی انرژی در اثر فوتوالکتریک

که در آن W کار (انرژی) لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح فلز و K انرژی جنبشی آنها پس از جدا شدن از سطح فلز است. از آنجا که بعضی از الکترون‌ها در فلز قفل مفید، برای خارج کردن آنها از فلز کار کمتری لازم است. بنابراین اگر حداقل کار لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح فلز خاص W باشد، انرژی جنبشی سرب‌ترین فوتوالکتریک‌های گسیل‌شده از آن برآورد خواهد بود:

$$K_{\text{max}} = hf - W \quad (۳-۵)$$

معادله فوتوالکتریک

W را «بام 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 ۳-۵ تابع کار چند فلز آمده است. اگر نمودار K_{max} و بسامد f را با توجه به معادله ۳-۵ رسم کنیم، به‌صورت 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 درآستانه ترک فلز است. در این صورت با توجه به معادله ۳-۵، انرژی فوتون فرودی مساوی تابع کار فلز است و بسامد آستانه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_0 = \frac{W}{h} \quad (۴-۵)$$

بسامد آستانه فوتوالکتریک (ها)

پرسش ۳-۵: تابشی با بسامد معین باعث می‌شود تا فوتوالکتریک‌هایی سطح فلز f_0 را ترک کنند، ولی از سطح فلز f_0 خارج شوند. انرژی فوتون‌های فرودی را با تابع کار فلز مقایسه کنید.

توجه: در فیزیک کلاسیک و فیزیک هتسه‌ای، یکای ژول برای بیان انرژی فوتونها و ذرات، یکای بسیار بزرگی است. همین دلیل از یکای به نام الکترون‌ولت (eV) استفاده می‌کنیم. برای آشنایی با این یکای غیر SI فرض کنید الکترونی با بار $e = 1.6 \times 10^{-19}$ کولمب، در فاصله $d = 1.6 \times 10^{-19}$ متر حرکت کند. در این صورت بنا به رابطه $W = qAd$ که در فیزیک ۲ با آن آشنا شدید، اندازه 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 ($1 \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$) می‌نامند. مضرب‌های دیگری از این یکا به‌صورت keV (کیلو الکترون‌ولت) و MeV (مگا الکترون‌ولت) اغلب به کار می‌روند.

به این ترتیب یکای ثابت پلانک را به جای h می‌توان برحسب یکای eV.s نیز بیان کرد:

$$h = (6.63 \times 10^{-34} \text{J.s}) \left(\frac{1 \text{eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{J}} \right) = 4.14 \times 10^{-15} \text{eV.s}$$

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 (eV)
طلا	۵.۱۰
کاتد	۵/۱
نیکل	۴/۱۰
مس	۴/۷۰
قرن	۴/۶۴
تنگستن	۴/۵۲
آهن	۴/۵۰
روی	۴/۲۶

این نظر اشتباهی را می‌توان به کمک قانون باستگی انرژی به صورت زیر نوشت:

(۳-۵) $hf = W + K$ (قانون باستگی انرژی در اثر فوتوالکتریک)

که در آن W کار انرژی لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز و K انرژی جنبشی آنها پس از جدا شدن از سطح آن فلز است. از آنجا که برخی از الکترون‌ها در هر 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 باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترون‌های گسیل‌شده از آن برابر خواهد بود با:

(۳-۵) $K_{max} = hf - W$ (معادله فوتوالکتریک)

W را تابع کار فلز می‌نامند که به جنس فلز بستگی دارد و همان‌گونه که گفتیم، کمینه کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از یک فلز است. در جدول ۵-۱ تابع کار چند فلز داده شده است. اگر نمودار K_{max} رسم کردیم با توجه به معادله ۳-۵ 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 هیچ انرژی جنبشی از آن آستانه ترک فلز است. در این صورت با توجه به معادله ۳-۵، انرژی فوتون فرودی مساوی تابع کار فلز است و بسامد آستانه از رابطه زیر بدست می‌آید:

(۳-۵) $f_0 = \frac{W_0}{h}$ (بسامد آستانه فوتوالکتریک‌ها)

پرسش ۳-۱

تابشی با بسامد معین باعث می‌شود از فوتوالکتریک‌های سطح فلز ۱ ترک کنند، ولی از سطح فلز ۲ خارج نشوند. انرژی فوتون‌های فرودی را با تابع کار فلزها مقایسه کنید.

توجه: در فیزیک اتمی و فیزیک هسته‌ای، بکای زول برای بیان انرژی فوتون‌ها و ذرات، بکای بسیار بزرگی است. به همین دلیل از بکای به نام الکترون‌ولت (eV) استفاده می‌کنیم. برای آشنایی با این بکای غیر SI، فرض کنید الکترونی با بار $e = -1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ در یک نقطه با اختلاف پتانسیل ۱۷ حرکت کند. در این صورت بنا به رابطه $\Delta U = q\Delta V$ که در فیزیک ۲ با آن آشنا شدید، انرژی تغییر در انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون برابر است با:

$|\Delta U| = |q\Delta V| = |(-1.6 \times 10^{-19} \text{C})(17 \text{V})| = 2.72 \times 10^{-18} \text{J}$

این مقدار انرژی را بنا به تعریف، یک الکترون‌ولت ($1 \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$) می‌نامند. ضرب‌های دیگری از این بکای به صورت keV (کیلو الکترون‌ولت) و MeV (مگا الکترون‌ولت) اغلب به کار می‌روند.

به این ترتیب بکای ثابت پلانک را به جای h می‌توان رسم بکای $h \cdot e$ نیز بیان کرد:

$h \cdot e = (6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}) \left(\frac{1 \text{eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{J}} \right) = 4.14 \times 10^{-15} \text{eV}\cdot\text{s}$

فصل ۱۰: آشنایی با فیزیک اتمی

مثال ۵-۱

یک چشمه تور مرنی با توان 1.0W فوتون‌هایی با طول موج 550nm 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 ۵-۵ انرژی هر فوتون برابر است با:

ابتدا مقدار hc را حساب می‌کنیم:

اگر h را بر حسب eV و m را بر حسب nm خواهیم داشت:

بنابراین در حل مسائل می‌توانیم مقدار hc را برابر $1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}$ اختیار کنیم. خوب است این مقدار و بکای آن را به خاطر بسپارید تا در صورت نیاز از آن استفاده کنید. به این ترتیب داریم:

ب) ابتدا انرژی تابش‌شده توسط لامپ را در هر ثانیه به دست می‌آوریم:

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:

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 تابشی از این شمار بسیار زیاد فوتون برای ما ملموس نیست.

مثال ۵-۲

الف) تابع کار طلا برابر 5.2eV است. بسامد کمینه تور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح این فلز را پیدا کنید. ب) طول موج آستانه (طول موج منتهای بسامد آستانه) f_0 را بدست آورید. پاسخ: الف) بسامد کمینه تور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا برابر بسامد آستانه است. بنابراین از رابطه ۳-۵ داریم:

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 $hc = eV_0$ طول موج منتهای بسامد تقریباً 244nm به دست می‌آید که در ناحیه فرابنفش طیف الکترومغناطی قرار دارد.

تمرین ۱-۵

حل مورد انتظار

الف) $W_0 = ?$, $\lambda_0 = 254 \text{nm}$

$$f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow W_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{1240 \text{ eV}\cdot\text{nm}}{254 \text{ nm}} = 4.88 \text{ eV}$$

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

$$f = \frac{W_0}{h} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{W_0} = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{4/31\text{eV}} = 287\text{nm}$$

ب) از رابطه ۳-۵ داریم :

$$k_{\text{max}} = hf - W_0 = \frac{hc}{\lambda} - W_0 = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{287\text{nm}} - 4/31\text{eV} = 0/01\text{eV} = (0/01\text{eV})\left(\frac{1/6 \times 10^{-19}\text{J}}{1\text{eV}}\right) = 1/6 \times 10^{-21}\text{J}$$

به این ترتیب داریم :

$$\frac{1}{2}mv_{\text{max}}^2 = 1/6 \times 10^{-21}\text{J}$$

$$\frac{1}{2}(9/11 \times 10^{-31}\text{kg})v_{\text{max}}^2 = 1/6 \times 10^{-21}\text{J} \Rightarrow$$

$$v_{\text{max}} = \sqrt{3/51 \times 10^{-9}(\text{J}/\text{kg})} = 5/92 \times 10^4\text{m/s}$$

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 ۲-۵، 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 ۲-۷ طیف گسیلی خطی برای گازهای نئون و جیوه نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، 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 سوئسی 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.

فیزیک ۳

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیوم، سدیم و توتون معمولاً از یک لامپ پارک و بلند کننده‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم‌فشار است استفاده می‌شود. دو الکترود به نام‌های آنه و کاتده در دو طرف این لامپ قرار دارد که به ترتیب به پایه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل است. این ولتاژ بالا، سبب تخلیه الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لامپ شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجادشده و همچنین رنگ نور گسیل‌شده، به نوع گاز درون لامپ بستگی دارد. در میان طیف گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی هم از 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 ۵-۵ نشان داده شده است. در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضی‌دان سوئسی، 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:

$$\lambda = \frac{1}{n_1^2 - n_2^2} \times 10^7 \text{ nm} \quad (5-5) \quad (\text{معادله بالمر})$$

که در آن $n_1 \geq 3$ و همواره عددی صحیح است. با قرار دادن $n_1 = 3, 4, 5, 6$ در معادله بالمر، طول موج خط‌های طیف گسیلی اتمی هیدروژن در ناحیه مرئی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

- (خط قرمز) $n_1 = 3 \rightarrow \lambda_1 = 656.3 \text{ nm}$
- (خط آبی) $n_1 = 4 \rightarrow \lambda_2 = 486.1 \text{ nm}$
- (خط نیلی) $n_1 = 5 \rightarrow \lambda_3 = 434.0 \text{ nm}$
- (خط بنفش) $n_1 = 6 \rightarrow \lambda_4 = 410.1 \text{ nm}$

از آنجایی که در این آزمایش، طول موج‌های گسیلی از گاز، از یکدیگر جدا و طیف خطی آن تشکیل شده است، به این سبب آزمایش تشکیل و مشاهده طیف گسیلی گازها

شکل ۵-۵ الف) یک دستگاه، 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 ۵-۸ ب کتاب درسی این آزمایش را انجام دهید تا دانش‌آموزان طیف گسیلی خطی گاز اتمی هیدروژن را به‌طور مستقیم مشاهده کنند.

یکی از پیش‌بینی‌های بالمر پس از به‌دست آوردن رابطهٔ 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 نتیجهٔ پیش‌بینی علمی خود را ببیند (به تاریخ‌های مندرج در جدول ۲-۵ توجه شود)، ولی براساس همین پیش‌بینی، ری‌دبرگ دانشمند سوئدی به بازنویسی معادلهٔ بالمر پرداخت و رابطه‌ای کلی‌تر برای به‌دست آوردن طول موج‌های طیف گسیلی گاز اتمی هیدروژن به‌دست آورد. این رابطه به‌صورت معادلهٔ ۶-۵ در کتاب درسی آمده است که به‌ازای $n' = 2$ به معادلهٔ ۵-۵ بالمر می‌رسیم که مربوط به طول موج‌های طیف هیدروژن اتمی در ناحیهٔ مرئی است.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی



بالمر با تأمل بیشتر روی رابطهٔ 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 سوئدی، در راستای همین موضوع تلاش فراوانی برای کامل‌تر کردن طیف گسیلی خطی هیدروژن انجام داد و در سال ۱۸۸۸ میلادی معادلهٔ بالمر را به‌صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad n' > n \quad (۶-۵) \quad (\text{معادلهٔ ری‌دبرگ})$$

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 1.1×10^7 در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح مثبتی است که به‌ازای $n' \geq 2$ رابطهٔ ۵-۵ مربوط به رشتهٔ بالمر به‌دست می‌آید که در ناحیهٔ مرئی طیف قرار دارد. چندین سال پس از درگذشت بالمر و با اصلاح ابزارها و روش‌های طیف‌سنجی، امکان کشف گسترهٔ طول‌موج‌های دیگری در طیف گسیلی گاز هیدروژن به‌وجود آمد و مشخص شد که به‌جز رشتهٔ بالمر رشته‌های دیگری در طیف گاز هیدروژن اتمی وجود دارد. در جدول ۲-۵ نام این رشته‌ها، که به‌ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۲-۵: رشته‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطهٔ ری‌دبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیهٔ 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, ...	فرابنفش و مرئی
پاشن	۱۹۰۸	۳	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$	۴, ۵, ۶, ...	فروسرخ
براکت	۱۹۲۲	۴	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$	۵, ۶, ۷, ...	فروسرخ
پنفره	۱۹۲۲	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 رشتهٔ بالمر دیده شدند و معادلی از خط‌های رشتهٔ لیمان با طول فشرده شده بودند. این مدل که با تئوری کوانتوم اتمی همخوانی داشت نتوانست در توضیح‌های برای بخش آن رشته‌ها، به‌طوری که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و پنفره و همچنین خط‌های بقی‌ماندهٔ رشتهٔ لیمان به‌درج کشف شدند.

۱۳۳

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 ناحیهٔ فروسرخ به سبب ساخت وسایل اندازه‌گیری دقیق‌تر، کشف شوند. نکته جالب توجه دیگر این جدول این است که خط‌های دیگر طیف هیدروژن اتمی که پس از ارائه مدل اتمی بور در سال ۱۹۱۳ میلادی کشف شدند، به‌نوعی طول موج آنها توسط مدل اتمی بور نیز پیدا شده بود. انطباق نتایج تجربی و نتایج به‌دست آمده از مدل بور یکی از موفقیت‌های مدل برای اتم هیدروژن به حساب می‌آید.

تمرین 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:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی به ترتیب به ازای $n = 4$ و $n = 5$ به دست می‌آید. در این صورت داریم:

$$\frac{1}{\lambda_1} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} \right) = \frac{7R}{144} \Rightarrow \lambda_1 = 1875 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda_2} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2} \right) = \frac{16R}{225} \Rightarrow \lambda_2 = 1278 \text{ nm}$$

با توجه به شکل ۳-۲۲ یا مراجعه به جدول ۳-۵، این طول موج‌ها در ناحیه فروسرخ طیف امواج الکترومغناطیسی قرار دارند.

فیزیک ۳۱

مثال ۳-۵

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشته براکت ($n' = 3$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گستره طول‌موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند.

پاسخ: در رشته براکت ($n' = 3$) برای اولین و دومین خط طیفی به ترتیب $n = 4$ و $n = 5$ است. در این صورت با استفاده از رابطه ۳-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} \right) = R \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{16} \right) = R \left(\frac{7}{144} \right) \Rightarrow \lambda = 1875 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2} \right) = R \left(\frac{16}{225} \right) \Rightarrow \lambda = 1278 \text{ nm}$$

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 فریو ($n' = 5$) هیدروژن اتمی را به دست آورید.

پاسخ: کوتاه‌ترین طول موج، $n = 6$ است. متناظر با استفاده از رابطه ۳-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{6^2} \right) = \frac{R}{225} \Rightarrow \lambda = 2170 \text{ nm}$$

همچنین بلندترین طول موج این رشته، متناظر با $n = 4$ است. در این صورت داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{4^2} \right) = \frac{11R}{900} \Rightarrow \lambda = 4340 \text{ nm}$$

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 طول‌موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند.

معدله 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. تیز بور، فیزیکدان دانمارکی (۱۸۷۹-۱۹۶۲ م.) با اصلاح مدل اتمی رادرفورد برای نخستین بار توانست توضیح مناسبی برای طول موج‌های گسیل‌شده توسط گاز هیدروژن اتمی ارائه دهد. در واقع مدل 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 شباهت دیگر، باه نظار ۱۱ مربوط به هر رسته همگام زینتانی داده شده و از دست نداشتن امواج ۱۲ مربوط به رسته‌های مختلف را حفظ کنید.

راهنمای تدریس

۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور

تا پیش از ارائه مدل اتمی تامسون در سال ۱۹۰۴ میلادی، مدل 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 بیلبارد 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

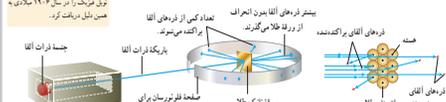
جوزف تامسون فیزیکدان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را تقویت کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. با این مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که بار مثبت به‌طور همگن در سراسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمش هم می‌گویند، زیرا الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن پخش شده‌اند (شکل ۳-۵).

در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با بسامدهای معینی حول وضع تعادلشان نوسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از تاکنی‌های مدل تامسون این بود که بسامدهای تابش گسیل‌شده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود.

وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌های را انتشار داد که مدل تامسون نمی‌توانست آنها را توضیح دهد، این مدل کنار گذاشته شد. رادرفورد و همکارانش پاریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت را (این جنس هسته اتم هلیوم که به آن ذره آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا تیر می‌تابانند (شکل ۳-۱۱). رادرفورد با تیر شدن تامسون انتظار داشت که تمامی ذره‌های آلفا، با انحراف بسیار اندکی از ورقه طلا بگذرد. در عمل نیز بیشتر این ذره‌ها بدون انحراف

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 و رادرفورد پس از انجام این آزمایش و براساس مدل تامسون و شناختی که از پاریکه ذرات آلفا داشت، گفت: مدل آن بود که گلوله تویی یا به ورقه نازکی از کاغذ شکر کشید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله تویی با سطح کاغذ، گلوله بازگردد. «این ذره‌ها باید با جرمی بزرگ برخورد کرده باشد؛ اما یا چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از ورقه طلا گزشتند باشند که نهی بوده باشند. در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهای بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده‌اند. وی سرانجام نتیجه گرفت باید هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت در مرکز هر اتم باشد که با مدل اتمی تامسون به‌طور آشکار مغایرت داشت.

بیشتر ذره‌های آلفا بدون انحراف از ورقه طلا می‌گذشتند. پاریکه ذرات آلفا در برخورد با هسته ذره‌های آلفا پراکنده می‌گردد. هسته ذره‌های آلفا پراکنده می‌شود. هسته ذره‌های آلفا پراکنده می‌شود. هسته ذره‌های آلفا پراکنده می‌شود.



شکل ۳-۱۱ آزمایش رادرفوردی رادرفورد که در آن ذرات آلفا که از ورقه نازک طلا پراکنده شده‌اند، تیر می‌تابانند و در یک صفحه فلز قرار دارند که در این شکل داده شده است.

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.

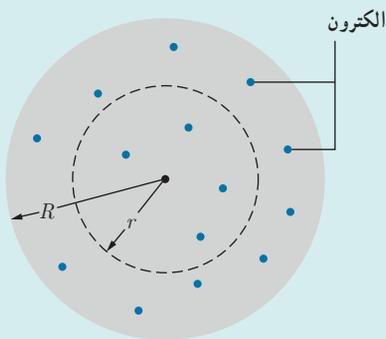
دانستنی برای معلم

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:

$$F = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R^2} \cdot r = kr$$

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 ناکامی‌های آن (که به برخی از آنها در زندگی تامسون اشاره شده است)، به بررسی مدل رادفورد بپردازید. هرچند رادفورد از سال‌های پایانی قرن نوزدهم، فعالیت‌های علمی خود را با تمرکز روی پرتوهای طبیعی عناصر پرتوزا شروع کرد و به نوعی فیزیک هسته‌ای را بنیان نهاد، ولی به تدریج با آزمایش‌هایی که روی پراکندگی ذرات آلفا توسط ایشان و گروهی که در دانشگاه منچستر با ایشان همکاری می‌کردند، درگیر بررسی ساختار اتم و ارائه مدلی برای آن شد. آزمایش پراکندگی ذرات آلفا روی ورقه‌ای نازک از طلا در شکل ۵-۱۰ بررسی شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود بیشتر ذره‌های آلفا بدون انحراف از ورقه طلا می‌گذرند (خط ضخیم آبی رنگ).

در ادامه به موفقیت‌ها و ناکامی‌های مدل اتم هسته‌ای رادفورد اشاره کنید. تقریباً دو سال بعد از ارائه مدل اتم - هسته‌ای رادفورد، بور که در آزمایشگاه رادفورد مشغول به کار بود، توانست با ارائه پیش‌فرض‌هایی (اصول موضوعه) مدل اتمی خود را برای هیدروژن اتمی و اتم‌های هیدروژن گونه ارائه دهد. این مدل موفقیت‌های فراوانی به همراه داشت و ضمن اینکه با معرفی مدارهای مانا، پایداری اتم را می‌توانست توضیح دهد جذب و گسیل تابش را نیز می‌توانست با تغییر موقعیت الکترون از یک مدار مانا به مدار مانای دیگر توضیح دهد؛ به طوری که با نتایج تجربی نیز سازگار باشد.

شکل ۱۰-۱ آشنایی با فیزیک اتمی

در سال ۱۹۱۳ میلادی، بور مدلی را برای اتم هیدروژن ارائه کرد. این مدل از آنکه مسافت تابداری اتم را در مدل رادفورد حل می‌کرد معادله زیر را برای طیف خطی اتم هیدروژن را نیز نتیجه می‌داد. نظریه بور با مدل اتم هسته‌ای رادفورد، شروع می‌شد. بور با این پیشنهاد که در مفاسی است، قوانین مکانیک کلاسیک و الکترومغناطیس باید توسط قوانین دیگری جایگزین و تکمیل شود گامی بزرگ و جسورانه برای رفع مشکلات مدل رادفورد برداشت. در ادامه با برخی از اصول و مفروضات مدل بور آشنا می‌شویم.

۱- مدارهای انرژی‌های الکترون‌ها در هر اتم گزینش‌پذیرند؛ یعنی فقط مدارها و انرژی‌های گزینش‌مندی مجاز هستند.

بور پس از محاسبات نسبتاً ساده‌ای نشان داد که شعاع این مدارها و انرژی الکترون برای اتم هیدروژن از رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$r_n = n^2 a_0 \quad (۱۰-۵)$$

(شعاع مدارهای الکترون برای اتم هیدروژن)

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (۱۰-۶)$$

(انرژی‌های انرژی الکترون در اتم هیدروژن)

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می‌شود ($n = 1, 2, 3, \dots$) که مدار الکترون را دور هسته مشخص می‌کند. همچنین n شعاع کوچک‌ترین مدار در اتم هیدروژن (ه‌زای $n = 1$) و مقدار آن برابر $a_0 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ است. این مقدار، شعاع بور برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود. همچنین انرژی الکترون در $n = 1$ برابر $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ است که اندازه آن را معمولاً یک **یک‌برگ** می‌نامند و با نماد E_0 نشان می‌دهند ($E_0 = 13.6 \text{ eV}$). شکل ۱۰-۵ سه مدار اولی بور را برای اتم هیدروژن نشان می‌دهد.

۲- وقتی یک الکترون در یکی از مدارهای مجاز است، هیچ نوع تابش الکترومغناطیسی گسیل نمی‌شود. از این رو گفته می‌شود الکترون در مدار مانا یا حالت مانا قرار دارد.

۳- الکترون می‌تواند از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_2 به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_1 ، یک فوتون تابش می‌شود (شکل ۱۰-۵). در این صورت انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین دو مدار اولیه و مدار نهایی است، یعنی:

$$E_2 - E_1 = hf \quad (۱۰-۷)$$

(معادله گسیل فوتون از اتم)

۱۰-۱ ریزش ۱۱ از سرمرفه و از ۱۰ به معنای ۱۱ و ریزش ۱۰ از سرمرفه و از ۱۰ به معنای ۱۰ است.

شکل ۱۰-۲

تا بر مدل رادفورد، اتم دارای یک هسته بسیار چگال و کوچک ($m \approx 10^{-27} \text{ kg}$) و بار مثبت است که با تعدادی الکترون در فاصله‌هایی به نسبت دور احاطه شده است. در حالت طبیعی، اتم از نظر الکتریکی خنثاست؛ زیرا بار مثبت هسته، درست‌سای مجموع بار منفی الکترون‌های اتم که هسته را دور گرفته‌اند. مدل اتمی رادفورد که آن را **مدل اتم هسته‌ای** می‌نامند، در مواردی با موفقیت همراه بود. ولی با چالش‌های تازایی نیز مواجه شد. این چالش‌ها برای خود رادفورد نیز مطرح شده بود. ولی به‌طور صریح می‌گفت که: «ناید از مدلی که بر اساس بعضی نتایج تجربی ساخته شده است انتظار داشته باشیم که به تمامی چالش‌ها پاسخ دهد.»

اگر الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، مطابق شکل ۱۰-۵ الف، باید تحت تأثیر نیروی واپسی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم باید ناپایدار باشد؛ چیزی که با واقعیت جور در نمی‌آید. همچنین اگر الکترون‌ها، مانند سیاره‌های منظومه خورشیدی که دور خورشید می‌چرخند، به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت پایدار نمی‌ماند. زیرا حرکت مداری الکترون به دور هسته، شتابدار است. بنا بر فیزیک کلاسیک، این حرکت شتابدار الکترون سبب تابش امواج الکترومغناطیسی می‌شود که سبب از دست دادن انرژی مداری الکترون برآید. با تابش موج الکترومغناطیسی توسط الکترون، از انرژی آن کاسته می‌شود. این کاهش انرژی باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته به تدریج کوچک‌تر و سبب از دست دادن انرژی بیشتر شود. این افزایش تدریجی سبب حرکت مداری الکترون‌ها، سبب می‌شود تا سبب از دست دادن انرژی موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به تدریج زیاد شود. به این ترتیب باید طیف امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، یونسه باشد و الکترون پس از گسیل بی‌دری امواج الکترومغناطیسی روی هسته فرو افتد (شکل ۱۰-۵ ب). این نتیجه از آنکه با واقعیت سازگار است یا طیف خطی گسیل شده توسط اتم‌ها نیز جور در نمی‌آید.

۱۰-۲ الف) تابش تابش الکترونیکی که از طرف هسته به الکترون وارد می‌شود. ب) طیف موج الکترومغناطیسی λ طول موج کوتاه‌تر. ج) طیف موج الکترومغناطیسی λ طول موج بلندتر.

شکل ۱۰-۵ الف) تابش تابش الکترونیکی که از طرف هسته به الکترون وارد می‌شود. ب) طیف موج الکترومغناطیسی λ طول موج کوتاه‌تر. ج) طیف موج الکترومغناطیسی λ طول موج بلندتر.

۱۰-۳ در مدل اتمی رادفورد، اتم دارای یک هسته بسیار چگال و کوچک ($m \approx 10^{-27} \text{ kg}$) و بار مثبت است که با تعدادی الکترون در فاصله‌هایی به نسبت دور احاطه شده است. در حالت طبیعی، اتم از نظر الکتریکی خنثاست؛ زیرا بار مثبت هسته، درست‌سای مجموع بار منفی الکترون‌های اتم که هسته را دور گرفته‌اند. مدل اتمی رادفورد که آن را **مدل اتم هسته‌ای** می‌نامند، در مواردی با موفقیت همراه بود. ولی با چالش‌های تازایی نیز مواجه شد. این چالش‌ها برای خود رادفورد نیز مطرح شده بود. ولی به‌طور صریح می‌گفت که: «ناید از مدلی که بر اساس بعضی نتایج تجربی ساخته شده است انتظار داشته باشیم که به تمامی چالش‌ها پاسخ دهد.»

اگر الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، مطابق شکل ۱۰-۵ الف، باید تحت تأثیر نیروی واپسی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم باید ناپایدار باشد؛ چیزی که با واقعیت جور در نمی‌آید. همچنین اگر الکترون‌ها، مانند سیاره‌های منظومه خورشیدی که دور خورشید می‌چرخند، به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت پایدار نمی‌ماند. زیرا حرکت مداری الکترون به دور هسته، شتابدار است. بنا بر فیزیک کلاسیک، این حرکت شتابدار الکترون سبب تابش امواج الکترومغناطیسی می‌شود که سبب از دست دادن انرژی مداری الکترون برآید. با تابش موج الکترومغناطیسی توسط الکترون، از انرژی آن کاسته می‌شود. این کاهش انرژی باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته به تدریج کوچک‌تر و سبب از دست دادن انرژی بیشتر شود. این افزایش تدریجی سبب حرکت مداری الکترون‌ها، سبب می‌شود تا سبب از دست دادن انرژی موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به تدریج زیاد شود. به این ترتیب باید طیف امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، یونسه باشد و الکترون پس از گسیل بی‌دری امواج الکترومغناطیسی روی هسته فرو افتد (شکل ۱۰-۵ ب). این نتیجه از آنکه با واقعیت سازگار است یا طیف خطی گسیل شده توسط اتم‌ها نیز جور در نمی‌آید.

توجه

به نمادگذاری n_U و n_L برای مدارهای مانای پایین و بالا در شکل ۵-۱۳ توجه کنید. این نمادگذاری سبب می‌شود که معادلهٔ تشکیل فوتون از اتم (معادلهٔ ۵-۹) برای جذب فوتون از اتم که در پرسش ۵-۲ به آن اشاره شده است به همین صورت برقرار باشد.

فوتون جذب می‌شود

نمودار ترازهای انرژی الکترون برای اتم هیدروژن: مفید است که مقادیر انرژی الکترون داده شده در معادلهٔ ۵-۵ را مانند شکل ۵-۵ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهید. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n = \infty$ در معادلهٔ ۵-۵ مربوط است و دارای انرژی 0 eV است. برعکس، پایین‌ترین تراز انرژی مربوط به $n = 1$ است و دارای مقدار -13.6 eV است. پایین‌ترین تراز انرژی، حالت پایه نامیده می‌شود تا از ترازهای بالاتر که حالت‌های برانگیخته نامیده می‌شوند متمایز باشد. توجه کنید که با افزایش n چگونی ترازهای حالت‌های برانگیخته به هم نزدیک و نزدیک‌تر می‌شوند.

در اتم هیدروژن و در تمامی اتم‌های الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالاترین الکترون از حالت پایه ($n = 1$) به بالاترین حالت برانگیخته ممکن ($n = \infty$) مقدار 13.6 eV انرژی باید صرف شود. صرف این مقدار انرژی الکترون را از اتم خارج می‌کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می‌شود. این کمترین انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه، انرژی یونش الکترون نامیده می‌شود. مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل بور برای انرژی یونش اتم هیدروژن، توافق بسیار خوبی با مقدار تجربی دارد.

مثال ۵-۶

الکترونی در دومین حالت برانگیخته اتم هیدروژن قرار دارد. الف) انرژی الکترون را در این حالت پیدا کنید. ب) وقتی الکترون از این حالت برانگیخته به حالت پایه چسب می‌دهد چه می‌شود؟ نمودار تراز انرژی آن را رسم کنید. ب) طول موج فوتون گسیل شده را حساب کنید.

پاسخ: الف) در دومین حالت برانگیخته، عدد کوانتومی $n = 2$ است. به این ترتیب از رابطهٔ ۵-۵ داریم:

$$E_2 = \frac{-13.6\text{ eV}}{2^2} = -3.4\text{ eV}$$

ب) شکل مقابل نمودار ترازهای انرژی را برای الکترون اتم هیدروژن در دومین حالت برانگیخته نشان می‌دهد که با گسیل فوتون، از دومین حالت برانگیخته به حالت پایه چسب کرده است.

ب) انرژی الکترون در حالت پایه $E_1 = -13.6\text{ eV}$ است. به این ترتیب انرژی فوتون گسیل شده برابر $E_2 - E_1$ است. از رابطهٔ ۵-۵ داریم:

$$E_2 - E_1 = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{1240\text{ eV}\cdot\text{nm}}{-3.4\text{ eV} - (-13.6\text{ eV})} = 102\text{ nm}$$

تمرین ۵-۴

شکل مقابل تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.

الف) کمترین طول موج فوتونی را پیدا کنید که با گذار بین این ترازها بدست می‌آید.

ب) اگر الکترون از تراز انرژی -1.51 eV به تراز پایه چسب کند طول موج فوتون گسیل شده را پیدا کنید.

ب) کدام گذار بین دو تراز می‌تواند به گسیل فوتونی با طول موج 660 nm منجر شود؟ توجه کنید که این طول موج‌ها در گستره مرئی است.

تمرین ۵-۴

حل مورد انتظار

الف) کوتاه‌ترین طول موج متناظر با شرایطی است که الکترون از حالت پایه ($n = 1$) به حالتی که الکترون در آستانهٔ خروج از اتم است ($n = \infty$) گذار کند. به این ترتیب:

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{E_{\infty} - E_1} = \frac{1240\text{ eV}\cdot\text{nm}}{0 - (-13.6\text{ eV})} \approx 91\text{ nm}$$

ب) انرژی تراز پایه متناظر با -13.6 eV است. بنابراین:

$$\lambda = \frac{1240\text{ eV}\cdot\text{nm}}{(-1.51\text{ eV}) - (-13.6\text{ eV})} = 102\text{ nm}$$

ب) اختلاف انرژی بین دو تراز که متناظر با این طول باشد برابر است:

$$E - E' = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240\text{ eV}\cdot\text{nm}}{660\text{ nm}} \approx 1.88\text{ eV}$$

اگر الکترون از تراز $E = -1.51\text{ eV}$ (دومین حالت برانگیخته) به تراز $E' = -3.4\text{ eV}$ (اولین حالت برانگیخته) برود در این صورت داریم:

$$E - E' = -1.51\text{ eV} - (-3.4\text{ eV}) = 1.89\text{ eV}$$

بنابراین الکترون از دومین حالت برانگیخته به اولین حالت برانگیخته گذاری کند. طول موج فوتون گسیل شده تقریباً متناظر با 660 nm است.

ادامه راهنمای تدریس

در ادامه به استخراج معادله ریبرگ 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 ریبرگ صرفاً مبتنی بر نتایج اندازه‌گیری طول موج‌های گسیل شده از گاز هیدروژن اتمی در ناحیه مرئی طیف به دست آمده است که پیش از ریبرگ توسط بالمر به دست آمده بود. در حالی که مدل بور، 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 طرح در آن نشان می‌دهد که در آن پرتکه تور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کربن‌دی‌اکسید هیدروژن می‌گذرد. با انجام این آزمایش می‌توانیم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین‌کمان) با خط‌های تیز در آن مشاهده می‌شود که در آن بعضی از طول‌موج‌ها از نور سفید جذب شده‌اند.

شکل ۱۶-۵: رومی برای مشاهده طیف‌های جذب، یک جبهه نور سفید که گسترده‌ای پیوسته از طول‌موج‌ها را تولید می‌کند، از طریق حفره‌ای گاز کربن‌دی‌اکسید هیدروژن اتمی می‌گذرد و توسط منشور پراکنده می‌شود و طیف آن روی پرده تشکیل می‌شود. خط‌های تاریک روی طیف، به طول‌موج‌هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم‌های گاز جذب شده‌اند.

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. مقایسه آن طیف و مقایسه آن طیف و همچنین طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که:

- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم‌های گاز هر عنصر، طول‌موج‌های معینی وجود دارد که از مشخصه‌های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول‌موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازه کافی بالا رود و با هر صورت دیگر را بگنجد، آنها را تابش می‌کنند.

شکل ۱۶-۵: طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. اتم‌های درون طیف گسیلی معرف طول‌موج‌های گسیل‌شده و اتم‌های تاریک در زمینه طیف، معرف طول‌موج‌های جذب‌شده توسط اتم‌های گاز هستند.

فصل ۱۰: آشنایی با فیزیک اتمی

استخراج معادله ریبرگ برای اتم هیدروژن از مدل بور؛ همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادله ریبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های پراکنده باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار مای n_1 به مدار مای n_2 می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط ۵-۵ و ۵-۴، بسامد فوتون گسیل‌شده برابر است با:

$$f = \frac{1}{h}(E_{n_1} - E_{n_2}) = \frac{E_{n_1}}{h} - \frac{E_{n_2}}{h} = \frac{1}{h} \left(-\frac{13.6 \text{ eV}}{n_1^2} + \frac{13.6 \text{ eV}}{n_2^2} \right)$$

با استفاده از رابطه $c = \lambda f$ طول موج فوتون گسیل‌شده را پیدا می‌کنیم.

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{1}{h} \left(-\frac{13.6 \text{ eV}}{n_1^2} + \frac{13.6 \text{ eV}}{n_2^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{E_{n_1}}{hc} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

از سوی دیگر داریم:

$$\frac{E_{n_1}}{hc} = \frac{13.6 \text{ eV}}{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}} = 1.09 \times 10^{-8} \text{ (nm)}^{-1}$$

که این مقدار، با تقریب بسیار خوبی همان ثابت ریبرگ R است که پیش از این با آن آشنا شدیم. به این ترتیب داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

این رابطه همان معادله ۵-۵ است که با اصلاح و بازنویسی معادله بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریبرگ به دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطه تجربی ریبرگ را به دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_1 = 3$ به مدار $n_2 = 2$ می‌رود، طول موج گسیل‌شده برابر است با:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = 1.09 \times 10^{-8} \text{ (nm)}^{-1} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9} \right) \Rightarrow \lambda = 667 \text{ nm}$$

مقدار به دست آمده به نحو چشمگیری به طول‌موج خط قرمز در رشته بالمر که از تجربه حاصل شده نزدیک است.

طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و مدل بور: در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانوفر، با مشاهده دقیق طیف خورشید، خط‌های تاریک تاریکی را در آن کشف کرد (شکل ۱۶-۵). 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 فرانوفر 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 ۱۶-۵: خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، به اندازه کافی کشف‌کننده آن خط‌های تاریک تاریک‌تر می‌شود. وقتی نور سفید فرانوفر بود که این خط‌ها را به شکل مورد مطالعه قرار داد.

۴-۵ لیزر

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 ۴-۵. گسیل القایی با گسیل خود به خود فوتون‌ها مقایسه شده است. در کتاب‌های تخصصی به فوتون‌های هم‌بسامد، هم‌جهت و هم‌فاز، 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 دانش‌آموزان را به اهمیت وجود ترازهای شبه پایدار برای ایجاد وارونی جمعیت جلب کنید. به این منظور به تفاوت زمانی باقی ماندن الکترون‌ها در ترازهای شبه پایدار (10^{-3} s) نسبت به باقی ماندن الکترون‌ها در ترازهای برانگیخته معمولی (10^{-8} s) اشاره کنید. این تفاوت زمانی قابل توجه، سبب ایجاد وارونی جمعیت می‌شود که در فرایند تشکیل باریکه لیزر اهمیت کلیدی دارد.

شکل ۴-۵: بخش از کارهای لیزر. الف) بر برهنگی، سیاه بر چوبکری، سیاه بر آرماسیون لیزر و پیزو الکتریسیته، سیاه بر چوبکری، سیاه بر چوبکری. ب) برهنگی، سیاه بر چوبکری، سیاه بر آرماسیون لیزر و پیزو الکتریسیته، سیاه بر چوبکری، سیاه بر چوبکری. ج) برهنگی، سیاه بر چوبکری، سیاه بر آرماسیون لیزر و پیزو الکتریسیته، سیاه بر چوبکری، سیاه بر چوبکری.

تختین لیزر، موسوم به لیزر فونون، را تودور مایس (۱۹۲۳-۲۰۰۷ م.) در سال ۱۹۶۰ میلادی ساخت. ممتی سی از آن در همان سال، علی جوان و همکارانش موفق به ساخت نخستین لیزر کاری هلیوم نئون شدند.

مطابق مدل اتمی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود. فرایند گسیل می‌تواند به صورت **گسیل خودبه‌خود** و یا **گسیل القایی** باشد. در گسیل خودبه‌خود (شکل ۴-۵) الف) الف) فوتون در جهش کاتوره‌ای گسیل می‌شود. در حالی که در گسیل القایی (شکل ۴-۵) ب) که برای نخستین بار در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط آئنشتین مطرح شد، یک فوتون ورودی، الکترون برانگیخته را تحریک (الف) می‌کند تا تراز انرژی خود را تغییر دهد و به تراز پایین‌تر برود. برای گسیل القایی، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی‌های دو تراز یعنی $E_2 - E_1$ یکسان باشد.

گسیل القایی سه ویژگی دارد: اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می‌شود (شکل ۴-۵) ب). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت می‌کند. دوم اینکه فوتون گسیل‌شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می‌کند. سوم اینکه فوتون گسیل‌شده در برآیند گسیل‌شده، هم‌فاز، هم‌جهت و هم‌بسامد با فوتون ورودی است.

۱۳۲

فصل ۱۱: آشنایی با فیزیک اتمی

با فوتون ورودی همگام با دارای همان فاز است. به این ترتیب فوتون‌هایی که باریکه لیزری را ایجاد می‌کنند هم‌بسامد، هم‌جهت و هم‌فاز هستند.

در گسیل القایی یک چنسمه انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر برانگیخته کند. این انرژی می‌تواند به روش‌های متعددی از جمله درخش‌های شدید نور معمولی و یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم شود. اگر انرژی کافی به آنها داده شود، الکترون‌های بیشتری به تراز انرژی بالاتر برانگیخته خواهند شد. شرطی که به **وارونی جمعیت** معروف است (شکل ۴-۵) ج).

وارونی جمعیت الکترون‌ها در یک محیط لیزری، مربوط به وضعیتی است که تعداد الکترون‌ها در ترازهای موسوم به **ترازهای شبه پایدار** نسبت به ترازهای بسیار بیشتر باشند. در این ترازها، الکترون‌ها مدت زمان بسیار طولانی‌تری (10^{-3} s) نسبت به حالت برانگیخته معمولی (10^{-8} s) باقی می‌مانند. این زمان طولانی‌تر، فرصت بیشتری برای افزایش وارونی جمعیت و در نتیجه تقویت نور لیزر فراهم می‌کند.

لیزر کاری هلیوم نئون (He-Ne)

شکل الف، یک لیزر هلیوم نئون به شکل بی، طرح ساده از سائوکار ایجاد باریکه لیزر را درون آن لیزرها نشان می‌دهد. گاز کربناری شامل ۹۵٪ هلیوم و ۵٪ نئون درون لوله‌نیمه‌ای قرار دارد. برای ایجاد وارونی جمعیت، از تخلیه الکتریکی یا ولتاژ بالا درون مخلوط گازی استفاده می‌شود. وقتی یک اتم با گسیل خودبه‌خود، فوتونی موازی با محور لوله گسیل کند، فرایند ایجاد باریکه لیزر شروع می‌شود. این فوتون با گسیل القایی باعث می‌شود تا اتم دیگری دو فوتون موازی با محور لوله گسیل کند. این دو فوتون با گسیل القایی، چهار فوتون ایجاد می‌کنند. از چهار فوتون، هشت فوتون حاصل می‌شود و به همین ترتیب نوعی هین فوتونی به وجود می‌آید. برای اینکه فوتون‌های بیشتر و بیشتری با گسیل القایی به وجود آیند دو انتهای لوله آینه‌هایی قرار می‌دهند تا فوتون‌ها را در داخل مخلوطی از گازهای هلیوم و نئون به جلو و عقب بازتاب دهند. از آنجا که یکی از آینه‌ها بازتاب‌دهنده کامل نیست بخشی از فوتون‌ها از لوله خارج می‌شوند و باریکه لیزر را تشکیل می‌دهند. بازده لیزرهای هلیوم نئون بسیار کم و در حدود ۰/۱ تا ۰/۱۱ درصد است. ولی به دلیل کیفیت خوب باریکه لیزر ایجادشده، کاربرد زیادی در صنعت و فعالیت‌های علمی و آزمایشگاهی دارند.

الف) تصویر از لیزر کاری هلیوم نئون

ب) آینه‌ای که نور را منعکس می‌کند

ج) آینه‌ای که نور را عبور می‌دهد

د) لیزر کاری هلیوم نئون

۱۳۲

پرسی‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۵

۱ الف) پدیده فتوالکتریک را تعریف کنید.

ب) شکلی برای نشان دادن این پدیده رسم کنید.

پ) توضیح دهید نظریه فوتون چگونه به توجیه پدیده فتوالکتریک 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.

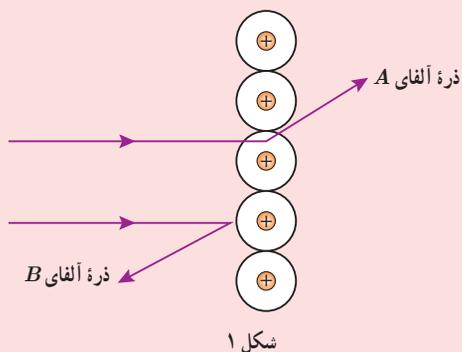
الف) یک مدل اتمی را شرح دهید که مسیر ذره‌های آلفا در برخورد با صفحه نازک فلزی را توضیح می‌دهد.

ب) تامسون معتقد بود که اتم از بارهای منفی مستقر در نوعی «خمیر» مثبت تشکیل می‌شود. این مدل را مدل کیک کشمش می‌خوانند.

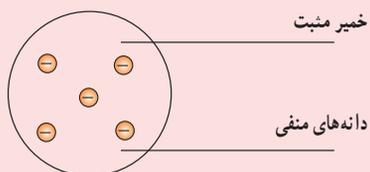
نمودار شکل ۲ مدلی از این نوع اتم را نشان می‌دهد.

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 ۱۲ kV 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 ۵۸۹ nm و ۵۸۹ nm 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 $E_n = -۱۳\text{ eV}/n^2$ ، ترازهای انرژی مربوط به طول موج‌های ۶۵۶ nm و ۱۰۲۶ nm در طیف هیدروژن

را مشخص کنید.

الف) شکل زیر ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد،

$n = \infty$	←	0°
$n = 5$	←	$-8/8 \times 10^{-2} \text{J}$
$n = 4$	←	$-1/4 \times 10^{-19} \text{J}$
$n = 3$	←	$-2/4 \times 10^{-19} \text{J}$
$n = 2$	←	$-5/4 \times 10^{-19} \text{J}$
$n = 1$	←	$-2/2 \times 10^{-18} \text{J}$

a) معنای حالت پایه چیست؟

b) چگونه تخلیه الکتریکی در هیدروژن باعث ایجاد خط‌های مرئی در طیف می‌شود؟

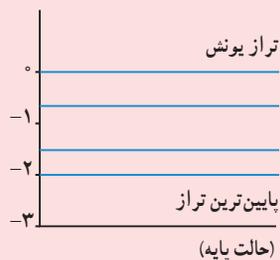
c) نشان دهید که کمترین طول موج تابش الکترومغناطیسی گسیل شده از هیدروژن تقریباً 90 nm است.

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 نابرانگیخته را توضیح دهید.

$n = \infty$	-----	0°
۵	—————	$-0.90 \times 10^{-19} \text{ J}$
۴	—————	$-1.45 \times 10^{-19} \text{ J}$
۳	—————	$-2.40 \times 10^{-19} \text{ J}$
۲	—————	$-5.40 \times 10^{-19} \text{ J}$
۱	—————	$-21.8 \times 10^{-19} \text{ J}$

۹ به مجموعه‌ای از اتم‌های هیدروژن در حالت پایه، نور فرابنفش به طول موج $59/5 \text{ nm}$ می‌تابانیم. انرژی جنبشی الکترون‌های گسیل شده را حساب کنید.

۱۰ بیشینه تندی فوتوالکترون‌های گسیل شده از سطح فلزی با تابع کار $3/2 \text{ eV}$ را بر اثر تابش باریکه نوری با طول موج 310 nm به دست آورید (جرم الکترون را $9.10 \times 10^{-31} \text{ kg}$ بگیرید).

راهنمای پاسخ‌یابی پرشی‌ها و مسئله‌های فصل ۵

۱-۵ 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:

$$E_t = Pt = \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} \right) (6 \cdot 0 \cdot \text{s}) = 300 \text{ J}$$

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) $R_a = \frac{\text{توان خروجی}}{\text{توان ورودی}} = \frac{5.0 \times 10^{-3} \text{ W}}{5.0 \text{ W}} = 10^{-4}$

که برابر ۰/۰۱ درصد است.

ب) ابتدا انرژی هر فوتون خروجی را پیدا می‌کنیم.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{633 \text{ nm}} = 1.96 \text{ eV}$$

$$= (1.96 \text{ eV}) \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 3.13 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_t = Pt = \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} \right) (1 \text{ s}) = 5 \times 10^{-3} \text{ J}$$

$$n = \frac{E_t}{E} = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ J}}{3.13 \times 10^{-19} \text{ J}} = 1.59 \times 10^{16}$$

انرژی کل فوتون‌های خروجی در هر ثانیه برابر است با:

تعداد فوتون‌های خروجی در هر ثانیه برابر است با:

۳ چشمه نور را در مرکز کره‌ای به شعاع ۱ km در نظر می‌گیریم.

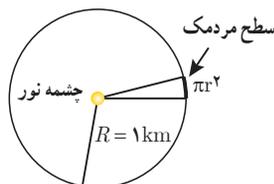
ابتدا تعداد فوتون‌هایی را که با طول موج ۵۵۰ nm از لامپ در هر ثانیه گسیل می‌شود مشابه قسمت (ب) مسئله قبل به دست می‌آوریم.

انرژی کل فوتون‌های خروجی با طول موج ۵۵۰ nm در هر ثانیه برابر است با:

$$E_t = \frac{1}{100} \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} \right) (1 \text{ s}) = \frac{5}{100} \text{ J}$$

انرژی هر فوتون با طول موج ۵۵۰ nm برابر است با:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{550 \text{ nm}} = 2.25 \text{ eV}$$



۵-۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

۱. یک لامپ حاوی گاز کاتود سرد، فوتون‌های با طول موج ۵۸۹ nm گسیل می‌کند.

الف) با استفاده از انرژی فوتون‌های گسیل‌شده را بر حسب ولت و همچنین الکترون ولت بیان کنید.

ب) فرض کنید توان تابشی مفید لامپ ۵۰ W است. در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟

۲. توان باریکه تور خروجی یک لیزر گازی هلیوم-نئون ۵۰ mW است. اگر توان ورودی این لیزر ۵۰۰ W باشد.

الف) بازده لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول موج باریکه تور خروجی ۶۳۳ nm باشد، شمار فوتون‌های را پیدا کنید که در هر ثانیه از این لیزر گسیل می‌شود.

۳. یک لامپ رشته‌ای با توان ۱۰۰ W از فلزات یک کاتودی دانه می‌شود. فرض کنید نور لامپ به طور یکنواخت در فضای اطراف آن منتشر می‌شود و بازده لامپ ۵ درصد است (یعنی ۵ W تابش مری گسیل می‌کند) و فقط ۱ درصد تابش دارای طول موجی در حدود ۵۵۰ nm است. در هر ثانیه چه تعداد فوتون با این طول موج وارد مردمک‌های چشم نظری می‌شود که در این فاصله قرار دارد؟ (قطر مردمک را ۲ mm در نظر بگیرید.)

۴. شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود ۱۲۶ W/m² است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر ۱ m² مقدار انرژی ۱۲۶ J می‌رسد. فرض کنید در هر ثانیه زمین به سطحی عمق ۱ m انرژی از شدت آن به غلت چسب در جو و ابرها از دست می‌رود. اگر شدت تابشی متوسط خورشید در سطح زمین با زای هر متر مربع حدود ۳۰۰ 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؟
ج) با معادله مربوط به اثر فوتوالکتریک به صورت $K_{\text{max}} = hf - W$ بیان می‌شود. سه بخش این معادله را به طور جداگانه توضیح دهید.

$$= (2/25 \text{ eV}) \left(\frac{1/6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 3/60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

تعداد فوتون‌هایی که در هر ثانیه با طول موج ۵۵۰ nm 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 ۱ m² در هر ثانیه برابر است با :

$$E_t = \left(300 \cdot \frac{\text{J}}{\text{sm}^2} \right) (1 \text{ m}^2) (\text{s}) = 300 \text{ J}$$

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 ۱۰۰۰ J 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 هر یک 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 هر یک 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

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۵

۳۴۳

۱. توضیح دهید چرا 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. حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سیم برابر ۲.۲۸ eV است.
- الف) طول موج آستانه برای گسیل فوتوالکتریک از سطح فلز سیم چقدر است و با مراجعه به شکل ۶-۴ معلوم کنید این طول موج مربوط به چه رنگی است؟
- ب) آیا فوتون‌هایی با طول موج ۶۸۰ nm قادر به جدا کردن الکترون از سطح فلز هستند؟
۳. تابش فرافشانی با طول موج ۲۰۰ nm بر سطح فلزی از جنس نیکل با تابع کار ۲.۱۰ eV بیاورد. بیشینه انرژی فوتوالکتریک‌های جدا شده از سطح نیکل را حساب کنید.
۴. هر گاه بر سطح فلزی نوری با طول موج ۲۲۰ nm بیاورد بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکتریک‌های گسیل‌شده حدود ۰.۵۰ eV است. بسامد آستانه برای گسیل فوتوالکتریک‌ها از سطح فلز چقدر است؟
۵. ۳-۲ سطح خطی و مدل اتم بور را در نظر بگیرید.
- الف) سطح گسیل یک خطی در حضور در چه مواردی پوسته و در چه مواردی گسسته است؟ منشأ فیزیکی این تفاوت را توضیح دهید.
- ب) توضیح دهید چگونه می‌توان سطح‌های گسیلی پوسته و خطی را ایجاد کرد.
۶. شکل صفحه‌ی عدده نوشته سطح گسیلی گاز هیدروژن امی را روی نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد که بر اساس مدل امی بور رسم شده است.

پوشش‌ها و مسئله‌های فصل ۵

۳۴۰۰۰۰

- 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
- ج) حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز
- د) تغییر در انرژی جنبش الکترون‌ها پس از جدا شدن.
- ۲. بسامد موج پرتو خرومی 633nm باشد. نشان دهید که در هر ثانیه از یک فوتون 100W از نفاذ یک کیلوواتی دیده می‌شود. فرض کنید نور لامپ به‌طور یکنواخت در فضای اطراف آن منتشر می‌شود و بازده لامپ ۵ درصد است (یعنی 5W پهنای مری گسیل می‌کند) و فقط ۱ درصد این پهنای 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 7mm در نظر بگیرید.)
- ۳. شدت پهنای خورشید در خارج جو زمین حدود 126W/m^2 است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر 1m^2 مقدار انرژی 126J می‌رسد. فرض این پهنای به سطح زمین می‌رسد مقداری زیادی از شدت آن به علت جذب در جو و ابرها از دست می‌رود. اگر شدت پهنای متوسط خورشید در سطح زمین بازای 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.
- ۴. الف) منظور از اثر فوتوالکتریک چیست؟
ب) توضیح دهید نظریه کوانتومی پهنای که توسط اینشتین مطرح شد و در آن نور به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفته شده چگونه به تبیین اثر فوتوالکتریک کمک کرد؟
ج) معادله مربوط به اثر فوتوالکتریک به‌صورت $K_{\text{max}} = hf - W_0$ بیان می‌شود. سه بخش این معادله را به‌طور جداگانه توضیح دهید.

۱۳۳

تعداد فوتون‌هایی را که با سطح فلز برهم‌کنش می‌کنند افزایش می‌دهد و این برهم‌کنش سبب افزایش انرژی درونی فلز و در نتیجه افزایش دمای آن می‌شود. (پ) سبب کاهش فوتون‌ها و در نتیجه کاهش تعداد فوتوالکترون‌هایی می‌شود که از سطح فلز خارج می‌شوند.

۷ الف)

$$W_0 = 2/28 \text{ eV}$$

$$f_e = \frac{W_0}{h} \Rightarrow \lambda_e = \frac{hc}{W_0} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{2/28 \text{ eV}} \approx 544 \text{ nm}$$

این طول موج متناظر با رنگ سبز است.

(ب) خیر، زیرا بسامد آنها کمتر از بسامد آستانه است.

۸

$$K_{\text{max}} = hf - W_0 = \frac{hc}{\lambda} - W_0$$

$$= \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{200 \text{ nm}} - 4/90 \text{ eV} = 1/3 \text{ eV}$$

۹

$$K_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda} - W_0 \Rightarrow 0/5 \text{ eV} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{420 \text{ nm}} - W_0$$

$$\Rightarrow W_0 = 2/45 \text{ eV}$$

$$f_e = \frac{W_0}{h} = \frac{2/45 \text{ eV}}{4/14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 5/92 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

۲-۵ و ۳-۵ طیف خطی و مدل اتم رادرفورد - بور :

۱۰ در پاراگراف اول بخش ۲-۵ در خصوص 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 $13/6 \text{ eV}$ 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 الکترون‌ها بین دو مدار، تنها فوتون‌هایی با انرژی معین می‌توانند گسیل یا جذب شوند. به همین دلیل طیف گسیلی یا جذبی گازهای اتمی، خطی است.

(پ) بلندترین طول موج به ازای $n=2$ و کوتاه‌ترین طول موج به ازای $n=\infty$ به دست می‌آید. به این ترتیب داریم:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{4}{3R} \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{4}{3R} - \frac{1}{R} = \frac{1}{3R} \approx 30 \text{ nm}$$

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{1}{R}$$

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 (۱۰^{-۸} s) و هنگام برگشت این الکترون‌ها ممکن است مستقیماً به تراز اولیه خود نروند و پس از رفتن روی ترازهای میانی به تراز اولیه خود بازگردند (شکل ب).

۱۳ الف و ب) به شرح مدل رادرفورد و شکل ۵-۵ توجه شود.

پ) زیرا ورقه‌های طلا را بدون آنکه دوام خود را از دست بدهند به اندازه کافی می‌توان نازک ساخت. معمولاً ورقه‌های طلا را با ضخامت صدها اتم نیز می‌توان ساخت.

ت) ناپایداری اتم. زیرا مطابق فیزیک کلاسیک، الکترون‌های (بار منفی) در حال چرخش به دور هسته (با بار مثبت) به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند و سرانجام روی هسته فرو می‌افتند.

۱۴ الف) با استفاده از رابطه ۵-۸ ($E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2}$) داریم:

$$\Delta E(n_u \rightarrow n_L) = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n_u^2} + \frac{13.6 \text{ eV}}{n_L^2} = (-13.6 \text{ eV}) \left(\frac{1}{n_u^2} - \frac{1}{n_L^2} \right)$$

$$\Delta E(4 \rightarrow 2) = \Delta E(4 \rightarrow 3) + \Delta E(3 \rightarrow 2) \tag{ب}$$

$$(-13.6 \text{ eV}) \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{2^2} \right) = (-13.6 \text{ eV}) \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{3^2} \right) + (-13.6 \text{ eV}) \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{2^2} \right)$$

$$\frac{1}{16} - \frac{1}{4} = \frac{1}{16} - \frac{1}{9} + \frac{1}{9} - \frac{1}{4} = \frac{1}{16} - \frac{1}{4}$$

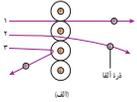
۱۵ الف) گذارهای ممکن از $n=5$ به حالت پایه ($n=1$) عبارت‌اند از:

$$\Delta E(5 \rightarrow 4) \quad \text{و} \quad \Delta E(4 \rightarrow 3) \quad \text{و} \quad \Delta E(4 \rightarrow 2) \quad \text{و} \quad \Delta E(4 \rightarrow 1)$$

$$\Delta E(5 \rightarrow 3) \quad \text{و} \quad \Delta E(3 \rightarrow 2) \quad \text{و} \quad \Delta E(3 \rightarrow 1)$$

شکل ۵-۱۸: انتقال الکترون به فرکانس بالاتر

ب) تنها تعداد بسیار کمی از ذره‌ها مانند ذره ۳ منحرف می‌شوند. این امر چه نکته‌ای را درباره ساختار اتم طلا نشان می‌دهد؟
 ب) چرا رادرفورد در آزمایش خود از صفحه بسیار نازک طلا استفاده کرده بود؟
 ت) شکل ب، به کدام مشکل مدل رادرفورد اشاره دارد؟ در مدل بور چگونه این مشکل رفع شده است؟



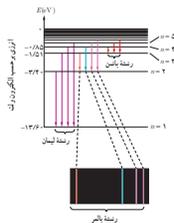
۱۶ با استفاده از رابطه بور برای انرژی الکترون در اتم هیدروژن، اختلاف انرژی $E_4 - E_2 = E_4 - E_2 = -13.6 \text{ eV} \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{2^2} \right)$ را حساب کنید.

ب) نشان دهید که: $\Delta E(4 \rightarrow 2) = \Delta E(4 \rightarrow 3) + \Delta E(3 \rightarrow 2)$

۱۷ الکترون اتم هیدروژن در تراز $n=5$ قرار دارد. فرار دارد.

الف) با در نظر گرفتن تمام گذارهای ممکن، اگر این اتم به حالت پایه برود، امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

ب) فرض کنید فقط گذارهای $\Delta n = 1$ مجاز باشند، در این صورت امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟



الف) منظور از $n=6$ و انرژی -13.6 eV چیست؟
 ب) بر اساس مدل اتمی بور دلیل خطی بودن طیف گسیل گاز هیدروژن اتمی را توضیح دهید.

ب) اختلاف کوتناوبین و بلندترین طول موج در هر رشته را، گستره طول موج‌های آن رشته می‌نامند. گستره طول موج‌های رشته لیمن ($n_f = 1$) را پیدا کنید.

۱۸ الف) فرکانس جذب فوتون توسط اتم را توضیح دهید.
 ب) با استفاده از مدل بور، چگونه می‌تواند خط‌های تاریک در طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را توجیه کنید؟

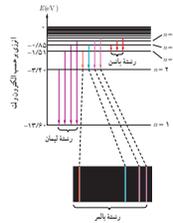
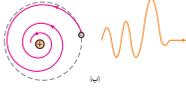
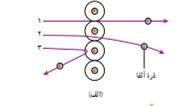
ب) وقتی که نور فرابنفش به بسیاری از مواد تابیده شود، تابش مرئی از خود گسیل می‌کنند. این پدیده فیزیکی نمونه‌ای از فوتوسنتزی است. آزمایش نشان می‌دهد در پدیده فوتوسنتزی

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؟

۱۹ متناهی مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که از براندگی ذره‌های آلفا توسط یک ورقه نازک طلا دست‌آمده 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.

فصل ۵-۴: انتقالی با فرکانس

ب) تنها تعداد 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) شکل ب. به کدام مشکل مدل رادرفورد اشاره دارد؟ در مدل بور چگونه این مشکل رفع شده است؟



الف) منظور از $n=6$ و انرژی -2.18×10^{-18} چیست؟
 ب) بر اساس مدل اتمی بور دلیل خطی بودن طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را توضیح دهید.
 ج) اختلاف کوتناوبین بلندترین و بلندترین طول موج در هر رشته را، گستره طول موج‌های آن رشته می‌نامند. گستره طول موج‌های رشته لیسان ($n=1$) را پیدا کنید.

د) الف) فرکانس جذب فوتون توسط اتم را توضیح دهید.
 ب) با استفاده از مدل بور، چگونه می‌تواند خط‌های نازک در طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را توجیه کنید؟
 ج) 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 گسیل‌یافته معمولاً برابر همان طول موج نور فرودی یا بزرگتر از آن است. این پدیده را چگونه به کمک مدل بور می‌توانید تفسیر کنید؟
 د) منتهای مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که از پراکنش ذره‌های آلفا توسط یک ورقه نازک طلا دست‌آمده 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.

$$\Delta E(2 \rightarrow 1) \quad \text{و} \quad \Delta E(5 \rightarrow 2)$$

$$\Delta E(5 \rightarrow 1)$$

همان‌طور که دیده می‌شود در مجموع امکان 10° 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

۱۶ الف) یعنی اتم‌ها در حالت عادی هستند و برانگیخته نشده‌اند.

ب) این انرژی سبب برانگیخته شدن اتم‌ها می‌شود.

پ) حالتی است که تعداد اتم‌های برانگیخته شده فراتر از تعداد اتم‌ها در حالت معمول باشد.

ت) درست برابر اختلاف انرژی ترازهای E_u و E_L است.

ث) هم بسامد، هم جهت و همگام (هم فاز) اند.

۱۷ فوتون‌های گسیل شده از رشته تنگستن لامپ دارای طیف گسترده و

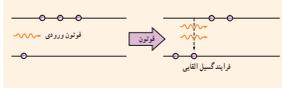
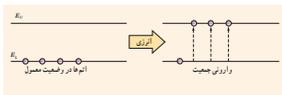
پیوسته‌ای از طول موج‌ها هستند و در تمام جهت‌های مختلف حرکت می‌کنند

درحالی‌که آینه درون چراغ‌قوه جهت‌مندی بهتری به فوتون گسیل شده از

لامپ می‌دهد و فوتون‌ها در گستره فضایی کوچک‌تری منتشر می‌شوند.

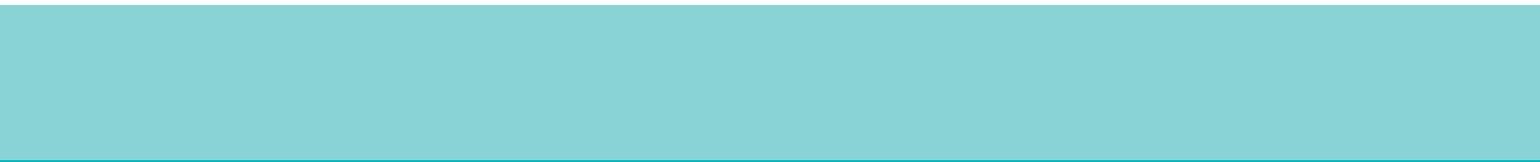
فوتون‌های گسیل شده از لیزر، افزون بر اینکه هم‌بسامدند، هم‌جهت و همگام هستند.

ب) منظور از هم‌ارونی چیست؟
 ج) تا انرژی فوتون ورودی چقدر باید باشد تا فرکانس القایی انجام شود؟
 د) تا فوتون‌هایی که بر اثر فرکانس القایی و جهش الکترون‌ها به تراز پایین‌تر ایجاد می‌شوند چه ویژگی مشترکی دارند؟
 ب) تاکنون می‌تواند؟



د) در شکل زو نحوه گسیل فوتون‌ها از هر 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





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.
- نحوهٔ جلوگیری و نفوذ هر کدام از پرتوهای α ، β و γ را به‌طور عملی پیشنهاد دهند.
- نحوهٔ کار آشکارسازی دود را شرح دهند.

بودجه‌بندی پیشنهادی

- 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.

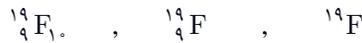
تمرین ۶-۱

با توجه به جدول تناوبی عناصر که در پیوست کتاب آمده است
الف) عدد اتمی F عبارت است از $Z=9$. به این ترتیب:

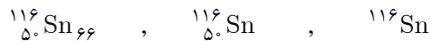
$$A = Z + N = 9 + 10 = 19$$

در نتیجه نماد هسته برای فلور را می‌توان به یکی از صورت‌های

زیر نوشت:



ب) عدد اتمی قلع برابر $Z=50$ است. به این ترتیب:

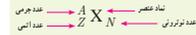


شکل ۶-۱: آشاپاریا با فلوریک هسلیوم



صورت‌های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می‌کنند (جدول ۶-۳).
ایزوتوپ‌های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آنها حساب شده‌اند. به جز هیدروژن، ایزوتوپ‌های کربن هستند. جرم‌های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم‌های اتمی ایزوتوپ‌های پروتون‌ها و نوترون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می‌کند. به همین سبب هسته‌هایی که تعداد پروتون برابر است، خواص شیمیایی مشابهی دارند. در نتیجه این هسته‌ها در جدول تناوبی عناصر هم‌مکان هستند و بنابراین ایزوتوپ (هم‌مکان) نامیده می‌شوند. به طور مثال، کربن به دو صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می‌شود که یکی از ۶ پروتون و ۶ نوترون (${}^{12}_6\text{C}$)، و دیگری از آنها از ۶ پروتون و ۷ نوترون (${}^{13}_6\text{C}$) تشکیل شده است. این دو هسته، ایزوتوپ‌های کربن هستند. جرم‌های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم‌های اتمی ایزوتوپ‌های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آنها حساب شده‌اند. به جز هیدروژن، ایزوتوپ‌های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می‌کنند (جدول ۶-۳).

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X، نماد هسته به صورت زیر نشان داده می‌شود:



مشخص کردن N در نماد شیمیایی X، نماد هسته به صورت زیر نشان داده می‌شود: ۱- عدد اتمی Z، ۲- عدد جرمی A، ۳- عدد نوترونی N.

همچنین در بسیاری موارد Z را هم می‌توان ذکر نکرد؛ زیرا نماد شیمیایی عنصر، نشان‌دهنده مقدار Z است.

برای مثال، هسته اتم آلومینیم را به جای ${}^{27}_{13}\text{Al}$ می‌توان به صورت ${}^{27}\text{Al}$ یا ${}^{27}_{13}\text{Al}$ نمایش داد.

ایزوتوپ‌ها: ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می‌کند. به همین سبب هسته‌هایی که تعداد پروتون

برابر است، خواص شیمیایی مشابهی دارند. در نتیجه این هسته‌ها در جدول تناوبی عناصر هم‌مکان هستند و بنابراین ایزوتوپ (هم‌مکان) نامیده می‌شوند. به طور مثال، کربن به دو

صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می‌شود که یکی از ۶ پروتون و ۶

نوترون (${}^{12}_6\text{C}$)، و دیگری از آنها از ۶ پروتون و ۷ نوترون (${}^{13}_6\text{C}$) تشکیل شده است. این دو هسته،

ایزوتوپ‌های کربن هستند. جرم‌های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم‌های اتمی

ایزوتوپ‌های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آنها حساب شده‌اند. به جز هیدروژن،

ایزوتوپ‌های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می‌کنند (جدول ۶-۳).

جدول ۶-۳: ایزوتوپ‌های مختلف چند عنصر و درصد فراوانی آنها در طبیعت

نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت	نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت
هیدروژن ۱	H	۱	۰	۹۹٫۹۸۵	کربن ۱۲	${}^{12}_6\text{C}$	۶	۶	۹۸٫۹۰۳
دوتریم (هیدروژن ۲)	D	۱	۱	۰٫۰۱۵	کربن ۱۳	${}^{13}_6\text{C}$	۶	۷	۱٫۰۷
ترسیم (هیدروژن ۳)	T	۱	۲	بسیار نادر	اورانیم ۲۳۵	${}^{235}_{92}\text{U}$	۹۲	۱۴۳	۰٫۰۰۷۲
کربن ۱۳	${}^{13}_6\text{C}$	۶	۷	۱٫۰۷	اورانیم ۲۳۸	${}^{238}_{92}\text{U}$	۹۲	۱۴۶	۹۹٫۹۸۴

تمرین ۶-۱

با توجه به آنچه تاکنون دیدیم 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 کتاب‌های تخصصی فیزیک هسته‌ای، این نماد را نام نموده (مشکل ۶-۱) می‌باشد.

۱۳۹

راهنمای معلم

پایداری هسته

در این قسمت ویژگی‌های نیروی هسته‌ای و اهمیت آن در پایداری هسته با توجه به نیروی دافعه شدید بین پروتون‌های درون هسته بررسی شده است. لازم است توجه کنید که در این کتاب به تقسیم‌بندی نیروی هسته‌ای به دو نیروی هسته‌ای ضعیف و هسته‌ای قوی پرداخته نشده است بلکه صرفاً به مفهوم نیروی هسته‌ای به عنوان نیروی جاذبه که بین نوکلئون‌های مجاور یکدیگر وارد می‌شود اشاره شده است. همان‌طور که در شکل ۶-۲ نیز نشان داده شده است، نیروی هسته‌ای تنها بین نوکلئون‌های مجاور (یا به عبارت دیگر همسایه‌های اول) وارد می‌شود، زیرا نیروی هسته‌ای به شدت کوتاه‌برد است. دلیل نام‌گذاری نوکلئون نیز برای پروتون‌ها و نوترون‌های درون هسته به دلیل ماهیت نیروی هسته‌ای باز می‌گردد. از منظر نیروی هسته‌ای، تمامی ذرات داخل هسته که مجاور یکدیگرند نیروی هسته‌ای جاذبه‌ای به یکدیگر وارد می‌کنند و این نیرو مستقل از بار الکتریکی نوکلئون‌ها است.

فصل ۶: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

تورم ($Z=90$) و اورانیوم ($Z=92$) که در طبیعت یافت می‌شوند سایر هسته‌های سنگین با عدد اتمی بزرگتر از ۸۳ پایدارند. این دو عنصر، تنها عنصرهایی‌اند که واپس‌آنها چنان کند است که از هنگام تشکیل منظومه شمسی در چندین میلیارد سال پیش، فقط مقدار کمی از آنها بر اثر واپس‌آ، به عنصرهای سبک‌تر تبدیل نشده‌اند.

پرسش ۶-۱

هر نقطه آبی رنگ در نمودار شکل ۳-۶ نشان‌دهنده یک هسته پایدار است. با توجه به این نمودار به پرسش‌های زیر پاسخ دهید. الف) نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون (N/Z) برای هسته‌های پادار مختلف ثابت است یا متفاوت؟ توضیح دهید. ب) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از این نمودار تشخیص داد؟

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازی انرژی هسته: برای جدا کردن نوترون‌های یک هسته، انرژی لازم است. انرژی لازم برای این منظور، **انرژی بستگی هسته‌ای** نامیده می‌شود. شکل ۴-۶ این موضوع را به‌طور طرّح‌وار نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن **کاستی جرم** گفته می‌شود، مطابق رابطه معروف اینشتین ($E=mc^2$)، در مری تبدیل نور (c^2) ضرب کنیم **انرژی بستگی هسته‌ای** بدست می‌آید. توجه کنید که هرچه اختلاف جرم هسته از مجموع جرم نوترون‌های تشکیل‌دهنده آن بسیار ناچیز است، چون در c^2 عدد بسیار بزرگی است ضرب می‌شود، این کاستی جرم اندک، معادل انرژی قابل ملاحظه‌ای است.

نوترون‌ها جدا شده اند (جرم منفی) + هسته (جرم مثبت) = انرژی + هسته‌ای پایداری بیشتر + نوترون‌های ناپایدار (جرم منفی) تشکیل‌دهنده آن تقسیم شود.

انرژی نوترون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کوانتیده‌اند و نوترون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین، همان‌طور که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از تراز پایه به ترازهای بالاتر بروند، نوترون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و در نتیجه هسته پراکنده شود. هسته پراکنده یا گسیل فون به تراز پایه می‌گردد. انرژی فون گسیل‌شده، با اختلاف انرژی بین تراز پراکنده و تراز پایه برابر است. هسته پراکنده را با گمانش ستاره روی نماد Δ بصورت ${}^A_Z X^{\Delta}$ مشخص می‌کنند. نکته قابل توجه آن است که اختلاف بین ترازهای انرژی نوترون‌ها در هسته از مرتبه 10^6 eV نامرتبه 10^7 eV است. در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبه 10^4 eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی پراکنده نمی‌شوند.

۱-۱ رابطه معروف اینشتین ($E=mc^2$) در نمایی (۱) نوشته شده است.
۱-۲ محاسبه انرژی بستگی هسته طرّح از رابطه درسی این کتاب است و از نرم‌افزار آن آسان‌تر است.

شکل ۳-۶ نمودار تغییرات N بر حسب Z برای هسته‌های پادار و نوترون‌ها. برای هسته‌های پادار و نوترون‌ها، هر نقطه آبی رنگ نشان‌دهنده یک هسته پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته‌های ناپایدار مختلف نشان می‌دهند.

شکل ۳-۷ نمودار تغییرات N بر حسب Z برای هسته‌های پادار و نوترون‌ها. برای هسته‌های پادار و نوترون‌ها، هر نقطه آبی رنگ نشان‌دهنده یک هسته پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته‌های ناپایدار مختلف نشان می‌دهند.

فصل ۶: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

تورم ($Z=90$) و اورانیوم ($Z=92$) که در طبیعت یافت می‌شوند سایر هسته‌های سنگین با عدد اتمی بزرگتر از ۸۳ پایدارند. این دو عنصر، تنها عنصرهایی‌اند که واپس‌آنها چنان کند است که از هنگام تشکیل منظومه شمسی در چندین میلیارد سال پیش، فقط مقدار کمی از آنها بر اثر واپس‌آ، به عنصرهای سبک‌تر تبدیل نشده‌اند.

پرسش ۶-۱

هر نقطه آبی رنگ در نمودار شکل ۳-۶ نشان‌دهنده یک هسته پایدار است. با توجه به این نمودار به پرسش‌های زیر پاسخ دهید. الف) نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون (N/Z) برای هسته‌های پادار مختلف ثابت است یا متفاوت؟ توضیح دهید. ب) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از این نمودار تشخیص داد؟

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازی انرژی هسته: برای جدا کردن نوترون‌های یک هسته، انرژی لازم است. انرژی لازم برای این منظور، **انرژی بستگی هسته‌ای** نامیده می‌شود. شکل ۴-۶ این موضوع را به‌طور طرّح‌وار نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن **کاستی جرم** گفته می‌شود، مطابق رابطه معروف اینشتین ($E=mc^2$)، در مری تبدیل نور (c^2) ضرب کنیم **انرژی بستگی هسته‌ای** بدست می‌آید. توجه کنید که هرچه اختلاف جرم هسته از مجموع جرم نوترون‌های تشکیل‌دهنده آن بسیار ناچیز است، چون در c^2 عدد بسیار بزرگی است ضرب می‌شود، این کاستی جرم اندک، معادل انرژی قابل ملاحظه‌ای است.

نوترون‌ها جدا شده اند (جرم منفی) + هسته (جرم مثبت) = انرژی + هسته‌ای پایداری بیشتر + نوترون‌های ناپایدار (جرم منفی) تشکیل‌دهنده آن تقسیم شود.

انرژی نوترون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کوانتیده‌اند و نوترون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین، همان‌طور که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از تراز پایه به ترازهای بالاتر بروند، نوترون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و در نتیجه هسته پراکنده شود. هسته پراکنده یا گسیل فون به تراز پایه می‌گردد. انرژی فون گسیل‌شده، با اختلاف انرژی بین تراز پراکنده و تراز پایه برابر است. هسته پراکنده را با گمانش ستاره روی نماد Δ بصورت ${}^A_Z X^{\Delta}$ مشخص می‌کنند. نکته قابل توجه آن است که اختلاف بین ترازهای انرژی نوترون‌ها در هسته از مرتبه 10^6 eV نامرتبه 10^7 eV است. در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبه 10^4 eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی پراکنده نمی‌شوند.

۱-۱ رابطه معروف اینشتین ($E=mc^2$) در نمایی (۱) نوشته شده است.
۱-۲ محاسبه انرژی بستگی هسته طرّح از رابطه درسی این کتاب است و از نرم‌افزار آن آسان‌تر است.

شکل ۳-۷ نمودار تغییرات N بر حسب Z برای هسته‌های پادار و نوترون‌ها. برای هسته‌های پادار و نوترون‌ها، هر نقطه آبی رنگ نشان‌دهنده یک هسته پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته‌های ناپایدار مختلف نشان می‌دهند.

پرسش ۱-۶

الف) همان‌طور که در نمودار ۱۳-۶ 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 به طوری 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

فصل ۶: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

تورم ($Z=90$) و اورانیوم ($Z=92$) که در طبیعت یافت می‌شوند سایر هسته‌های سنگین با عدد اتمی بزرگتر از ۸۳ پایدارند. این دو عنصر، تنها عنصرهایی‌اند که واپس‌آنها چنان کند است که از هنگام تشکیل منظومه شمسی در چندین میلیارد سال پیش، فقط مقدار کمی از آنها بر اثر واپس‌آ، به عنصرهای سبک‌تر تبدیل نشده‌اند.

پرسش ۶-۱

هر نقطه آبی رنگ در نمودار شکل ۳-۶ نشان‌دهنده یک هسته پایدار است. با توجه به این نمودار به پرسش‌های زیر پاسخ دهید. الف) نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون (N/Z) برای هسته‌های پادار مختلف ثابت است یا متفاوت؟ توضیح دهید. ب) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از این نمودار تشخیص داد؟

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازی انرژی هسته: برای جدا کردن نوترون‌های یک هسته، انرژی لازم است. انرژی لازم برای این منظور، **انرژی بستگی هسته‌ای** نامیده می‌شود. شکل ۴-۶ این موضوع را به‌طور طرّح‌وار نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن **کاستی جرم** گفته می‌شود، مطابق رابطه معروف اینشتین ($E=mc^2$)، در مری تبدیل نور (c^2) ضرب کنیم **انرژی بستگی هسته‌ای** بدست می‌آید. توجه کنید که هرچه اختلاف جرم هسته از مجموع جرم نوترون‌های تشکیل‌دهنده آن بسیار ناچیز است، چون در c^2 عدد بسیار بزرگی است ضرب می‌شود، این کاستی جرم اندک، معادل انرژی قابل ملاحظه‌ای است.

نوترون‌ها جدا شده اند (جرم منفی) + هسته (جرم مثبت) = انرژی + هسته‌ای پایداری بیشتر + نوترون‌های ناپایدار (جرم منفی) تشکیل‌دهنده آن تقسیم شود.

انرژی نوترون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کوانتیده‌اند و نوترون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین، همان‌طور که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از تراز پایه به ترازهای بالاتر بروند، نوترون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و در نتیجه هسته پراکنده شود. هسته پراکنده یا گسیل فون به تراز پایه می‌گردد. انرژی فون گسیل‌شده، با اختلاف انرژی بین تراز پراکنده و تراز پایه برابر است. هسته پراکنده را با گمانش ستاره روی نماد Δ بصورت ${}^A_Z X^{\Delta}$ مشخص می‌کنند. نکته قابل توجه آن است که اختلاف بین ترازهای انرژی نوترون‌ها در هسته از مرتبه 10^6 eV نامرتبه 10^7 eV است. در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبه 10^4 eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی پراکنده نمی‌شوند.

۱-۱ رابطه معروف اینشتین ($E=mc^2$) در نمایی (۱) نوشته شده است.
۱-۲ محاسبه انرژی بستگی هسته طرّح از رابطه درسی این کتاب است و از نرم‌افزار آن آسان‌تر است.

شکل ۳-۷ نمودار تغییرات N بر حسب Z برای هسته‌های پادار و نوترون‌ها. برای هسته‌های پادار و نوترون‌ها، هر نقطه آبی رنگ نشان‌دهنده یک هسته پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته‌های ناپایدار مختلف نشان می‌دهند.

upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Isotopes_and_half-life.svg

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته: ادامه 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 محاسبه 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.

فیزیک ۳۳

۶-۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

همان‌طور که در مقدمه فصل نیز اشاره کردیم کشف پرتوزایی طبیعی توسط هانری بکلر، آغازی برای بی‌ودن به وجود هسته اتم بود. وقتی یک هسته ناپایدار با پرتوزا به‌طور طبیعی (با اصطلاحاً خودبه‌خود) واپسی می‌کند، نوع معینی از ذرات یا فوتون‌های پر انرژی آزاد می‌شوند. این فرایند واپسی، پرتوزایی طبیعی نامیده می‌شود.

در پرتوزایی طبیعی سه نوع پرتو ایجاد می‌شود: پرتوهای آلفا (α)، پرتوهای بتا (β) و پرتوهای گاما (γ). پرتوهای α، کمترین نفوذ را دارند و با ورقه نازک سری با ضخامت تاچیز (mm) ۰/۱ (cm) متوقف می‌شوند. در حالی که پرتوهای β مسافت خیلی بیشتری را (mm) ۱۰ (cm) در سرب نفوذ می‌کنند. پرتوهای γ بیشترین نفوذ را دارند و می‌توانند از ورقه‌ای سری به ضخامت قابل ملاحظه‌ای (mm) ۱۰۰ (cm) بگذرند. در تمام فرایندهای واپسی پرتوزا مشاهده شده است که تعداد توکلون‌ها در طی فرایند واپسی هسته‌ای پایسته است؛ یعنی تعداد توکلون‌ها، پیش از فرایند با تعداد توکلون‌ها پس از فرایند مساوی است.

تاریخچه کشف ذرات آلفا
 ماری کوری، فیزیکدان و شیمی‌دان لهستانی-فرانسوی است که با مشارکت همسرش پل در پرتوزایی طبیعی، رادیم و پلوتونیم را کشف کرد. در سال ۱۹۰۳ میلادی، ماری و پل با همکاری هنری بکلر، در مقاله‌ای در مجله *Philosophical Magazine* اعلام کردند که ماده‌ای که آن‌ها رادیم نامیدند، خودبه‌خود تابش را در شکست می‌دهد. این تابش را پرتوزایی نامیدند. در سال ۱۹۰۲ میلادی، ماری و پل در مقاله‌ای در مجله *Comptes Rendus* اعلام کردند که ماده‌ای که آن‌ها پلوتونیم نامیدند، خودبه‌خود تابش را در شکست می‌دهد. این تابش را پرتوزایی نامیدند. در سال ۱۹۰۳ میلادی، ماری و پل در مقاله‌ای در مجله *Philosophical Magazine* اعلام کردند که ماده‌ای که آن‌ها رادیم نامیدند، خودبه‌خود تابش را در شکست می‌دهد. این تابش را پرتوزایی نامیدند.

پرتوزایی طبیعی

شکل روبرو، طرح آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان سه نوع پرتوزایی طبیعی را مشاهده کرد و تفاوت بار و جرم پرتوها را بکنگر بی برد. قطعه‌ای از ماده پرتوزا را در یک حفره باریکی در یک استوانه سربی قرار می‌دهند. استوانه را درون اتاقک می‌گذارند و هوای درون آن را تخلیه می‌کنند. سپس یک صفحه عکاسی مقابل حفره قرار می‌دهند و میدان مغناطیسی بکنفر درون اتاقک برقرار می‌کنند. خطوط فریزرنگ، مسیر حرکت پرتوها را نشان می‌دهد. نوع بار پرتوها را با هم مقایسه کنید.

واپسی α: در این نوع واپسی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هسته ${}^4_2\text{He}$ با گسیل ذره آلفا واپسی می‌کند. شواهد تجربی نشان می‌دهد که پرتوهای α، ذرات باردار مثبت از جنس هسته اتم هلیوم (${}^4_2\text{He}$) هستند و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده‌اند. واپسی α با رابطه زیر بیان می‌شود:

$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He} \quad (\text{واپسی } \alpha)$$

فصل ۴: اشعاع یا فیزیک هسته‌ای

در این رابطه X هسته مادر و Y هسته دختر نامیده می‌شود. شکل ۶-۵، مثالی از واپسی آلفا، برای اورانیوم ۲۳۸ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

شکل ۶-۵: در واپسی α یک هسته مادر ناپایدار، ذره α گسیل می‌کند و هسته مغزنی (هسته دختر) پرمیوه می‌آید.

ذره‌های آلفا، سنگین‌اند و بار مثبت دارند. ژرد این ذره‌ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۳ تا ۱ سانتی‌متر) و با عبور از لایه‌ای نازک از مواد جذب می‌شوند. اگر این ذره‌ها از راه نفوذ یا دستگاه گواش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند. بنابراین، باید مراقب بود که مواد آلفا هرگز وارد بدن نشوند.

تئوری و کاربرد واپسی آلفا و آتکسازهای دود

یکی از کاربردهای گسترده واپسی α در آتکسازهای دود است (شکل الف). شکل ب، مدار و بخش اصلی یک آتکساز دود را نشان می‌دهد. دو صفحه کوچک و موازی فلزی در فاصله حدود یک سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. مدار الکتریکی ماده پرتوزا را که ذرات α گسیل می‌کند در وسط یکی از صفحه‌ها می‌گذارند. ذرات α با موکل‌های هوای بین دو صفحه برخورد می‌کنند، موکل‌های هوا یونیده می‌شوند و یون‌های مثبت و منفی پرمیوه 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 پرمیوه 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 همدا رنده‌ای را به کار می‌آورد.

شکل الف: مدار و بخش اصلی یک آتکساز دود

شکل ب: مدار و بخش اصلی یک آتکساز دود

پرسش ۲-۶

در تصویر داده شده مربوط به این پرسش در کتاب رشته ریاضی (چاپ ۱۳۹۷) لازم است میزان \bar{B} به صورت پروتو 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

شکل ۶-۶: مثال از واکنش β^- برای $^{144}_{52}\text{Te}$ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

شکل ۶-۷: واکنش β^- را می‌توان به‌طور کلی‌تر به صورت زیر نوشت:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$$

شکل ۶-۸: واکنش β^- را می‌توان به‌طور کلی‌تر به صورت زیر نوشت:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$$

تمرین ۳-۶

ایزوتوپ ^{90}Th با گسیل پوزیترون، واپاشی می‌کند. معادله این واکنش را بزنید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

واپاشی γ : اغلب هسته‌ها پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته قرار می‌گیرند و با گسیل فوتون‌های پر انرژی (پروتو گاما) به حالت پایه می‌رسند. در این فرایند، γ تغییر نمی‌کند؛ بلکه هسته برانگیخته که با علامت * مشخص شده است، با گسیل پروتو گاما به حالت پایه می‌رسد. واپاشی γ با رابطه زیر بیان می‌شود.

$${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$$

شکل ۶-۹: مثال از واپاشی β^+ برای تویم ^{231}Th را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

شکل ۶-۱۰: واکنش β^+ را می‌توان به‌طور کلی‌تر به صورت زیر نوشت:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e$$

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 تومورهای خوش‌خیم 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 می‌شود بهره می‌گیرند. پروتوهای γ توسط چشمه کالت-۶۰ گسیل می‌شوند. همان‌طور که شکل آلفا نشان می‌دهد، بسیار کم انرژی است و به‌راحتی می‌تواند در پوست یا یک کاغذ آینه‌ای نقره‌ای بماند. پروتوهای β^- انرژی بیشتری دارند و به‌راحتی می‌توانند در یک ورق مس یا یک ورق آلومینیوم متوقف می‌شوند. از این رو بافت هدف، مقدار بسیار زیادی تابش را دریافت می‌کند و تخریب می‌شود، در حالی که بافت سالم مجاور آسیب نمی‌بیند. جراحی با پروتوهای گاما، روشی بدون درد و

فیزیک ۳۱۱

واپاشی β^- واپاشی بتا، نخستین مورد پرتوهای بود که در سال‌های پایانی قرن نوزدهم، توسط هانری بکرل مشاهده شد. این واپاشی، متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست و ذرات گسیل شده در این واپاشی را ذرات بتا می‌نامند. بررسی‌های بعدی نشان داد که این ذرات الکترون‌ها و به همین دلیل، این واپاشی را واپاشی β^- نامیدند. الکترون گسیل شده در این واپاشی، در هسته مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون‌های معاری اتم است؛ این الکترون وقتی به‌وجود می‌آید که نوترینی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود. فرایند واپاشی β^- را با رابطه زیر بیان می‌کنند:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$$

شکل ۶-۶: مثال از واپاشی β^- برای تویم ^{231}Th را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

شکل ۶-۷: واکنش β^- را می‌توان به‌طور کلی‌تر به صورت زیر نوشت:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$$

تمرین ۲-۶

لوتیم (^{176}Lu) عنصر پرتوهای است که با گسیل بتا منفی، واپاشی می‌کند. معادله این واکنش را بزنید 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 گسیل شده 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:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e$$

۱- در واپاشی β^- ، ذره‌ای بزرگ‌تر از نوترون را نوترون (مثلاً n) به نظر می‌آید که به $p + e^- + \bar{\nu}_e$ تبدیل می‌شود. در واپاشی β^+ ، ذره‌ای بزرگ‌تر از نوترون را نوترون (مثلاً n) به نظر می‌آید که به $p + e^+ + \nu_e$ تبدیل می‌شود. در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

تمرین ۲-۶

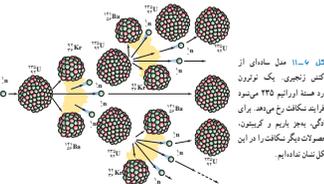
${}^{176}_{71}\text{Lu} \rightarrow {}^{176}_{72}\text{Hf} + e^- + \bar{\nu}_e$

لوتیم ${}^{176}\text{Lu}$ ، دارای یک ایزوتوپ پایدار ${}^{175}\text{Lu}$ با درصد فراوانی ۹۷/۴۱ درصد است. همچنین دارای سه ایزوتوپ ناپایدار که در این میان ${}^{176}\text{Lu}$ ، با درصد فراوانی ۲/۵۹۹ درصد، دارای نیمه عمر 3.78×10^{10} سال است.

فصل ۱۱ / آشنایی با فیزیک هسته‌ای



فرزاد آسگاری (۱۳۸۰-۱۳۹۰ ه. ش.)
فیزیکدان آلمانی یکی از دستیاران ارشد در پروژه شکافت اورانیوم در سال ۱۹۴۵ بود. وی نخستین بار موفق شد از شکافت با استفاده از نوترونهای کند بیان کند. در دهه ۱۹۵۰ میلادی، در فرانسه، یکی از جنگ جهانی دوم، مدیر بخش بیوسفیس اکتیو بلاتو بود.



شکل ۱۱-۴ مدل ساده‌ای از واکنش زنجیری یک نوترون وارد هسته اورانیوم ۲۳۵ می‌شود و فایزن شکافت رخ می‌دهد. برای هر واکنش یک نوترون آزاد می‌ماند.

در واکنش‌های شکافت هسته‌ای، جرم محصولات شکافت، کمتر از جرم هسته مرتب است. این اختلاف جرم بنا به رابطه $E = mc^2$ ، سبب آزاد شدن انرژی گرمایی زیادی می‌شود. انرژی آزاد می‌شود که توسط محصولات شکافت حمل می‌شود عمدتاً به شکل انرژی جنبشی است. در هر واکنش شکافت حدود 200 MeV انرژی آزاد می‌شود. این انرژی، 10^8 بار انرژی آزاد شده پادزای هر مولکول در یک واکنش معمولی، نظیر سوختن بنزین یا نفت سنگ است. حتی در انفجار تری‌نیترتولونی (TNT)، انرژی آزاد شده به ازای هر مولکول، در حدود 10^{-12} است. شکل ۱۱-۵، تصویری از زوری در مجتمع هسته‌ای اورانیوم سانده (واقع در جزایر شهر ری در نزدیکی تهران) است. مکانی است این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیری به طور طبیعی در این معدن دیگر معدن‌های اورانیوم رخ نمی‌دهد؟ پاسخ این است که در سنگ معدن اورانیوم، دو ایزوتوپ ^{235}U و ^{238}U وجود دارد. به طوری که فراوانی ایزوتوپ ^{235}U حدود 0.7% درصد است. به عبارت دیگر از هر 10^4 اتم اورانیوم موجود در سنگ معدن اورانیوم، تنها یکی از آنها ایزوتوپ ^{235}U و بقیه ایزوتوپ ^{238}U است (شکل ۱۱-۶). اگرچه ^{235}U فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیوم است، احتمال اینکه نوترون را گیر بیندازد و شکافت شود، بسیار کم است و در نتیجه واکنش زنجیری را ناممکن می‌سازد.



شکل ۱۱-۵ معدن اورانیوم سانده یا پشین‌ترین تولید کننده اورانوم ایران در جزایر مرکب از دو دهه واقع است. بنا به جرم معدن اورانیوم از هر 10^4 اتم اورانیوم، تنها یکی ایزوتوپ ^{235}U است.

فیزیک هسته‌ای

غنی‌سازی اورانیوم: همان‌طور که اشاره کردیم، واکنش زنجیری در سنگ معدن اورانیوم رخ نمی‌دهد. برای استفاده از اورانیوم به عنوان سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای یا استفاده در انفجارهای هسته‌ای، باید فراوانی ایزوتوپ ^{235}U را در یک نمونه اورانیوم، افزایش دهیم. به فرایند افزایش درصد با غلظت ایزوتوپ ^{235}U در یک نمونه، غنی‌سازی گفته می‌شود. بیشتر راکتورهای تجاری تولید می‌شود، مانند راکتور نیروگاه هسته‌ای پوسهر، از اورانیوم استفاده می‌کنند که در آنها ایزوتوپ ^{235}U تا 3% درصد غنی‌سازی شده است. همچنین در بیشتر راکتورهای پژوهشی، مانند راکتور پژوهشی دانشگاه تهران، از سوختی استفاده می‌شود که ایزوتوپ ^{235}U تا 20% درصد غنی‌سازی شده است.

شودهای غنی‌سازی اورانیوم

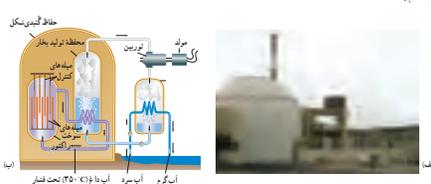
جداسازی ایزوتوپ کمپاب ^{235}U از ایزوتوپ فراوان ^{238}U بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان اند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی برای جداسازی آنها استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ بر اساس اختلاف جرم آنها صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های انجام این کار، استفاده از فرایند بخش است. در این روش، اورانیوم در ترکیب با فلورین به صورت گاز هگزافلوراید اورانیوم (UF_6) درمی‌آید؛ در این گاز، نمدی متوسط ایزوتوپ ^{235}U کمی بیشتر از ایزوتوپ سنگین‌تر است. همچنین دلیل ایزوتوپ ^{235}U از غشاهای نازکی که در این روش جداسازی به کار می‌رود، واکنش‌تری می‌گذرد. به‌دلیل بخش‌ها از طی هزاران مرحله، سرانجام منجر به تولید اورانیوم با غنای مناسب می‌شود. غنی‌سازی اورانیوم با استفاده از روش سانتریفوژ گاز، نیز رایج است. در این روش، گاز هگزافلوراید اورانیوم در یک استوانه چرخان فوق‌سرع (معمولاً 5000 دور در دقیقه) به حرکت درمی‌آید. مولکول‌های گاز که حاوی ^{235}U هستند، سنگین‌ترند و به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های سبک‌تر حاوی ^{238}U از مرکز دستگاه استخراج می‌شوند.



امیر کوسر (۱۳۱۰-۱۳۸۰ ه. ش.)
فیزیکدان ایرانی-آلمانی که در بخش حوزهای فیزیک هسته‌ای، هم به لحاظ نظری و هم در حوزهای مهندسی آزمایشگاهی و تجربی، سهم بسزایی داشته است. در سال ۱۳۴۰ تحصیلاتش را در رشته فیزیک در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۴۲ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران ادامه داد. در سال ۱۳۴۴ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۴۶ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۴۸ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۵۰ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۵۲ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۵۴ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۵۶ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۵۸ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۶۰ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۶۲ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۶۴ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۶۶ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۶۸ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۷۰ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۷۲ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۷۴ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۷۶ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۷۸ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند. در سال ۱۳۸۰ تحصیلاتش را در رشته فیزیک هسته‌ای در دانشگاه تهران به پایان رساند.

فصل ۱۱ / آشنایی با فیزیک هسته‌ای

راکتورهای هسته‌ای انرژی را به صورت گرمایی یا الکتریسیته تولید می‌کنند. در این حالت، راکتور یا توان خروجی ثابت کار می‌کند. وقتی راکتور زیر بحرانی باشد به‌طور میانگین، نوترون‌های آزاد شده از هر شکافت، کمتر از یک شکافت بعدی را ایجاد می‌دهند. در راکتور زیر بحرانی، واکنش زنجیری خودنگه‌دار نیست و سرانجام خاموش می‌شود. وقتی به‌طور میانگین، نوترون‌های آزاد شده بیشتر از یک شکافت بعدی را ایجاد می‌دهند، راکتور فرا بحرانی است. در حالت فرا بحرانی، توان خروجی راکتور افزایش می‌یابد و اگر کنترل نشود، می‌تواند به ذوب شدن بخشی یا تمام قلب راکتور منجر شود که با بخش مواد پرتوزای خطرناک به محیط‌زیست همراه می‌باشد. واضح است که برای نگه‌داشتن راکتور در حالت بحرانی، سازوکارهای کنترل آن لازم است. این عمل با تعدادی میله‌های کنترل (مواد جذب‌کننده نوترون که ترکیبی از عناصری مانند بوریم، آیدیم، کادمیوم و نقره هستند) صورت می‌گیرد که می‌توانند به داخل یا خارج قلب راکتور حرکت داده شوند.



شکل ۱۱-۶ اکتیو نوترون ۱۰۰۰۰ مگراون شکافت هسته‌ای پوسهر. راکتور آب تحت فشار (PWR) این نیروگاه، در زیر قسمت کتیونیک قرار دارد. بنا به جرم ابرای از یک راکتور PWR، قسمتی از شکافت هسته‌ای شکافت می‌شود.

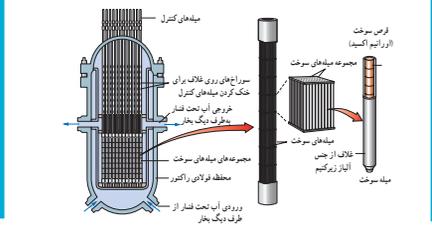
سوخت هسته‌ای (معمولاً 3% درصد ایزوتوپ ^{235}U) به‌صورت میله‌های با قطر حدود 1 cm است و هزاران عدد از آن میله‌ها در قلب راکتور قرار دارد. با وارد کردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش شکافت، یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب‌کننده نوترون، مانند کادمیوم یا بور، ساخته می‌شوند. در نوعی از راکتورها، که به راکتورهای آب تحت فشار (PWR)، معروفند، آبی که سوخت هسته‌ای را احاطه کرده است، تحت فشار زیاد (حدود 150 اتمسفر) قرار دارد تا بدون آنکه بجوشد به دماهای بالا برسد. این آب داغ، به سامانه بسته دیگری که محضی آب یا فشار کمتر است، سبب می‌شود تا این آب را گرم کند. گرمای انتقال یافته به سامانه دوم، سبب تولید بخار می‌شود که نوبین و مولد الکتریسیته را به کار می‌آورد.

کنترل واکنش زنجیری در راکتور شکافت

شکل صفحه‌بند طرحی با جزئیات بیشتر از قلب یک راکتور را نشان می‌دهد. وقتی نوترون در انرژی متوسط سوخت را ترک می‌کند، وارد آب تحت فشار پیرامون می‌شود. نمدی این نوترون توسط کدساز (مثلاً آب معمولی)، در کمتر از یک میلی‌ثانیه ناپید گواهی می‌یابد و نوترون گندیده می‌تواند با ورود مجدد به عنصر سوخت، سبب شکافت دیگری شود. برای آنکه توان خروجی راکتور ثابت بماند، باید تنها یکی از نوترون‌های آزاد شده در هر شکافت، سبب شکافت دیگری شود. وقتی به‌طور میانگین هر شکافت به شکافت دیگری منجر شود، گفته می‌شود که راکتور در حالت تعادلی یا اصطلاحاً در حالت بحرانی است.

فیزیک هسته‌ای

توجه کنید که اصطلاح حالت بحرانی در اینجا، به معنی حالت خطرناک نیست). در این حالت، راکتور یا توان خروجی ثابت کار می‌کند. وقتی راکتور زیر بحرانی باشد به‌طور میانگین، نوترون‌های آزاد شده از هر شکافت، کمتر از یک شکافت بعدی را ایجاد می‌دهند. در راکتور زیر بحرانی، واکنش زنجیری خودنگه‌دار نیست و سرانجام خاموش می‌شود. وقتی به‌طور میانگین، نوترون‌های آزاد شده بیشتر از یک شکافت بعدی را ایجاد می‌دهند، راکتور فرا بحرانی است. در حالت فرا بحرانی، توان خروجی راکتور افزایش می‌یابد و اگر کنترل نشود، می‌تواند به ذوب شدن بخشی یا تمام قلب راکتور منجر شود که با بخش مواد پرتوزای خطرناک به محیط‌زیست همراه می‌باشد. واضح است که برای نگه‌داشتن راکتور در حالت بحرانی، سازوکارهای کنترل آن لازم است. این عمل با تعدادی میله‌های کنترل (مواد جذب‌کننده نوترون که ترکیبی از عناصری مانند بوریم، آیدیم، کادمیوم و نقره هستند) صورت می‌گیرد که می‌توانند به داخل یا خارج قلب راکتور حرکت داده شوند.



۴-۶ گامخت (همجوشی) هسته‌ای

یک نوع دیگر واکنش هسته‌ای که منشأ تولید انرژی در ستارگان و از جمله خورشید است، گامخت یا همجوشی هسته‌ای نام دارد. در فرایند گامخت هسته‌ای، دو هسته سبک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هسته سنگین‌تری به‌وجود می‌آورد. برای مثال، واکنش گامخت زیر را در نظر بگیرید:

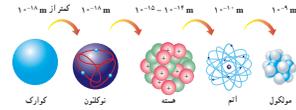
$$D + T \rightarrow He + n$$

در این واکنش یا همجوشی هسته‌ای دو ایزوتوپ هیدروژن یعنی دوتریم و تریتم، هسته‌های سبک و یک نوترون پرتوزایی تولید می‌شود (شکل ۴-۶). در واکنش گامخت، مجموع جرم محصولات فرایند، کمتر از مجموع جرم هسته‌های اولیه است. در اینجا نیز این اختلاف جرم با توجه به رابطه $E = mc^2$ ، سبب آزاد شدن مقدار زیادی انرژی می‌شود.

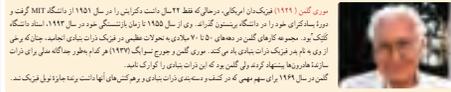


شکل ۴-۶ دوتریم و تریتم در هر گامخت می‌شود تا هسته‌های سنگین‌تر شود. در این واکنش، مقدار زیادی انرژی (۱۷.۶ MeV) آزاد می‌شود که می‌تواند به گرمای هسته‌ای تبدیل شود. این انرژی به‌کار می‌رود تا سوخت هسته‌ای را گرم کند و به حالت بحرانی تبدیل شود.

۱۴- «اگه نشان می‌دهد، میون‌ها ذراتی بنیادی و دارای طول عمری از مرتبه میکروثانیه هستند»
 طبقه‌بندی ذرات: تمامی ذرات زیر اتمی را در سه خانواده **جامل‌های نیرو**، **لیتون‌ها** و **هادرون‌ها** می‌توان طبقه‌بندی کرد.
 خانواده **جامل‌های نیرو** از ذراتی تشکیل شده‌اند که قشطنی اساسی در برهم‌کنش‌ها بازی می‌کنند. برای مثال، فوتون که یکی از ذرات عضو این خانواده است عامل برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی است.
 خانواده **لیتون‌ها** شامل ذراتی هستند که تمامی آنها بنیادی‌اند. الکترون، پروتون، نوترون‌ها و میون‌ها از جمله ذرات عضو خانواده لیتون‌ها هستند.
 خانواده **هادرون‌ها**، شامل ذراتی غیر بنیادی هستند که از ذرات ریزتری به نام **کوارک‌ها** ساخته شده‌اند. پروتون، نوترون و میون‌ها از جمله ذرات خانواده **هادرون‌ها** به‌شمار می‌روند.
کوارک‌ها: همان‌طور که اشاره کردیم ذرات خانواده **هادرون‌ها** مانند پروتون و نوترون بنیادی نیستند. برای توضیح این موضوع، در سال ۱۹۶۴ دو فیزیکدان آمریکایی به نام‌های موری گلمن و جورج شواینگ به‌طور مستقل، مدلی را پیشنهاد کردند که مطابق آن، **هادرون‌ها** از ترکیب ذرات بنیادی به نام **کوارک‌ها** تشکیل شده‌اند. در این مدل، سه نوع کوارک و سه پادکوارک مشاهده آنها پیشنهاد شده است. به این ترتیب، می‌توان گفت ذرات بنیادی یا همان **کوارک‌ها** و **لیتون‌ها** هستند و همه عالم از آنها ساخته شده است. شکل زیر طرح ساده از چگونگی تشکیل ماده از واحدهای اصلی را نشان می‌دهد.



کوارک‌ها، نوترون‌ها را می‌سازند. نوترون‌ها (که عضو خانواده لیتون‌ها هستند) هسته را می‌سازند. اتم‌ها از هسته و الکترون (عضو خانواده لیتون‌ها) ساخته می‌شوند. اتم‌ها، مولکول‌ها را می‌سازند و علم ماده از آنها ساخته می‌شود.



موری گلمن (۱۹۲۹) فیزیکدان آمریکایی، در سال ۱۹۶۴ میلادی پیشنهاد کرد که ذرات بنیادی را در سال ۱۹۶۴ در دانشگاه MIT گرفت و دروازه‌ساز کرای خود را در دانشگاه پرینستون گذراند. وی از سال ۱۹۵۵ تا زمان بازنشستگی خود در سال ۱۹۹۳، استاد دانشگاه کنتیکت بود. مجموعه کارهای گلمن در دهه‌های ۵۰ تا ۶۰ میلادی، تحولات عمیقی در فیزیک ذرات بنیادی ایجاد کرد. چنان که برخی از وی به نام پدر فیزیک ذرات بنیادی نام می‌کنند. موری گلمن و جورج شواینگ (۱۹۳۷) هر کدام به‌طور جداگانه مدلی برای ذرات ساخته‌اند. هر دو مدل پیشنهاد کردند که ذرات بنیادی را کوارک نامند.
 گلمن در سال ۱۹۹۱، جای نوبل فیزیک را برنده شد و در گفتگو و مصاحبه‌های بعدی بنیادی برهم‌کنش‌های آنها دانست و عده زیادی از وی فیزیک دان گلمن نامیدند.

۱۵- در یک رانش برای فوله میون، بارها و بارها انرژی پروتون (زیرگستر از ۱۵۰-۱۵۰ MeV) هدف ذراتی از جنس کربن و خود میونک و یک نوترون و یک π^+ فوله می‌شود. پس از π^+ π^+ به π^0 تبدیل می‌شود. π^0 در دوره‌ای در سال ۱۹۶۳ کشف شد و به سه سورت دسته‌بندی شد: طینی و خود وجود دارد که به ترتیب با π^+ ، π^0 و π^- نشان داده می‌شود. جرم هر سه میون با یکدیگر برابر است. پروتکل π^+ و π^- پادذرات یکدیگر و دارای طول عمری از مرتبه 10^{-8} ثانیه هستند.



فصل ۳۳-۷ طرحی از راکتور آزمایشی گرما هسته‌ای بین‌المللی (ITER)، ساخت این راکتور با مشارکت چین، هند، ایران، ژاپن، اتحادیه اروپا، روسیه و کره جنوبی در سال ۲۰۰۷ به فرانسه شروع شد است و پیش‌بینی می‌شود برای آن در سال ۲۰۲۱ به آماده‌برد. قرار است این راکتور از سال ۲۰۲۵ تا ۵۰ سال عمری، ۵۰۰ مگوات انرژی را تولید کند.

از آنجا که در واکنش‌های گمماخت، مقدار بسیار زیادی انرژی آزاد می‌شود، ساخت راکتورهای گمماخت مورد توجه زیادی است (شکل ۳۳-۶). اگرچه تاکنون نوع تجاری آن ساخته نشده است. مشکلات در ساخت راکتور گمماخت به این علت پیش می‌آید که دو هسته کرم جرم به قدر کافی به هم نزدیک شوند تا نیروی گرانشی هسته‌ای بتواند آنها را کنار هم نگه دارد و واکنش گمماخت انجام شود. ولی، هر هسته، پار مثبت دارد و هسته دیگر را دفع می‌کند، برای آنکه هسته‌ها با وجود این نیروی رانشی بسیار قوی، بتوانند به هم گمماخت 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-تریتم، به دمای حدود ده‌ها میلیون درجه سلسیوس نیاز است. دمای از این مرتبه در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً خورشید، که در آن واکنش هسته‌های هیدروژن انرژی آزاد می‌شود، دمای درونی آن فراز از 2×10^7 میلیون درجه سلسیوس برآورد شده است. در نتیجه واکنش گمماخت هسته‌ای، در مرکز خورشید و ستارگان که دما و فشار بسیار بالاست صورت می‌گیرد.

آشکاشی مختصر با ذرات بنیادی

تا سال ۱۹۳۲ سه ذره سازنده اتم‌ها شامل الکترون، پروتون، و نوترون کشف شده بودند و به‌عنوان سه ذره بنیادی تصور می‌شدند؛ ولی سوه تجزیه بدست آمده پس از آن نشان داد که تنها پروتون 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، پروتون، نوترون‌ها و میون‌ها بنیادی‌اند، یا مانند پروتون، نوترون و میون‌ها غیر بنیادی‌اند و از ذرات بنیادی‌ای به نام کوارک‌ها ساخته شده‌اند. در دنباله‌بنددها بیشتر ذرات زیر اتمی را با برخورد پروتون‌ها یا نوترون‌های پر انرژی با یک هسته هدف به‌وجود می‌آورند. در ادامه به معرفی چند ذره بنیادی پرداخته و به طبقه‌بندی ذرات زیر اتمی نیز اشاره می‌شود.

پروتون‌نگاری: در سال ۱۹۳۲ ذراتی با همان جرم الکترون ولی با بار مخالف ($+e$) توسط کورل آندرسون، فیزیکدان آمریکایی، کشف شد و جایزه نوبل فیزیک ۱۹۳۶ را برای وی به همراه دانست. این الکترون مثبت، پروتون نامیده شد که پادذره الکترون است؛ پروتون پادبار است و خود بخود واپسینه نمی‌شود.

نوترون‌ها: در واپسی β با این ذره آشنا شدید که در سال ۱۹۳۰ میلادی توسط ولنگانگ باولی معرفی شد و به‌طور تجربی در سال ۱۹۵۶ مورد تأیید قرار گرفت. نوترون‌ها (شامل سه ذره و سه پادذره) ذرات بنیادی، بدون بار و دارای جرم بسیار اندکی هستند. همچنین آشکارسازی آنها بسیار دشوار است. زیرا با دما و بوم‌کنش بسیار ضعیفی دارند. برای مثال، در تابه از مرتبه هزار میلیارد نوترون از بدن ما می‌گذرد و اثر شناخته شده‌ای بر ما ندارد!

میون‌ها: در سال ۱۹۳۷ دو فیزیکدان آمریکایی، ذرات باردار جدیدی را کشف کردند که جرم آنها کمی بیش از 200 بار جرم الکترون و اندازه بار آنها برابر الکترون بود. این دو ذره را که جرمی یکسان، ولی بار مخالف دارند می‌نامند و با نمادهای

μ^+ و μ^- پروتون (positron)، صورت گزیده شده الکترون مثبت (positively electron) است.
 International Thermometer Experimental Research

پرسش‌ها و تمرین‌های پیشنهادی فصل ۶

۱ فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیوم ^{238}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؟

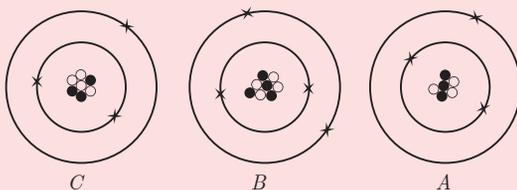
ت) از موج الکترومغناطیسی تشکیل شده است؟

ث) باعث شدیدترین یونش می‌شود؟

ج) در هوا کوچک‌ترین برد را دارد؟

چ) بار منفی دارد؟

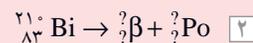
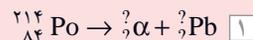
ح) در میدان الکتریکی منحرف نمی‌شود؟



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) آلفا

۲) بتا

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:

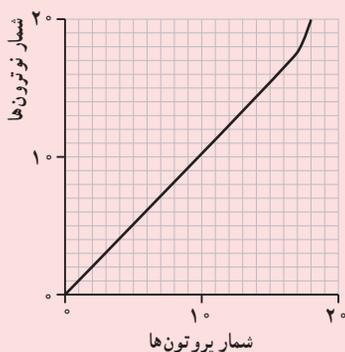
الف) شمار پروتون‌های هستهٔ آن چند است؟

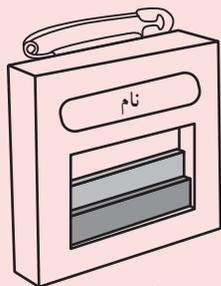
ب) روی نمودار با علامت \times جای فسفر ۳۲ را مشخص کنید.

پ) از روی نمودار چگونه تشخیص می‌دهید که فسفر ۳۲ پرتوزا است؟

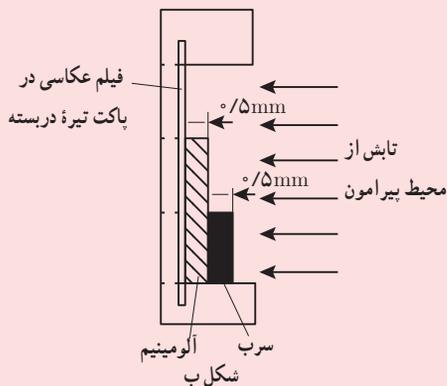
ت) با محاسبهٔ نسبت $\frac{N}{Z}$ نشان دهید که فسفر ۳۲ با واپاشی β^- به یک ایزوتوپ

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:

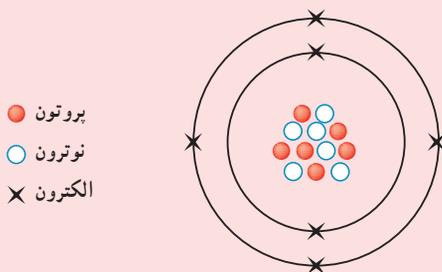
الف) چرا نباید دزسنج را در جیب گذاشت؟

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 و کربن 14 وجود دارد؟

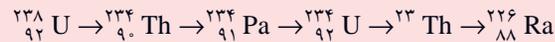
پ) کربن 14 با گسیل ذره بتا واپاشی می‌کند.

۱- بتا از کدام بخش اتم گسیل می‌شود؟

۲- کدام گزینه درباره ذره بتا درست است؟

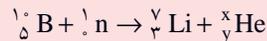
الف) پروتون سریع ب) نوترون سریع پ) الکترون سریع

۱۲) بخش نخست از زنجیره 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 بخش 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 هلیم تجزیه می‌شود. این فرایند چه نام دارد؟ توضیح دهید چرا هسته‌های هلیم و لیتیم به سرعت از هم دور می‌شوند.

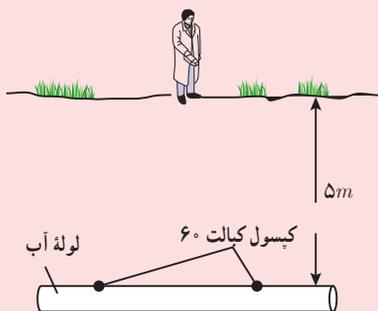
پ) توضیح دهید چگونه این فرایند موجب نابودی گلیوبلاستوم می‌شود.

ت) چرا این فرایند برای افراد سالم خطرناک است؟

۱۴) نیمه‌عمر سیزیم ${}^{131}_{53}\text{I}$ 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 ۶۰ چشمه‌هایی پرتوزا هستند که به لوله‌ها جسابانیده 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 شکافت هسته‌ای چیست؟

ب) در شکافت هسته‌ای چه نوع انرژی‌ای آزاد می‌شود؟

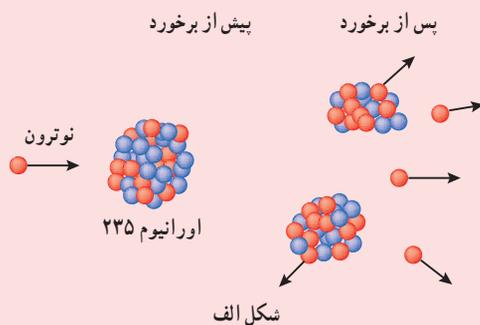
پ) دو مزیت و دو اشکال استفاده از نیروگاه هسته‌ای را بنویسید.

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 ها را می‌چرخانند و برق تولید می‌کنند.

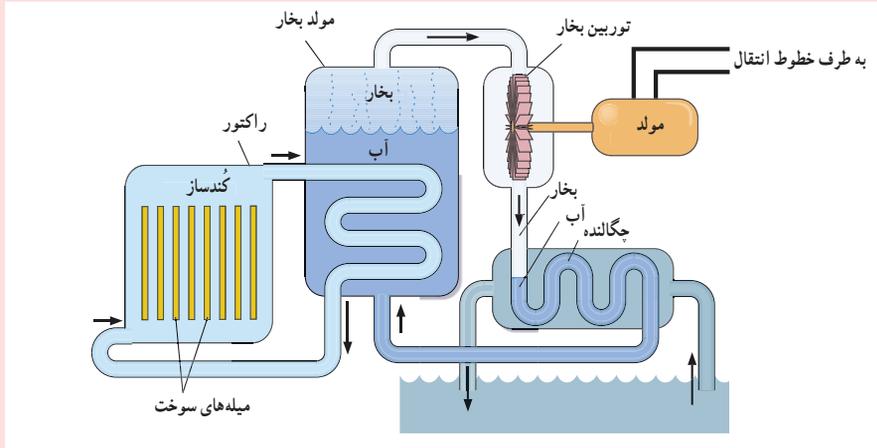
۱۷ در یک ایستگاه تولید برق هسته‌ای، از انرژی آزاد شده در فرایند شکافت هسته برای تولید برق استفاده می‌شود.

الف) شکافت اورانیوم ۲۳۵ در شکل الف نشان داده شده است.



۱ فرایندی را که در این نمودار نشان داده شده است شرح دهید.

۲ در شکافت اورانیوم ^{235}U انرژی از هسته آزاد می‌شود. این انرژی کجا می‌رود؟
 ب) در شکل ب اجزای اصلی ایستگاه برق هسته‌ای دیده می‌شود. توضیح دهید چگونه سوخت آن برای تولید انرژی به کار می‌رود.

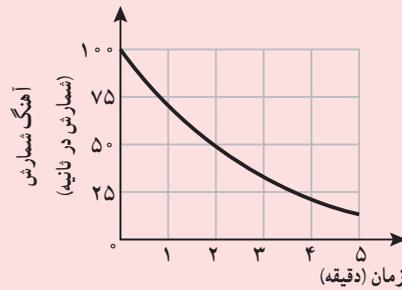


شکل ب

۱۸ الف) حدود نیروی رانش میان دو پروتون را که در فاصله 10^{-14} متری یکدیگر واقع‌اند برآورد کنید. ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$)
 ب) با توجه به نتیجه بخش الف، کار نیروی هسته‌ای را در جدا کردن دو ذره هسته‌ای تخمین بزنید.

۱۹ ایزوتوپ پرتوزای ^{232}Th در چهار واپاشی بی‌درپی دو ذره آلفا و دو ذره بتا گسیل می‌کند. اگر هسته دختر به صورت ^A_ZX باشد، اندازه‌های A و Z را مشخص کنید. آیا ^{232}Th و ^A_ZX ایزوتوپ‌اند؟ چرا؟

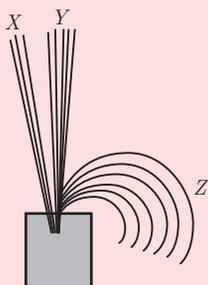
۲۰ نمودار واپاشی یک اتم به صورت شکل زیر است. نیمه عمر آن چقدر است؟



شکل ۴-۲۰

۲۱ واپاشی پرتوزای ایزوتوپ کوتاه‌عمر توریم با رابطه $^{225}\text{Th} \rightarrow ^A_Z\text{Ra} + \alpha$ مشخص می‌شود. نیمه عمر آن $8/0$ دقیقه است.
 الف) A و Z چه کمیتی را نشان می‌دهند؟
 ب) مقدار آنها چقدر است؟

۲۲ الف) تفاوت بار، جرم و سرعت پرتوهای آلفا، بتا و گاما را بنویسید.



ب) در نخستین سال‌های 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؟

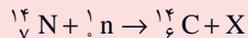
۲۴ توان تولیدی متوسط یک نیروگاه برق هسته‌ای در شبکه سراسری 150 MW است. اگر در این نیروگاه در هر ساعت $3/0$

کیلوگرم سوخت اورانیوم 235 مصرف شود:

الف) نیروگاه در هر ساعت چند ژول انرژی دریافت می‌کند؟

ب) اگر از هر کیلوگرم سوخت اورانیوم 10^{12} J به دست آید، بازده نیروگاه چند درصد است؟

۲۵ در لایه‌های بالایی جو زمین بر اثر برخورد نوترون با نیتروژن 14N ، 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 تولید شده در مدت یک سال بر اثر این واکنش $7/5$ کیلوگرم است. نشان دهید که شمار اتم‌های کربن 14 —

تولید شده در هر سال تقریباً $3/0 \times 10^{26}$ است.

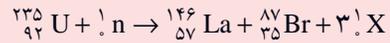
نیمه‌عمر کربن 14 — را $5/7 \times 10^3$ سال و عدد آووگادرو را $6/0 \times 10^{23}$ بگیرید.

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 کند با هسته $^{235}_{92}\text{U}$ را نشان می‌دهد.



الف) ۱) این فرایند چه نام دارد؟

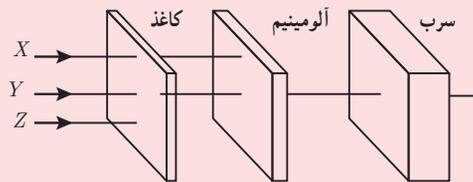
۲) X نمایش چه چیزی است؟

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.

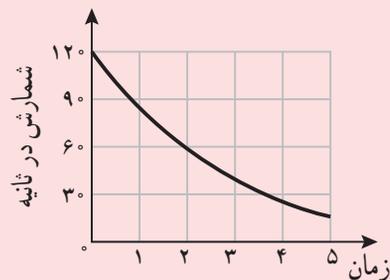


شکل ۴-۲۴

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 ${}^7_3\text{Li}$ 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) ${}^{208}_{85}\text{At}$ (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 به دست آمده (Y)

کدام است؟

(الف) ${}^5_2\text{Y}$ (ب) ${}^5_3\text{Y}$ (پ) ${}^4_2\text{Y}$ (ت) ${}^4_3\text{Y}$ (ث) ${}^3_2\text{Y}$

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) $\frac{1}{3}$ (ث) $\frac{1}{4}$

۴۰ هنگامی که هسته اتم ${}^7\text{Li}$ 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.

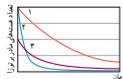
ت) در مقدار تابش‌های تولید شده در رآکتور هسته‌ای ندارند.

ث) در آهنگ تجزیه هسته ${}^{235}\text{U}$ ندارند.

برسش‌ها و سسته‌های فصل ۶

۱-۶ ساختار هسته

- ۱. مرتبه‌ی بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تک هم در یک توب تنیس به شعاع ۳۲cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبه‌ی بزرگی جرم این توب چقدر است؟ (مرتبه‌ی بزرگی شعاع و جرم پروتون را به ترتیب $10^{-16}m$ و $10^{-27}kg$ در نظر بگیرید.)
- ۲. برای $^{238}_{92}Pu$ مغلوب است:
 - الف) تعداد نوترون‌ها
 - ب) بار الکتریکی خالص هسته
 - ج) در هر یک از موارد زیر نماد 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 $^{238}_{92}Pu$ را با روش تشخیصی از ایزوتوپ $^{238}_{94}Pu$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{238}_{94}Pu$ بطور واضح پاسخ خود را توضیح دهید.

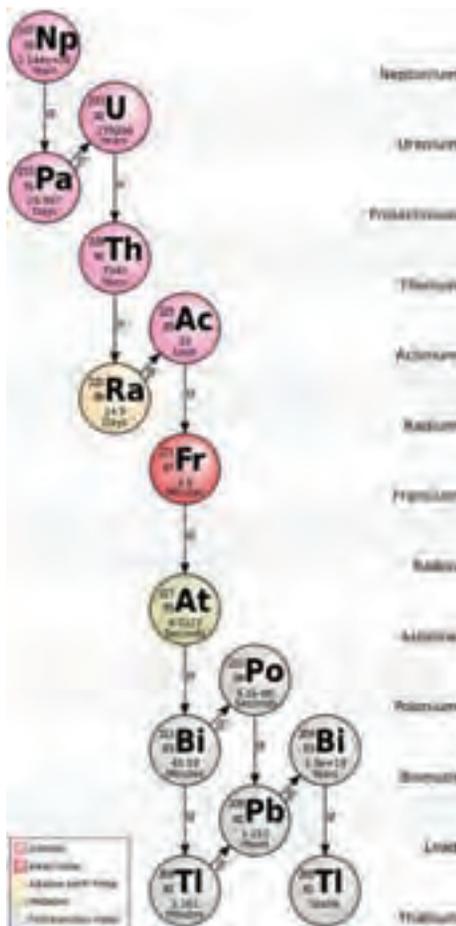
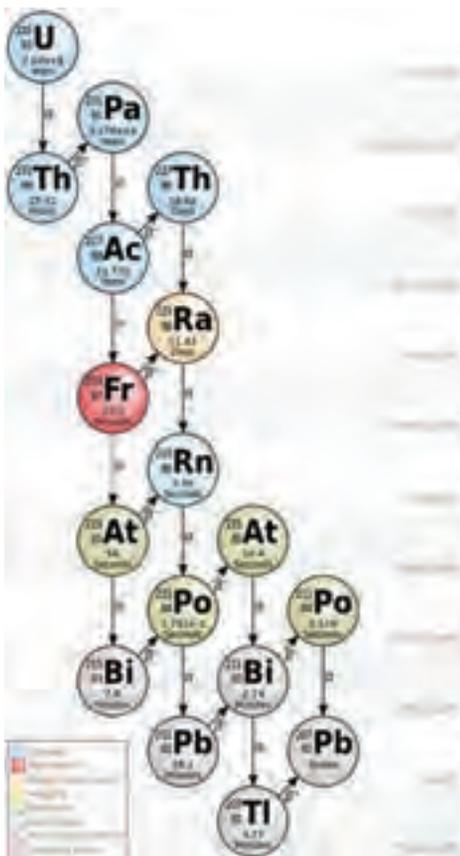


- ۴. هنگامی که نیترون جز زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) پیلران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ^{14}C با آنگ بانی در لایه‌های فوقانی جو تولد می‌شود. این کربن پرتوزا با کربن ^{12}C که بطور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به ازای هر ۱۰۰۰۰ میلیارد اتم پایدار کربن ^{12}C تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ^{14}C از این طریق وارد جو می‌شود. اینها کربن جوی از طریق حالت‌های بیولوژیکی از قبل فوسنترو تنفس، به‌جای کانون‌های مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به طوری که آن‌ها کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و بانی از ایزوتوپ پرتوزای کربن ^{14}C است.
- ۵. وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای ^{14}C به تله افتاد در موجود غیرزنده، یا به‌صورت $^{14}CO_2$ سالی رو به کاهش می‌گذارد. کربن ^{14}C موجود در یک نمونه زغال فسیل ۱۵۶ درصد عمیقاً پخت (مقدار عادی کربن ^{14}C موجود در زغال است که تازه تولید شده) را با ایزوتوپ ^{14}C موجود در یک نمونه زغال فسیل ۱۵۶ درصد عمیقاً پخت (مقدار عادی کربن ^{14}C موجود در زغال است که تازه تولید شده) مقایسه کنید.



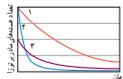
۷ یک راه برای دیدن سری‌های واپاشی پرتوزا، مراجعه به کتاب‌های مرجع هسته‌ای است ولی با مراجعه به اینترنت و با استفاده از کلیه واژه‌های (radioactive decay series) یا (decay chain) است. مراجعه به سایت زیر نیز برخی از سری‌های واپاشی پرتوزا را ارائه می‌دهد. حفظ کردن این سری و ارزشیابی از آن، جزو اهداف این فصل نیست.

www.en.wikipedia.org/wiki/decay-chain



برش‌ها و سسته‌های فصل ۶

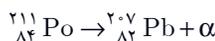
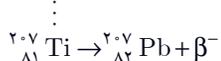
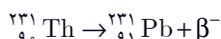
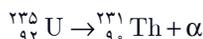
- ۱-۳۱. انتخاب هسته**
۱. مرتبهٔ بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تک هم در یک توب تنیس به شعاع ۳۲cm خالی داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبهٔ بزرگی جرم این توب چقدر است؟ (مرتبهٔ بزرگی شعاع و جرم نوترون را به ترتیب 10^{-16} kg و 10^{-27} kg در نظر بگیرید.)
 ۲. برای ^{238}Pu مطلوب است:
 - الف) تعداد نوترون‌ها (با تعداد نوترون‌ها)
 - ب) بار الکتریکی خالص هسته
 - ج) در هر یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد و در هستهٔ هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.
 ۳. آیا می‌توان ایزوتوپ ^{238}X را با روش تئیسایی از ایزوتوپ ^{238}X جدا کرد؟ از ایزوتوپ ^{238}X چگونه می‌توان آن را توضیح دهید.



۴. هنگامی که نیترون جز زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) پدیدار می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ^{14}C با آنگ تابش در لامپهای فوق‌فوق صوتی تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ^{12}C که به‌طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. ورسنا نشان داده است که به‌ازای هر ۱۰۰۰۰ میلیارد اتم پایدار کربن ^{12}C تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ^{14}C از این طریق وارد جو می‌شود. اینها کربن جوانی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبل فوسنتروفتی، به‌جای کاتوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به‌طوری که آنهایی که هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ناچیز از ایزوتوپ پرتوزای کربن ^{14}C است. وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال رو به کاهش می‌گردد. کربن ^{14}C موجود در یک نمونهٔ زغال فسیل ۱۵۶ درصد (معادل $\frac{1}{6}$) مقدار عادی کربن ^{14}C موجود در زغال است که تازه تولید شده است.
۵. هستهٔ دختر سسته‌شده از هر یک از واپاشی‌های زیر با همسوز ^{238}Pu مشخص کنید.
 - الف) ^{238}Pu واپاشی α انجام دهد.
 - ب) سیم ^{210}Bi واپاشی β^- انجام دهد.
 - ج) نیترون ^{235}N واپاشی β^- انجام دهد.
 - د) ^{238}Pu واپاشی β^- انجام دهد.

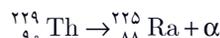
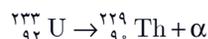
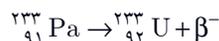
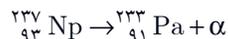
در شکل‌های بالا، سری‌های واپاشی پرتوزای ^{237}Np به ^{208}Ti که هستهٔ دختر پایدار است و همچنین ^{235}U به هستهٔ دختر پایدار ^{207}Pb نشان داده شده است.

برای مثال در ادامه تعدادی از فرایندهای مربوط به واپاشی α یا β^- اورانیم ^{235}U (به هستهٔ دختر پایدار سرب ^{207}Pb) آمده است.



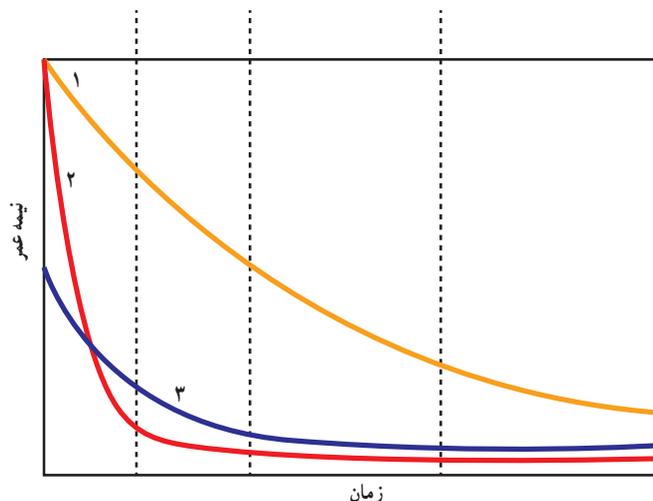
یا

همان‌طور که در تصویر مربوط پاسخ تمرین ۷ دیده می‌شود سری واپاشی پرتوزای نپتونیم ^{237}Np (که هستهٔ دختر ^{237}Np) آمده است.



همان‌طور که دیده می‌شود ^{237}Np پس از واپاشی‌های α ، β^- ، α به هستهٔ دختر رادیوم ^{225}Ra تبدیل می‌شود که هنوز پرتوزا است و پس از واپاشی‌های دیگر به هستهٔ دختر پایدار تالیم ^{205}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 نمونهٔ ۲ دارای کمترین نیمه عمر است.



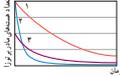
برش‌ها و هسته‌های فصل ۶

۱-۱ ساختار هسته

۱. مرتبه بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان گفت هم در یک نوبت تپش به شعاع ۳۲cm خای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبه بزرگی جرم این نوب چقدر است؟
 (مرتبه بزرگی شعاع و جرم نوترون را به ترتیب $10^{-10}m$ و $10^{-27}kg$ در نظر بگیرید.)

۲. برای $^{238}_{92}Pu$ مطلوب است:
 الف) تعداد نوکلئون‌ها
 ب) تعداد نوترون‌ها
 ج) بار الکتریکی خالص هسته
 د) در یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد و در هسته هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.

۳. الف) $^{238}_{92}X \rightarrow ^{234}_{90}Y + ^4_2He$ ب) $^{238}_{92}X \rightarrow ^{234}_{94}Pu + ^4_2He$
 ج) آیا می‌توان از نوترون $^{238}_{92}X$ را با روش نیسیایی از ایزوتوپ $^{238}_{92}X$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{238}_{92}X$ چگونه باید بخش خود را توضیح دهد.



۴. هنگامی که نوترون جزو زمین توسط پروتوهای کیهانی که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) پدیدار می‌شود، ایزوتوپ پروتوزی کربن ۱۲ با آنگ تابش در لایه‌های فوقانی جو تولد می‌شود. این کربن پروتوزی با کربن ۱۲ که بطور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمزد. ورسه‌ها نشان داده است که به ازای هر ۱۰۰۰۰ میلیارد ذره پدیدار کربن ۱۲، تقریباً یک اتم پروتوزی کربن ۱۴ از این طریق وارد جو می‌شود. این اتمهای کربن جوی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبل فوسنترو تنفس، بهنجو کاتوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بین جانداران منتقل می‌شوند. بطوری که اتمهای کربن موجود زنده شامل کسر کوچک و تابش از ایزوتوپ پروتوزی کربن ۱۴ است.
 وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پروتوزی به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه عمر ۵۷۳۰ سال رو به کاهش می‌گردد. موجود ۱۴ موجود در یک نمونه زغال فسیل ۱۵۶ درصد عمیقاً $\frac{1}{16}$ مقدار عادی کربن ۱۴ موجود در زغال است که تازه تولد

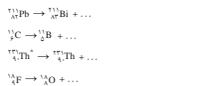
$$\frac{1}{64} = \left(\frac{1}{2}\right)^n = \left(\frac{1}{2}\right)^{2n} \Rightarrow n = 6$$

بنابراین پس از ۶ نیمه‌عمر، کربن ۱۴ موجود در نمونه زغال قدیمی به ۱/۵۶ درصد مقدار کربن ۱۴ موجود در زغالی که تازه تولید شده، رسیده است. چون هر نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال طول می‌کشد، در این صورت سن تقریبی این زغال برابر است با

$$6 \times 5730 \text{ years} = 34380 \text{ years}$$

۳-۱ پروتوایی طبیعی و نیمه عمر

۱. جاهای خالی در فرآیندهای واپاشی زیر نشان‌دهند یک یا چند ذره α یا β یا γ است. در هر واکنش، جایی خالی را کامل کنید.



۲. هسته دختر بدست‌آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر با همصورت $^{238}_{92}X$ مشخص کنید.
 الف) $^{238}_{92}Pu$ واپاشی α انجام دهد.
 ب) سیم $^{238}_{92}Na$ واپاشی β انجام دهد.
 ج) نیتروژن $^{238}_{92}N$ واپاشی β انجام دهد.
 د) $^{238}_{92}O$ واپاشی β انجام دهد.

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) اورانیم ۲۳۵، که حاوی ۹۲ پروتون و ۱۴۳ نوترون است، عنصری پروتوزا و با نیمه‌عمر بسیار زیاد حدود 7×10^8 میلیون سال است. به عبارت دیگر، این تعداد پروتون و نوترون که در هسته اتم اورانیم ۲۳۵ 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 اورانیم ۲۳۵، 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 ۲۰۰ MeV است. این انرژی عمدتاً مربوط به انرژی جنبشی پاره‌های شکافت و نوترون‌های ایجاد شده است. از آنجا که جرم محصولات شکافت، اندکی کمتر از جرم هسته مرکب اورانیم ۲۳۶ است، این اختلاف جرم بنا به رابطه معروف اینشتین $E=mc^2$ ، سبب آزاد

تجزیه

شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟
 ۱. معادله زیر بخشی از واکنش α است. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
 ۲. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + 2n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
 ۳. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + 3n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
 ۴. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + 4n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
 ۵. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + 5n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
 ۶. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + 6n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
 ۷. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + 7n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
 ۸. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + 8n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
 ۹. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + 9n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
 ۱۰. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟
 $^{238}_{92}Pu \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^4_2He + 10n$
 در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

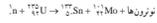
۳۲۹

گرما می‌شود. سن تقریبی این زغال فسیل چقدر است؟
 نیمه‌عمر بیسپت ۱۲۴ حدود ۴۰ دقیقه است. سن از گذشت
 چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه، در نمونه‌ای از این
 بیسپت، باقی می‌ماند؟
 در این واکنش عدد اتمی، عدد جرمی، عدد X را
 در واکنش تعیین کنید.



در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟



نوترون‌ها ${}^{101}_{42}\text{Mo}$ و ${}^{131}_{50}\text{Sn}$ به ${}^{232}_{90}\text{Th}$ تبدیل می‌شوند.

بازده نیروگاه هسته‌ای پونهر حدود ۳۵ درصد است. یعنی
 ۳۵ درصد انرژی حاصل از شکافت اورانیم ۲۳۵، به
 صورت گرما تلف و حدود ۳۵ درصد آن، به انرژی الکتریکی
 تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود ۲.۰
 انرژی آزاد می‌شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت
 پیدا می‌کند؟ فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان به‌کار
 ۱۰۰۰ مگاوات کار می‌کند.

۴-۶ ساخت هسته‌ای

انرژی آزاد شده در واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ با یک
 نوترون کند حدود ۲۰۰-۲۱۰ MeV و در واکنش شکافت دوتریم
 با ریتیم حدود ۱۷.۴ MeV است.

الف) تعداد نوترون‌های شرکت‌کننده، در هر واکنش شکافت
 چقدر است؟ انرژی آزاد شده به‌ازای هر نوترون را حساب کنید.
 ب) تعداد نوترون‌های شرکت‌کننده، در هر واکنش شکافت
 چقدر است؟ انرژی آزاد شده به‌ازای هر نوترون را حساب کنید.

ب) نتیجه‌های قسمت الف) و ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با
 توجه به آثار روزافزون بشر به انرژی و با توجه به اینکه مواد قابل
 شکافت مانند ${}^{235}\text{U}$ به مقدار بسیار کمی در طبیعت وجود دارد
 ولی دوتریم به‌طور فراوان در آب اقیانوس‌ها و دریاها موجود
 است و جدا کردن آن از هیدروژن معمولی آسان و کم‌هزینه است،
 اهمیت این مقایسه را در توضیح دهید.

الف) اهمیت عدد‌های ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.
 ب) اتم‌های ${}^{235}_{92}\text{U}$ با یکدیگر و خود به‌خود به قطعه‌های کوچک‌تر
 همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی
 انرژی واپسیده می‌شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد
 شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟
 ب) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون‌های با انرژی کم را جذب می‌کند تا
 نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه نوترون‌ها را در
 قلب راکتور می‌کنند.
 تا چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟
 تا واکنش زنجیری را توضیح دهید.
 ج) انرژی به‌صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود، چگونه
 گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟
 د) هنگامی که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده
 می‌شوند، آنها «پروتون‌هایی با نیمه‌عمر» طولانی
 هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.
 ه) الف) حدود ۷۰ درصد اورانیم موجود در سنگ معین
 طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر
 واکنش شکافت حدود ۲۰۰ انرژی آزاد می‌شود. فرض
 کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در یک کیلوگرم از این اورانیم
 بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی
 بر حسب مگاژول (MJ) و ژول (J) چقدر است؟
 با یا سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود ۳۰ MJ انرژی

۳-۳ شکافت هسته‌ای

۳-۴ معادله زیر بخشی از واکنش را نشان می‌دهد که در یک
 راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.



الف) اهمیت عدد‌های ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.

ب) اتم‌های ${}^{235}_{92}\text{U}$ با یکدیگر و خود به‌خود به قطعه‌های کوچک‌تر
 همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی
 انرژی واپسیده می‌شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد
 شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟
 ب) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون‌های با انرژی کم را جذب می‌کند تا
 نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه نوترون‌ها را در
 قلب راکتور می‌کنند.
 تا چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟
 تا واکنش زنجیری را توضیح دهید.
 ج) انرژی به‌صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود، چگونه
 گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟
 د) هنگامی که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده
 می‌شوند، آنها «پروتون‌هایی با نیمه‌عمر» طولانی
 هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.
 ه) الف) حدود ۷۰ درصد اورانیم موجود در سنگ معین
 طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر
 واکنش شکافت حدود ۲۰۰ انرژی آزاد می‌شود. فرض
 کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در یک کیلوگرم از این اورانیم
 بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی
 بر حسب مگاژول (MJ) و ژول (J) چقدر است؟
 با یا سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود ۳۰ MJ انرژی

۳-۵ واکنش شکافت هسته‌ای

۳-۶ واکنش شکافت هسته‌ای

۳-۷ واکنش شکافت هسته‌ای

۳-۸ واکنش شکافت هسته‌ای

شدن انرژی گرمایی زیادی عمدتاً به‌صورت انرژی جنبشی پاره‌های شکافت
 می‌شود.

پ) آب معمولی (H_2O)، آب سنگین (D_2O) و گرافیت (اتم‌های کربن) از
 جمله موادی هستند که سبب کاهش انرژی جنبشی نوترون‌ها در واکنش‌های
 شکافت هسته‌ای می‌شوند و اصطلاحاً نوترون‌های 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 به‌وجود می‌آید. پس از کند شدن نوترون سریع و جذب
 آنها توسط هسته‌های دیگر اورانیم ۲۳۵، این فرایند به‌طور زنجیری و در کسر
 کوچکی از زمان، ادامه پیدا می‌کند.

ج) گرمای حاصل از فرایند شکافت، توسط شاره‌ای که معمولاً آب است گرفته می‌شود و به خارج از راکتور انتقال داده می‌شود.
 جزئیات بیشتر در شکل ۶-۱۳ ب کتاب درسی نشان داده شده است.

چ) پروتوزا: یعنی هسته‌هایی که با گسیل ذرات α ، β یا γ ، واپسیده می‌شوند.
 ایزوتوپ: مجموعه‌ای از هسته‌های یک اتم که Z یکسان و تعداد نوترون متفاوت دارند.
 نیمه‌عمر: مدت زمانی که طول می‌کشد تا نیمی از هسته‌های یک نمونه پروتوزا، واپاشی کنند.
 الف) ابتدا جرم یک مول سنگ معدن طبیعی اورانیم را به‌دست می‌آوریم.

$$M(\text{U}) = \frac{1}{1000} (\%7 \times 235 + 99/3 \times 238) \approx 0.238 \text{ kg/mol}$$

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

$$n = \frac{V}{1000} \times 2.53 \times 10^{24} = 1.77 \times 10^{22}$$

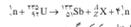
اگر تمامی این اتم‌های اورانیم ۲۳۵ بر اثر فرایند شکافت انرژی خود را آزاد کنند، انرژی آزاد شده برابر است با

$$E = 1.77 \times 10^{22} \times 200 \text{ MeV} = 3.54 \times 10^{24} \text{ MeV}$$

$$= (3.54 \times 10^{24} \text{ eV}) \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) \approx 5.66 \times 10^{11} \text{ J}$$

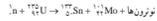
۳۳۱

گرمای آزاد می‌شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در فست‌الف، انرژی تولید شود؟
۱۶. یکی از واکنش‌های ممکن در شکافت ^{235}U ، داده شده است. در این واکنش عدد اتمی k ، عدد جرمی A ، و عنصر X را در n تعیین کنید.



در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

۱۷. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟



۱۸. بازده نیروگاه هسته‌ای پونهر حدود ۳۵ درصد است. یعنی ۶۵ درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیوم ^{235}U به صورت گرما تلف و حدود ۳۵ درصد آن، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود 2.0×10^8 انرژی آزاد می‌شود، چند کیلوگرم اورانیوم ^{235}U در سال شکافت پیدا می‌کند؟ فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان باعبار 1000 مگاوات کار می‌کند.

۴-۴ شکافت هسته‌ای

۱۷. انرژی آزاد شده در هر واکنش شکافت اورانیوم ^{235}U با یک نوترون کند حدود 2.0×10^8 MeV و در هر واکنش گداخت دوتریم با انرژی حدود 3.5×10^7 MeV است.

الف) تعداد واکنش‌های شکافت کننده، در هر واکنش شکافت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوترون را حساب کنید. با تعداد نوترون‌های شکافت کننده، در هر واکنش گداخت چقدر

است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوترون را حساب کنید. با نتیجه‌های قسمت الف) و ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با توجه به نتایج روزافزون بشر به انرژی، با توجه به اینکه مواد قابل شکافت مانند ^{235}U به مقدار بسیار کمی در طبیعت وجود دارد ولی دوتریم به طور فراوان در آب اقیانوس‌ها و دریاها موجود است و جدا کردن آن از هیدروژن معمولی آسان و کم‌هزینه است، اهمیت این مقایسه را توضیح دهید.

شده است. سن تقریبی این زغال فسیل چقدر است؟
۱۸. نیمه‌عمر بیسپت ^{212}Po حدود 3.0×10^{-8} دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه، در نمونه‌ای از این بیسپت، باقی می‌ماند؟

۴-۳ شکافت هسته‌ای

۱۶. معادله زیر بخشی از واکنش را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.



الف) اهمیت عدددهای ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.

ب) اتم‌های $^{141}_{54}\text{Xe}$ پایدارند و خودبه‌خود به قطعه‌های کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی انرژی واپسینده می‌شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟

ب) اورانیوم ^{235}U عمدتاً نوترون‌های با انرژی کم را جذب می‌کند تا نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه تعداد نوترون‌ها را در قلب راکتور کم می‌کنند.

تا چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟
 تا واکنش زنجیری را توضیح دهید.

ج) انرژی به صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود، چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟
 ج) هنگامی که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می‌شوند، آنها «پروتون‌هایی با نیمه‌عمر» طولانی هستند. واکنش‌های داخلی گویم را توضیح دهید.

۱۸. الف) حدود ۷ درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیوم از ایزوتوپ ^{235}U تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود 2.0×10^8 MeV انرژی آزاد می‌شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ ^{235}U موجود در یک کیلوگرم از این اورانیوم بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی بر حسب مگاالکترون‌ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟

ب) با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود 3.0×10^7 MeV انرژی آزاد می‌شود. سن تقریبی این زغال فسیل چقدر است؟
۱۸. نیمه‌عمر بیسپت ^{212}Po حدود 3.0×10^{-8} دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه، در نمونه‌ای از این بیسپت، باقی می‌ماند؟

۱۷ الف) فرایند شکافت، با جذب یک نوترون کند توسط هسته اورانیوم ^{235}U آغاز می‌شود. بنابراین تعداد نوکلئون‌هایی که در این فرایند مشارکت دارند برابر 236 عدد است. به این ترتیب انرژی آزاد شده در فرایند شکافت به ازای هر نوکلئون برابر است با

$$E = \frac{2.0 \times 10^8 \text{ MeV}}{236} \approx 0.85 \text{ MeV}$$

ب) واکنش گداخت یا در هم گداخته شدن دوتریم (شامل ۲ نوکلئون) و تریتیم (شامل ۳ نوکلئون) آغاز می‌شود. به این ترتیب در هر واکنش گداخت ۵ نوکلئون مشارکت دارند. انرژی آزاد شده در فرایند گداخت به ازای هر نوکلئون برابر است با

$$E = \frac{17.6 \text{ MeV}}{5} = 3.52 \text{ MeV}$$

پ) همان‌طور که نتایج قسمت‌های الف و ب نشان می‌دهد انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون در فرایند گداخت، بیش از ۴ برابر انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون در فرایند شکافت است. این موضوع و فراوانی دوتریم در آب اقیانوس‌ها و دریاها، نشان‌دهنده اهمیت سرمایه‌گذاری روی راکتورهای گداخت است.

