

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللَّهُمَّ صَلِّ عَلَى مُحَمَّدٍ وَآلِ مُحَمَّدٍ وَعَجِّلْ فَرَجَهُمْ

فیزیک (۳)

رشته ریاضی و فیزیک

پایه دوازدهم

دوره دوم متوسطه





وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب:
پدیدآورنده:
مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف:
شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف:
مدیریت آماده‌سازی هنری:
شناسه افزوده آماده‌سازی:
نشانی سازمان:
ناشر:
چاپخانه:
سال انتشار و نوبت چاپ:

فیزیک (۳) - پایه دوازدهم دوره دوم متوسطه - ۱۱۲۲۰۹
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری
احمد احمدی، روح‌الله خلیلی‌بروجنی، محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، سیدهدایت سجادی، مجید عتیقی، سیروان مردوخی و علیرضا نیکنام (اعضای شورای برنامه‌ریزی و گروه تألیف) - سعیدفرمانی (ویراستار ادبی)
اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
احمدرضا امینی (مدیر امور فنی و چاپ) - جواد صفری (مدیر هنری) - محمد مهدی ذبیحی فرد (طراح جلد) - راحله زادفتح‌اله (صفحه‌آرا) - فاطمه رئیس‌یان فیروزآباد (رسام) - سیده فاطمه طباطبایی، بهناز بهبود، سیف‌الله بیک‌محمد دلیوند، زهرا رشیدی مقدم، سپیده ملک‌ایزدی و حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)
تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)
تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
وبگاه: www.chap.sch.ir و www.irtextbook.ir
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
شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
چاپ هشتم ۱۴۰۴

شابک ۹۷۸-۹۶۴-۰۵-۳۱۲۱-۱
ISBN: 978-964-05-3121-1



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 «قُدَسِ سِرَّة»

فهرست

۱ حرکت بر خط راست

- ۱-۱ شناخت حرکت ۲
- ۲-۱ حرکت با سرعت ثابت ۱۳
- ۳-۱ حرکت با شتاب ثابت ۱۵
- ۴-۱ سقوط آزاد ۲۱
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ۲۵



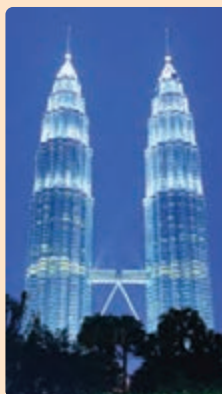
۲ دینامیک و حرکت دایره‌ای

- ۱-۲ قوانین حرکت نیوتون ۳۰
- ۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص ۳۵
- ۳-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون ۴۶
- ۴-۲ حرکت دایره‌ای یکنواخت ۴۸
- ۵-۲ نیروی گرانشی ۵۳
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ۵۷



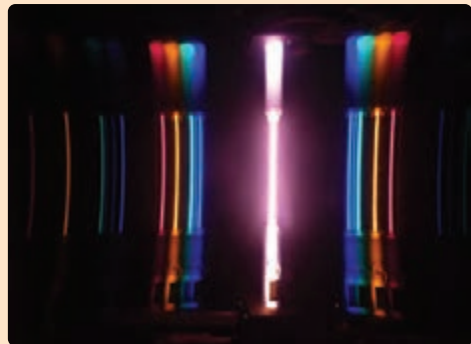
۳ نوسان و موج

- ۱-۳ نوسان دوره‌ای ۶۲
- ۲-۳ حرکت هماهنگ ساده ۶۳
- ۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده ۶۶
- ۴-۳ تشدید ۶۸
- ۵-۳ موج و انواع آن ۶۹
- ۶-۳ مشخصه‌های موج ۷۰
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ۸۵

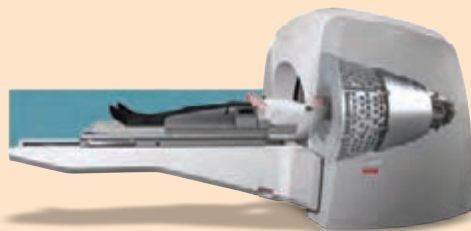




- ۱-۴ بازتاب موج ۹۰
- ۲-۴ شکست موج ۹۴
- ۳-۴ پراش موج ۱۰۱
- ۴-۴ تداخل امواج ۱۰۳
- پرسش ها و مسئله های فصل ۴ ۱۱۱



- ۱-۵ اثر فوتوالکتریک و فوتون ۱۱۶
- ۲-۵ طیف خطی ۱۲۱
- ۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور ۱۲۵
- ۴-۵ لیزر ۱۳۲
- پرسش ها و مسئله های فصل ۵ ۱۳۴



- ۱-۶ ساختار هسته ۱۳۸
- ۲-۶ پرتوهای طبیعی و نیمه عمر ۱۴۲
- ۳-۶ شکافت هسته ای ۱۴۸
- ۴-۶ گداخت (همجوشی) هسته ای ۱۵۲
- پرسش ها و مسئله های فصل ۶ ۱۵۵

- جدول دوره ای عناصر ۱۵۷
- جدول مثلثاتی ۱۵۸
- واژه نامه فارسی - انگلیسی ۱۵۹
- منابع ۱۶۴

سخنی با دانش‌آموزان عزیز و همکاران محترم

کتاب فیزیک ۳ که برای پایه دوازدهم دوره نظری و برای رشته ریاضی فیزیک تألیف شده است، در راستای تغییر برنامه درسی آموزش علوم تجربی در سال‌های پیشین تدوین و ساماندهی شده است. برای برقراری ارتباط مؤثرتر با برنامه درسی این کتاب و تحقق اهداف آن لازم است که با اهداف، شایستگی‌ها، رویکردها، راهبردهای یاددهی - یادگیری، شیوه‌های ارزشیابی و... آشنا شویم که در ادامه به معرفی مختصر آنها پرداخته می‌شود.

۱- شایستگی‌ها و اهداف

اهداف کلی در تدوین این کتاب به گونه‌ای است که دانش‌آموز بتواند:

الف) نظام‌مندی طبیعت را براساس درک و تحلیل مفاهیم، الگوها و روابط بین پدیده‌های طبیعی کشف و گزارش کند.

ب) با درک ماهیت، روش و فرایند علم تجربی، امکان به‌کارگیری علم و روش علمی را در حل مسائل زندگی (حال و آینده) کسب نماید و در عین حال محدودیت‌های علوم تجربی را در حل این مسائل دریابد.

پ) با استفاده از منابع علمی معتبر و بهره‌گیری از علوم تجربی، ایده‌هایی مبتنی بر تجارب شخصی خود، برای مشارکت در فعالیت‌های علمی ارائه دهد و در این فعالیت‌ها با حفظ ارزش‌ها و اخلاق علمی مشارکت نماید.

۲- رویکرد

سعی شده است رویکرد سازماندهی محتوا در این کتاب، ارائه متن به روش فعال و درگیر کردن دانش‌آموز باشد. در این سازماندهی، اصالت با موقعیت‌ها و زمینه‌های کاربردی در زندگی است که می‌توان در آنها موضوع‌های مرتبط با فیزیک را آموزش داد و یادگیری را معنادارتر و جذاب‌تر کرد. به همین دلیل از تعداد زیادی پرسش، فعالیت، تمرین، آزمایش و... استفاده شده است. همچنین سعی شده است محتوای کتاب تصویرمحور باشد و بر همین اساس تصویرها، نمودارها و شکل‌های گوناگونی برای تسهیل آموزش انتخاب شده است.

به‌طور کلی این کتاب مبتنی بر این آموزه بنیادین است که فیزیک علمی تجربی است و هیچ نظریه‌ای در آن نمی‌تواند به‌عنوان حقیقت پایانی و غایی مطرح شود. به عبارت دیگر، همواره این امکان وجود دارد که مشاهده‌ها و آزمایش‌های جدید ایجاب کنند که یک نظریه فیزیکی بازنگری و حتی رد شود.

۳- مفاهیم اساسی

این کتاب شامل سه بخش اساسی مکانیک، موج و فیزیک جدید است. بخش مکانیک، از مباحث حرکت، دینامیک و حرکت دایره‌ای یکنواخت تشکیل شده است که دانش‌آموزان با مقدمات برخی از این مباحث در علوم نهم و فیزیک ۱ آشنا شده‌اند. ضمناً بخشی از مطالب ریاضی مرتبط در سال‌های قبل آموزش داده شده است و بخشی نیز در سال جاری آموزش داده خواهد شد. در این فصل‌ها از تجزیه نیروها و مشتق استفاده نمی‌شود و نیروها در یک راستا و عمود برهم مورد بررسی قرار می‌گیرند و در فصل حرکت نیز فقط حرکت در مسیر مستقیم بررسی می‌شود.

بخش موج، از مباحث حرکت نوسانی، امواج مکانیکی (شامل امواج فشر، صوتی و...) و امواج الکترومغناطیسی و نیز برهم‌کنش‌های امواج شامل (بازتاب، شکست، پراش و تداخل) تشکیل شده است. بخشی از دانش مورد نیاز اولیه این قسمت در علوم دوره اول متوسطه و بخشی نیز در شیمی سال دهم مطرح شده است.

بخش فیزیک جدید، از مباحث فیزیک اتمی (شامل اثر فوتوالکتریک، طیف خطی، مدل‌های اتمی و لیزر) و فیزیک هسته‌ای (شامل ساختار هسته، پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر، شکافت و همجوشی هسته‌ای) تشکیل شده است. بخشی از دانش مورد نیاز اولیه این قسمت در علوم دوره اول متوسطه و بخشی نیز در درس شیمی سال دهم، مطرح شده است.

۴- مهارت‌های اساسی

مهارت اساسی موردنظر در این کتاب، چگونگی به‌کارگیری روش علمی است. روش علمی خود دارای خرده مفاهیم و اجزایی چون مشاهده، اندازه‌گیری، طراحی و انجام آزمایش، مدل‌سازی، کنترل متغیر، محاسبه، مشاهده و مقایسه، تحلیل و نتیجه‌گیری، گزارش، قضاوت و حل مسئله است.

۵- راهبردهای یاددهی - یادگیری

راهبرد اصلی در آموزش محتوای کتاب‌های فیزیک دوره متوسطه راهبرد اکتشافی و تعاملی است. برای این منظور از اجزای گوناگون، مانند «تصاویر و پرسش‌های درگیرکننده در ابتدای هر بخش، فعالیت‌های ذهنی و عملی، پرسش، تمرین، آزمایش، تاریخ علم، خوب است بدانید، تصویرهای آموزشی و...» در طراحی، تدوین و تألیف محتوا استفاده شده است. انتظار می‌رود موضوع‌های درسی در کلاس به گونه‌ای طرح شوند که اکثر دانش‌آموزان در فرایند آموزش و یادگیری درگیر شوند و مهارت‌های علمی و عملی آنها رشد یابد. انتظار می‌رود که دانش‌آموزان مهارت علمی در برخورد با یک پدیده و پیمودن مراحل را که به شناسایی آن پدیده می‌انجامد، فراگیرند.

۶- شیوه ارزشیابی

به فرایند جمع‌آوری اطلاعات از آموخته‌های دانش‌آموزان (دانش‌ها، مهارت‌ها، نگرش‌ها و به‌طور کلی شایستگی‌ها)

و قضاوت در مورد آنها ارزشیابی می‌گویند. ارزشیابی دو گونه است؛ مستمر و پایانی. از آنجا که آزمون پایانی این کتاب به صورت امتحان نهایی برگزار می‌شود، ضروری است رویکرد جدید کتاب درسی در ارزشیابی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

پیشنهاد می‌شود متناسب با نوع ارزشیابی (مستمر و پایانی)، انتظارات عملکردی مورد توجه قرار گیرند. جدول زیر بخشی از این انتظارات را نشان می‌دهد.

ردیف	انتظارهای عملکردی
۱	طراحی آزمایش، تحلیل و تفسیر آزمایش
۲	اجرای آزمایش، ثبت داده‌ها، نتیجه‌گیری و ارائه گزارش
۳	تجزیه و تحلیل داده‌ها، رسم نمودار، نتیجه‌گیری از داده‌ها، پیش‌بینی و ...
۴	انجام تحقیق و جمع‌آوری اطلاعات (طراحی، اجرا، ثبت داده‌ها، تجزیه و تحلیل، ارائه گزارش)
۵	مشارکت و تعامل در فرایند آموزش (انجام فعالیت‌های عملی و آزمایشگاهی، مشارکت در بحث‌های گروهی، کنجکاوی علمی و طرح پرسش‌های مفهومی)
۶	پاسخ به پرسش‌های مفهومی در حیطه‌های مختلف، دانش، کاربرد، استدلال و قضاوت
۷	توانایی حل مسئله و پرسش‌های محاسباتی
۸	حل مسائل در شرایط جدید (کاربرد و استدلال)

تجربه نشان می‌دهد که درک ایده‌های نهفته در بیشتر مفاهیم فیزیک و کاربرد آنها در زندگی برای اغلب دانش‌آموزان امکان‌پذیر است. آنچه در این راه در میزان موفقیت دانش‌آموزان مؤثر است، شیوه‌های آموزش ما در کلاس درس است. این شیوه‌ها می‌توانند درک و فهم مفاهیم فیزیک را برای همه دانش‌آموزان، بدون توجه به توانایی علمی آنان، باز کند. بنابراین، می‌توان گفت شیوه آموزش کارآمد، کلید موفقیت هر برنامه درسی است. انتظار می‌رود همکاران ارجمند با تکیه بر تجربه خود و به کارگیری شیوه‌های آموزشی مؤثر، بستر مناسبی برای یادگیری و مشارکت دانش‌آموزان در فرایند آموزش و همچنین شوق انگیزتر شدن فضای کلاس فراهم کنند.

از همکاران و دبیران گرامی انتظار می‌رود که برنامه و محتوای کتاب درسی را ملاک آموزش و ارزشیابی قرار داده و به موارد زیر بیش از تدریس توجه فرمایند.

- محتوای حذف شده نسبت به کتاب‌های قبلی کدام است؟
- رویکرد جدید کتاب در خصوص سازماندهی محتوا و ترتیب و توالی مطالب چیست؟
- تا چه میزان می‌توان محتوای کتاب را بسط و گسترش داد؟

● محتوای اصلی و فرعی در هر فصل کدام موضوع‌ها هستند؟

● هر فصل را چگونه می‌توان به واحدهای یادگیری معینی تقسیم کرد و مطابق با زمان‌بندی پیش برد؟

در برنامه جدید آموزش فیزیک به هر مبحث و موضوع تنها یک بار پرداخته شده است و حدّ نهایی آن براساس آنچه در کتاب درسی آمده، تعیین می‌شود. بدیهی است پرداختن به مطالب اضافی و خارج از برنامه درسی فرصت تعمیق مفاهیم اصلی کتاب را از بین می‌برد.

۷- در ابتدای هر فصل، نشانه رمزینه سریع پاسخ  آمده است که با تلفن همراه یا تبلت می‌توان به محتوای آموزشی آن دسترسی پیدا کرد.

گروه فیزیک لازم می‌داند از دبیرخانه راهبردی فیزیک، اتحادیه انجمن‌های علمی آموزشی معلمان فیزیک ایران و همکارانی که به‌طور مستقل در اعتبارسنجی این کتاب با ما همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی کند. همچنین این گروه از دریافت پیشنهادهای اصلاحی دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان عزیز همچون همیشه استقبال می‌کند.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری





فصل



حرکت بر خط راست



در چه صورت بردار شتاب دو خودرو که بر خط راست و در جهت مخالف یکدیگر حرکت می کنند می تواند یکسان باشد؟

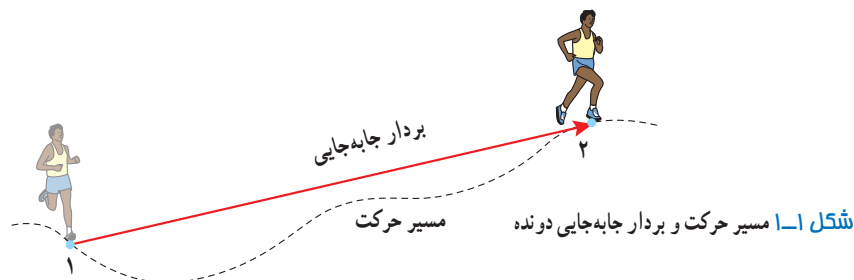
بخش ها

- ۱-۱ شناخت حرکت
- ۲-۱ حرکت با سرعت ثابت
- ۳-۱ حرکت با شتاب ثابت
- ۴-۱ سقوط آزاد

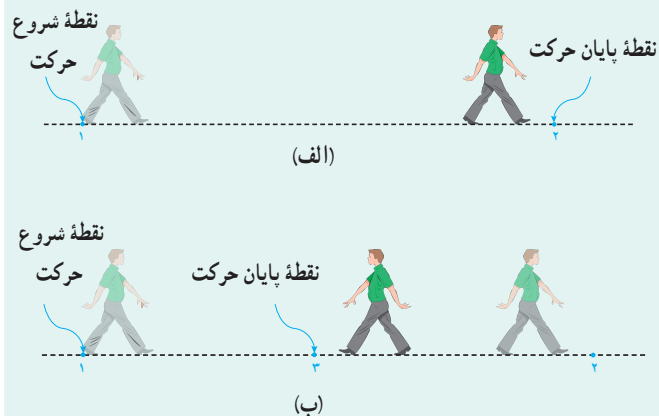
بررسی حرکت اجسام، همواره مورد توجه بشر بوده است. در فیزیک نیز، شناخت و توصیف حرکت اجسام، یکی از مباحث مهمی است که در هر کتاب درسی به آن پرداخته می‌شود و زمینه‌ساز درک بهتر مباحث دیگر فیزیک است. آشنایی با حرکت اجسام، که به آن حرکت‌شناسی یا سینماتیک نیز گفته می‌شود، در بیشتر شاخه‌های مهندسی اهمیت زیادی دارد. برای مثال، مدت زمان رسیدن تندی خودرو از صفر به 100 km/h یکی از معیارهای مقایسه خودروهای امروزی در صنعت خودروسازی است. همچنین مهندسانی که به طراحی و ساخت باند پرواز فرودگاه‌ها می‌پردازند توجه دارند که هواپیماهای مختلف برای آنکه به تندی لازم برای برخاستن برسند، چه مسافتی را باید روی باند پرواز طی کنند. زمین‌شناسان نیز برای تعیین محل‌هایی که امکان وقوع زمین‌لرزه در آنها بیشتر است باید حرکت صفحه‌های زمین را بررسی کنند و از مفاهیم مرتبط با بحث حرکت‌شناسی استفاده کنند. افزون بر اینها پژوهشگران پزشکی برای یافتن رگ مسدود باید به نحوه حرکت خون در رگ‌ها توجه کنند. در این فصل ابتدا نگاهی دقیق‌تر خواهیم انداخت به آنچه در علوم نهم در خصوص حرکت آموختید. پس از آن، به ساده‌ترین نوع حرکت، یعنی حرکت جسم بر خط راست، خواهیم پرداخت. در پایان فصل نیز، حرکت سقوط آزاد اجسام را به عنوان مثالی از حرکت با شتاب ثابت، بررسی می‌کنیم.

۱-۱ شناخت حرکت

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



پرسش ۱-۱



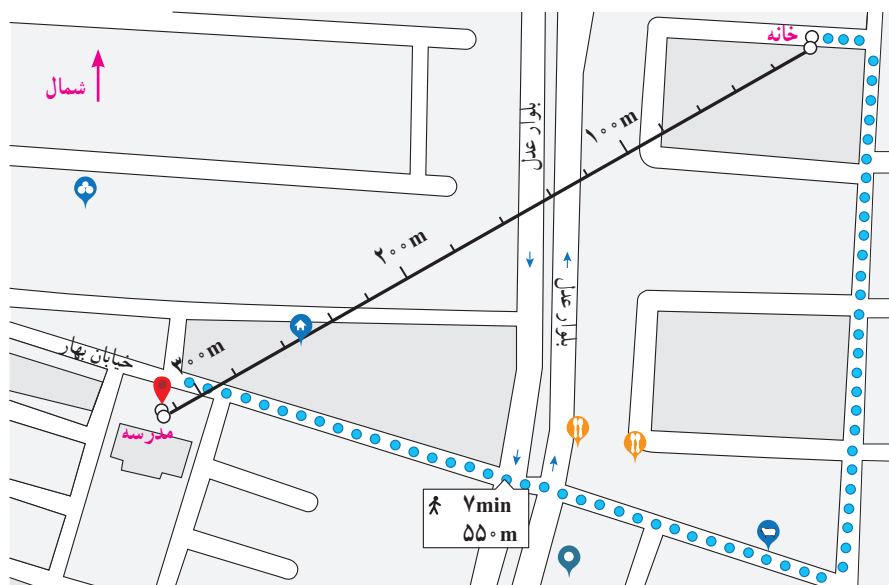
۱- شکل الف شخصی را در حال پیاده‌روی در راستای خط راست و بدون تغییر جهت، از مکان ۱ به مکان ۲ نشان می‌دهد. مسیر حرکت و برداری جابه‌جایی شخص را روی شکل مشخص و اندازه برداری جابه‌جایی را با مسافت مقایسه کنید.

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

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



● **فعاليات ١-١**



همانند شکل روبه‌رو و به کمک یک نرم‌افزار نقشه‌یاب، مکان خانه و مدرسه‌تان را مشخص کنید. سپس مسافت و اندازهٔ بردار جابه‌جایی خانه تا مدرسه را تعیین کنید.

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

$$s_{av} = \frac{l}{\Delta t} \quad \text{(تندی متوسط)} \quad (1-1)$$

$$\vec{v}_{av} = \frac{\vec{d}}{\Delta t} \quad (\text{سرعت متوسط}) \quad (2-1)$$

همان‌طور که دیده می‌شود تندی متوسط، کمیتی زرده‌ای و سرعت متوسط، کمیتی برداری^۲ 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- شاخص پابین av در نمادهای تندی متوسط و سرعت متوسط از واژه انگلیسی average به معنای متوسط گرفته شده است.

۲- آموزش مسائلی که دانش آموزان را در محاسبه \vec{d} و \vec{v}_{av} ، درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحه xy یا فضای xyz می کند خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

مثال ۱-۱

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

پاسخ: با توجه به داده‌های روی نقشه، اگر دانش‌آموز در مدت زمان $\Delta t = 7/00 \text{ min} = 420 \text{ s}$ مسافت $l = 550 \text{ m}$ را از خانه تا مدرسه پیموده باشد، با توجه به رابطه ۱-۱ تندی متوسط وی برابر $s_{av} = 550 \text{ m} / 420 \text{ s} = 1/31 \text{ m/s}$ می‌شود و مفهوم فیزیکی آن این است که دانش‌آموز به‌طور متوسط در هر ثانیه $1/31 \text{ m}$ از طول مسیر را پیموده است. همچنین با توجه به نقشه، اندازه بردار جابه‌جایی دانش‌آموز 325 m و جهت آن به طرف جنوب غربی است. در نتیجه با توجه به رابطه ۱-۲ اندازه سرعت متوسط وی برابر $v_{av} = 325 \text{ m} / 420 \text{ s} = 0/774 \text{ m/s}$ و جهت آن به طرف جنوب غربی است.

پرسش ۲-۱

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

شکل ۲-۱ 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 دونده را در این دو لحظه، می‌توان به صورت زیر نوشت:

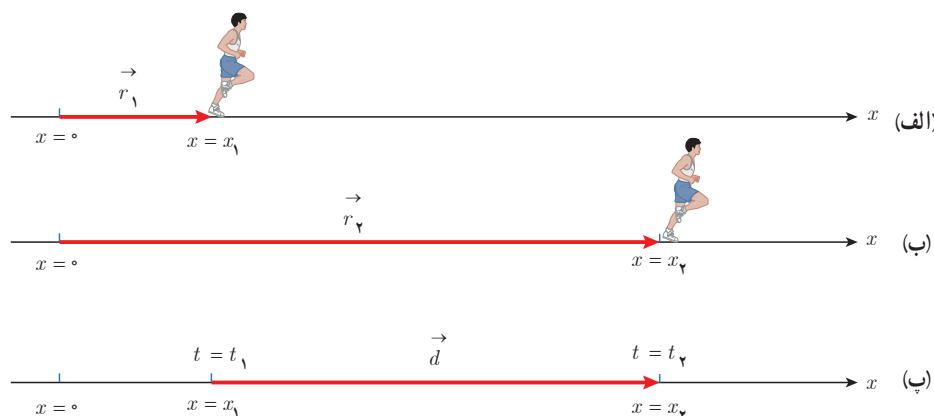
$$\vec{r}_1 = x_1 \vec{i} \quad \text{و} \quad \vec{r}_2 = x_2 \vec{i}$$

در این صورت و با توجه به شکل ۲-۱ ب، بردار جابه‌جایی دونده برابر است با:

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

به این ترتیب رابطه ۲-۱ مربوط به سرعت متوسط دونده را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

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

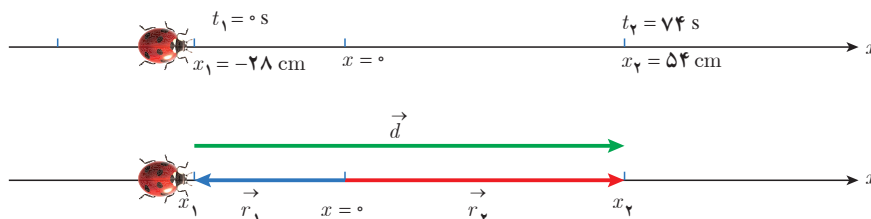


شکل ۲-۱ (الف) و (ب) بردار مکان دونده در دو لحظه متفاوت و (پ) بردار جابه‌جایی آن

مثال ۲-۱

کفش دوزکی که در جهت محور x در حرکت است، در لحظه‌های $t_1 = 0\text{ s}$ و $t_2 = 74\text{ s}$ به ترتیب از مکان‌های $x_1 = -28\text{ cm}$ و $x_2 = 54\text{ cm}$ می‌گذرد.

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



پاسخ: الف)

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

$$\vec{v}_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \vec{i} = \frac{54\text{ cm} - (-28\text{ cm})}{74\text{ s} - 0\text{ s}} \vec{i} = (1.1\text{ cm/s}) \vec{i}$$

تمرین ۱-۱

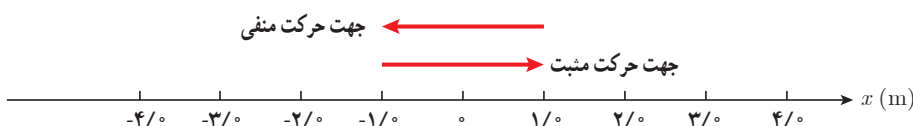
جدول زیر را کامل کنید. فرض کنید هر چهار متحرک در مدت زمان $4/0\text{ s}$ فاصله بین مکان آغازین و مکان پایانی را طی می‌کنند.

مکان آغازین	مکان پایانی	برداری جابه‌جایی	سرعت متوسط
متحرک A	$(-2/0\text{ m}) \vec{i}$	$(6/4\text{ m}) \vec{i}$	
متحرک B	$(-2/5\text{ m}) \vec{i}$	$(-5/6\text{ m}) \vec{i}$	
متحرک C	$(2/0\text{ m}) \vec{i}$	$(8/6\text{ m}) \vec{i}$	
متحرک D	$(-1/4\text{ m}) \vec{i}$		$(2/4\text{ m/s}) \vec{i}$

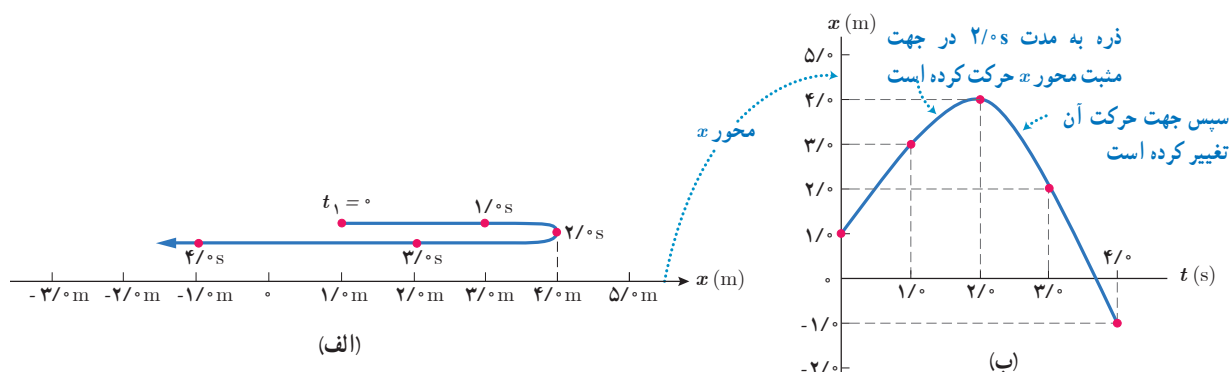
از آنجا که در ادامه این فصل، تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، جابه‌جایی متحرک را به جای بردار \vec{d} به صورت Δx و سرعت متوسط را به جای بردار \vec{v}_{av} به صورت رابطه زیر در حل مسئله‌ها به کار می‌بریم. در این صورت علامت‌های جبری Δx و v_{av} جهت جابه‌جایی و سرعت متوسط را نشان می‌دهند. اگر متحرک 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 ۱-۳).

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

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



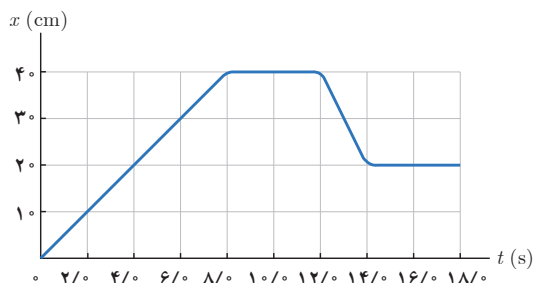
برای توصیف حرکت یک جسم می‌توان از نمودار مکان - زمان، که مکان جسم را در هر لحظه نشان می‌دهد، استفاده کرد. برای رسم این نمودار، زمان را روی محور افقی و مکان را روی محور قائم در نظر می‌گیریم. برای مثال، به حرکت ذره‌ای که در شکل ۱-۴ الف نشان داده شده است، توجه کنید. این ذره در لحظه $t_1 = 0$ s در مکان $x_1 = 1$ m، در لحظه $t_2 = 1$ s در مکان $x_2 = 3$ 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 مقیاسی مناسب مدرج 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 (خم) هموار، نمودار مکان - زمان را همانند شکل ۱-۴ ب رسم می‌کنیم.



شکل ۱-۴ الف) مسیر حرکت ذره در امتداد محور x . ب) نمودار مکان - زمان متحرک

مثال ۳-۱

شکل روبه‌رو 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؟

پ) در کدام بازه‌های زمانی مورچه ایستاده است؟

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

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

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

پاسخ: الف) در بازه زمانی $t = 0$ s تا $t = 8$ s، زیرا در این بازه، x همواره در حال افزایش است.

ب) در بازه زمانی $t = 12$ s تا $t = 14$ s، زیرا در این بازه، x همواره در حال کاهش است.

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

ت) در لحظه‌های $t = 6$ s و $t = 13$ s

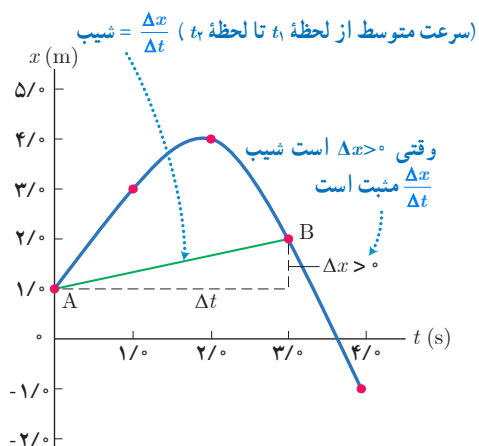
ث) در بازه زمانی $t = 8$ s تا $t = 12$ s

ج)

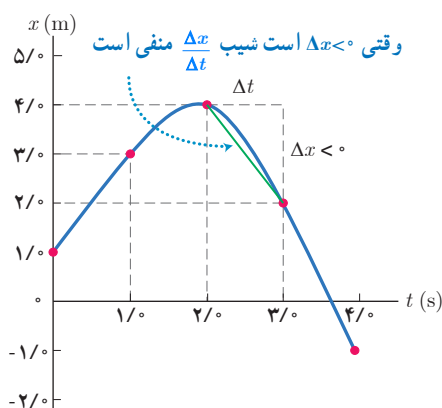
$$\Delta x = x_2 - x_1 = 4 \text{ cm} - 2 \text{ cm} = 2 \text{ cm}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2 \text{ cm}}{8 \text{ s} - 4 \text{ s}} = 0.5 \text{ cm/s}$$

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



شکل ۱-۵ سرعت متوسط بین دو لحظه $t_1 = 0$ و $t_2 = 3$ s



تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان-زمان: دوباره به نمودار شکل ۱-۴ که پاره خط بین دو نقطه دلخواه آن مطابق شکل ۱-۵ رسم شده است توجه کنید. همان طور که از درس ریاضی می دانید نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ برابر شیب پاره خطی است که دو نقطه A و B را به هم وصل می کند. از سوی دیگر با توجه به رابطه ۱-۴ می دانیم که این نسبت برابر سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی t_1 تا t_2 است. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که **سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان برابر شیب پاره خطی است که نقاط نظیر آن دو لحظه در نمودار مکان-زمان را به یکدیگر وصل می کند.**

مثال ۱-۴

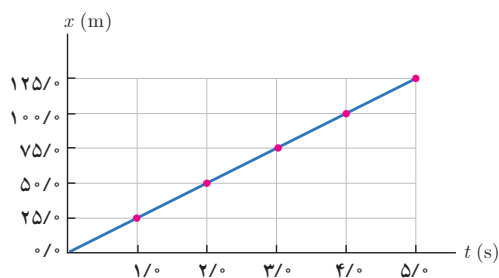
با توجه به نمودار مکان-زمان شکل ۱-۴، سرعت متوسط ذره را در بازه زمانی $t_1 = 2$ s تا $t_2 = 3$ s به دست آورید.

پاسخ: از رابطه ۱-۴ داریم:

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2 \text{ m} - 4 \text{ m}}{3 \text{ s} - 2 \text{ s}} = -2 \text{ m/s}$$

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

مثال ۱-۵



نمودار مکان-زمان موتورسواری که بر خط راست حرکت می کند مطابق شکل روبه رو است. سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه های زمانی ۰ s تا ۱ s، ۱ s تا ۲ s، ۲ s تا ۳ s، ۳ s تا ۴ s، ۴ s تا ۵ s محاسبه کنید. نتایج به دست آمده را با هم مقایسه و تفسیر کنید.

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

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{25 \text{ m} - 0 \text{ m}}{1 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 25 \text{ m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{50 \text{ m} - 25 \text{ m}}{2 \text{ s} - 1 \text{ s}} = 25 \text{ m/s}$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{75 \text{ m} - 50 \text{ m}}{3 \text{ s} - 2 \text{ s}} = 25 \text{ m/s}$$

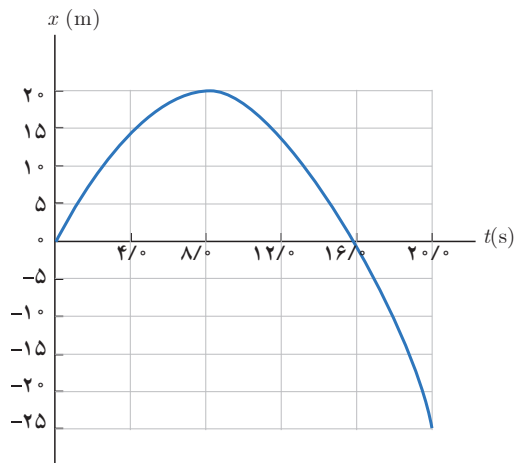
بازه زمانی ۰ s تا ۱ s

بازه زمانی ۱ s تا ۲ s

بازه زمانی ۲ s تا ۳ s

اگر در هر بازه زمانی دلخواه دیگری نیز سرعت متوسط موتورسوار را حساب کنید، خواهید دید که همین مقدار برای آن بدست 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 ۱-۶



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

الف) با استفاده از داده‌های روی شکل، سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/s$ تا $8/s$ ، $8/s$ تا $16/s$ ، $16/s$ تا $20/s$ حساب کنید.

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

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

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20\text{ m} - 0\text{ m}}{8\text{ s} - 0\text{ s}} = 2.5\text{ m/s}$$

بازه زمانی $0/s$ تا $8/s$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0\text{ m} - 20\text{ m}}{16\text{ s} - 0\text{ s}} = -1.25\text{ m/s}$$

بازه زمانی $0/s$ تا $16/s$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0\text{ m} - 20\text{ m}}{16\text{ s} - 8\text{ s}} = -2.5\text{ m/s}$$

بازه زمانی $8/s$ تا $16/s$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-25\text{ m} - 20\text{ m}}{20\text{ s} - 8\text{ s}} = -3.75\text{ m/s} \approx -3.8\text{ m/s}$$

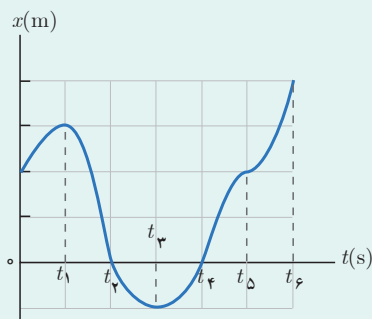
بازه زمانی $8/s$ تا $20/s$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-25\text{ m} - 0\text{ m}}{20\text{ s} - 16\text{ s}} = -6.25\text{ m/s} \approx -6.3\text{ m/s}$$

بازه زمانی $16/s$ تا $20/s$

ب) در بازه‌های زمانی ای که سرعت متوسط موتورسوار مثبت است، سرعت متوسط موتورسوار در جهت محور x و در بازه‌های زمانی ای که سرعت متوسط منفی است، سرعت متوسط موتورسوار در خلاف جهت محور x است.

پرسش ۱-۳



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

الف) متحرک چند بار از مبدأ مکان عبور می‌کند؟

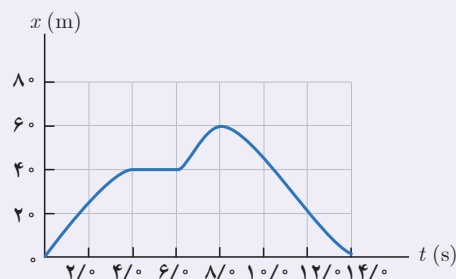
ب) در کدام بازه‌های زمانی متحرک در حال دور شدن از مبدأ است؟

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

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

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

تمرین ۱-۲



شکل روبه‌رو 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؟

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

ت) در کدام بازه زمانی، دوچرخه‌سوار ساکن است؟

ث) تندی متوسط و سرعت متوسط دوچرخه‌سوار را در هر یک از بازه‌های

زمانی $0 \leq t \leq 2$ s، $2 \leq t \leq 4$ s، $4 \leq t \leq 6$ s، $6 \leq t \leq 8$ s، $8 \leq t \leq 10$ s، $10 \leq t \leq 12$ s، $12 \leq t \leq 14$ s حساب کنید.



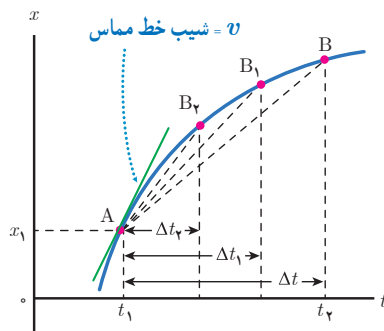
شکل ۱-۲ عقربه تندی سنج، تندی لحظه‌ای خودرو را نشان می‌دهد و هیچ گونه اطلاعی در خصوص جهت حرکت خودرو به ما گزارش نمی‌کند.

تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای: تندی متحرک در هر لحظه از زمان را **تندی لحظه‌ای**

می‌نامند. اگر هنگام گزارش تندی لحظه‌ای، به جهت حرکت متحرک نیز اشاره شود، در واقع **سرعت لحظه‌ای** (\vec{v}) آن را، که کمیتی برداری است بیان کرده‌ایم. برای مثال وقتی درون خودرویی به طرف شمال در حال حرکت باشید و در نقطه‌ای از مسیر، عقربه تندی سنج خودروی شما روی 100 km/h باشد (شکل ۱-۲)، تندی لحظه‌ای خودرو برابر 100 km/h و سرعت لحظه‌ای آن 100 km/h به طرف شمال است. برای سادگی، بیشتر وقت‌ها سرعت لحظه‌ای و تندی لحظه‌ای را به ترتیب به صورت سرعت و تندی بیان می‌کنند. از آنجا که در ادامه این فصل تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، سرعت لحظه‌ای متحرک را در حل مسئله‌ها به جای بردار \vec{v} به صورت v به کار می‌بریم. هر گاه متحرک در جهت مثبت محور x حرکت کند v مثبت است و هر گاه در جهت منفی محور حرکت کند v منفی است.

پرسش ۱-۴

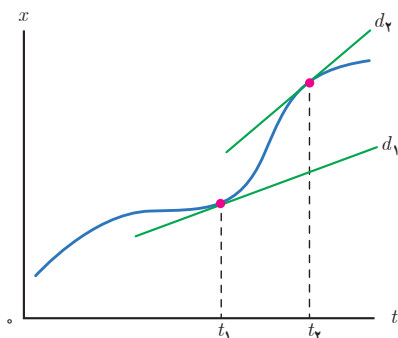
از روی نمودار مکان - زمان توضیح دهید در چه صورت سرعت لحظه‌ای متحرک همواره با سرعت متوسط آن برابر است.



شکل ۱-۳ با کوچک شدن تدریجی Δt ، نقطه B به نقطه A نزدیک می‌شود. در این صورت خط واصل بین این دو نقطه، در حالتی که بازه زمانی Δt خیلی خیلی کوچک شود، به خط مماس بر منحنی در نقطه A میل می‌کند. به این ترتیب شیب این خط، برابر با سرعت متحرک در لحظه t_1 است.

تعیین سرعت لحظه‌ای به کمک نمودار مکان - زمان: پیش از این دیدیم که سرعت متوسط متحرک بین هر دو لحظه دلخواه، برابر شیب خطی است که نمودار مکان - زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱-۳ دیده می‌شود اگر Δt به تدریج کوچک و کوچک‌تر شود، نقطه B به نقطه A نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود؛ به طوری که اگر Δt به سمت صفر میل کند ($\Delta t \rightarrow 0$) 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، شیب خط مماس برابر سرعت متحرک در لحظه t_1 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که: **سرعت در هر لحظه دلخواه t ، برابر شیب خط مماس بر نمودار مکان - زمان در آن لحظه است.**

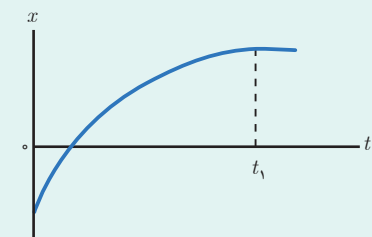
مثال ۱-۲



شکل روبه‌رو نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. d_1 و d_2 خط‌های مماس بر منحنی را در دو لحظه متفاوت نشان می‌دهند. در کدام لحظه سرعت متحرک بیشتر است؟

پاسخ: با توجه به شکل، شیب خط d_2 بیشتر از شیب خط d_1 است. بنابراین سرعت متحرک در لحظه t_2 بیشتر از سرعت آن در لحظه t_1 است ($v_2 > v_1$). توجه کنید که شیب هر دو خط مثبت است و بنابراین سرعت نیز در هر دو لحظه مثبت، یعنی در جهت محور x است.

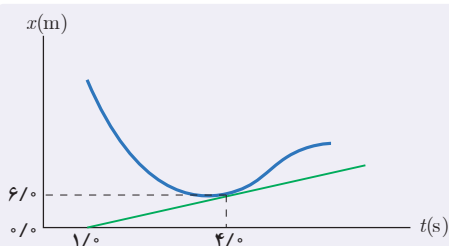
پرسش ۱-۵



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

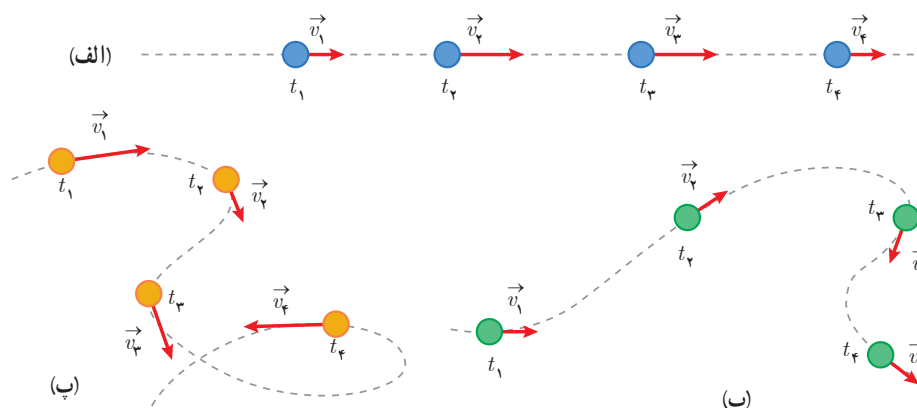
الف) از لحظه صفر تا لحظه t_1 سرعت متحرک رو به افزایش است یا کاهش؟
ب) اگر در لحظه t_1 خط مماس بر منحنی موازی محور زمان باشد، سرعت متحرک در این لحظه چقدر است؟

تمرین ۱-۳



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

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



شکل ۱-۸ وقتی سرعت جسمی

الف) به دلیل تغییر اندازه آن

ب) به دلیل تغییر جهت آن

پ) به دلیل تغییر اندازه و جهت آن

تغییر کند، حرکت جسم شتاب‌دار است.


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

شتاب متوسط متحرک در هر بازه زمانی دلخواه t_1 تا t_2 به صورت رابطه ۵-۱ تعریف می شود که در آن v_1 سرعت متحرک در لحظه t_1 و v_2 سرعت متحرک در لحظه t_2 است. همان طور که دیده می شود شتاب متوسط (a_{av}) ، کمیتی برداری و هم جهت با بردار تغییر سرعت $(\Delta \vec{v})$ است^۱. یکای SI شتاب متوسط، متر بر مربع ثانیه (m/s^2) است.

$$\vec{a}_{av} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (\text{شتاب متوسط}) \quad (5-1)$$

مثال ۸-۱

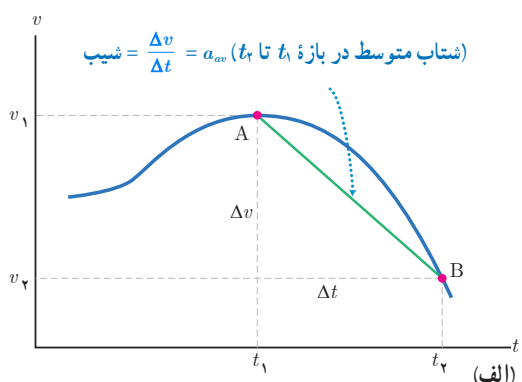
خودرویی از حال سکون در امتداد محور x شروع به حرکت می کند. پس از $12s$ ، سرعت خودرو به $24m/s$ در جهت محور x می رسد. شتاب متوسط خودرو را در این بازه زمانی به دست آورید.



پاسخ: از رابطه ۵-۱، داریم:

$$\vec{a}_{av} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{(24 m/s) \hat{i} - (0 m/s)}{12 s - 0 s} = (2.0 m/s^2) \hat{i}$$

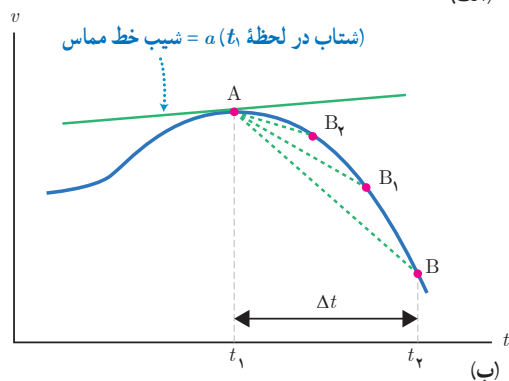
همان طور که دیده می شود، اندازه شتاب متوسط خودرو $2.0 m/s^2$ و شتاب در جهت محور x است.



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

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (\text{شتاب متوسط در حرکت بر خط راست}) \quad (6-1)$$

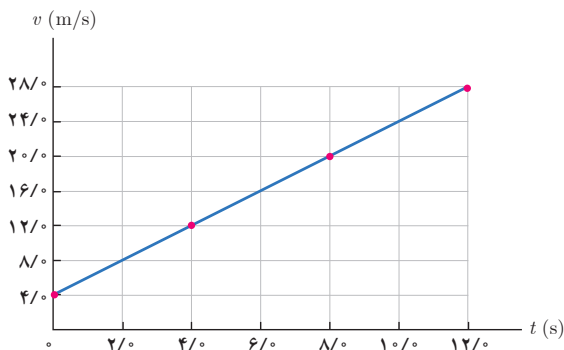
تعیین شتاب متوسط و لحظه ای به کمک نمودار سرعت - زمان: در شکل ۹-۱ الف، نمودار سرعت - زمان متحرکی نشان داده شده است که روی خط راست حرکت می کند. با توجه به تعریف شتاب متوسط، معلوم می شود، که شتاب متوسط بین دو لحظه برابر شیب خطی است که نمودار سرعت - زمان را در آن دو لحظه قطع می کند. همان طور که در شکل ۹-۱ ب دیده می شود، اگر Δt به سمت صفر میل کند $(\Delta t \rightarrow 0)$ خط واصل بین نقطه های A و B ، به خط مماس بر نمودار در نقطه A میل می کند. در این حالت، شیب خط مماس برابر شتاب متحرک در لحظه t_1 است. به این ترتیب می توان نتیجه گرفت که: **شتاب در هر لحظه دلخواه t ، برابر شیب خط مماس بر نمودار سرعت - زمان در آن لحظه است.** در کتاب های فیزیک برای سادگی، شتاب لحظه ای را شتاب می نامند و آن را با نماد a نشان می دهند.



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

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

مثال ۱-۹



نمودار سرعت-زمان موتورسواری که در امتداد محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی $0/s$ تا $12/s$ ، مطابق شکل روبه‌رو است. شتاب متوسط موتورسوار و جهت آن را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/s$ تا $2/s$ ، $2/s$ تا $4/s$ ، $4/s$ تا $8/s$ ، $8/s$ تا $10/s$ و $10/s$ تا $12/s$ بیابید.

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

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{8/s - 4/s}{2/s - 0/s} = 2/s^2$$

 بازه زمانی $0/s$ تا $2/s$

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{12/s - 8/s}{4/s - 2/s} = 2/s^2$$

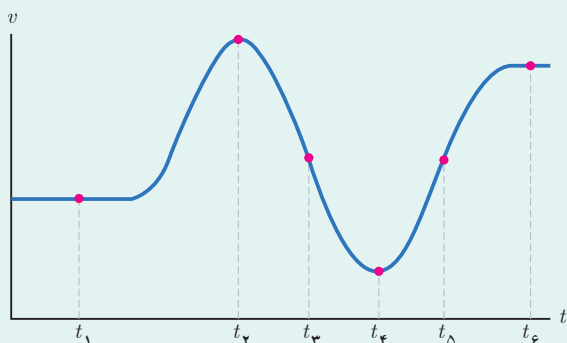
 بازه زمانی $2/s$ تا $4/s$

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{20/s - 12/s}{8/s - 4/s} = 2/s^2$$

 بازه زمانی $4/s$ تا $8/s$

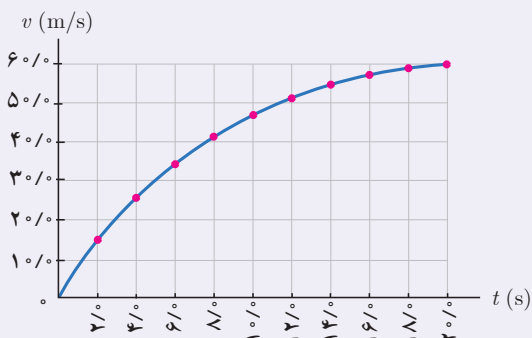
با توجه به علامت مثبت a_{av} در هر سه بازه زمانی، شتاب متوسط در جهت مثبت محور x است. اگر در هر بازه زمانی دلخواه دیگری نیز شتاب متوسط موتورسوار را حساب کنید با توجه به ثابت بودن شیب نمودار سرعت-زمان، اندازه و جهت یکسانی برای شتاب به دست می‌آید.

پرسش ۱-۶



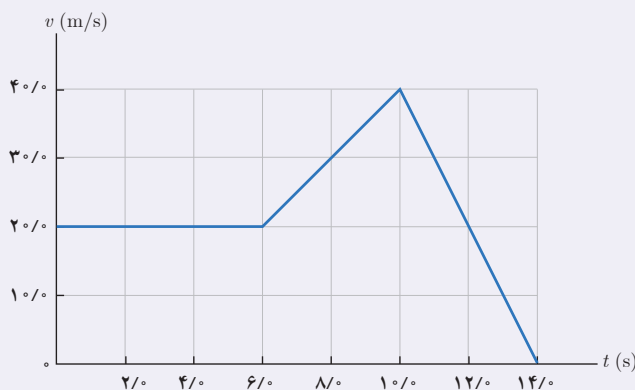
شکل روبه‌رو نمودار سرعت-زمان دوچرخه‌سواری را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. جهت شتاب دوچرخه‌سوار را در هر یک از لحظه‌های t_1 ، t_2 ، t_3 ، t_4 ، t_5 ، t_6 و ... تعیین کنید.

تمرین ۱-۴



نمودار سرعت-زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی $0/s$ تا $20/s$ مطابق شکل روبه‌رو است. الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟ ب) شتاب خودرو را در لحظه $t = 8/s$ به دست آورید.

تمرین ۱-۵



نمودار سرعت - زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی صفر تا $14/s$ مطابق شکل روبه‌رو است.

الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟
ب) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t = 2/s$ ، $t = 8/s$ و $t = 11/s$ 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 ۵-۱، با نمونه‌ای از حرکت با سرعت ثابت آشنا شدیم. در این مثال شیب نمودار مکان - زمان متحرک در طول حرکت ثابت و در نتیجه سرعت متوسط متحرک در هر بازه زمانی دلخواه، برابر سرعت لحظه‌ای آن است. در این صورت می‌توان نوشت:

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



شکل ۱-۱۰ در حرکت با سرعت ثابت، هم جهت سرعت و هم اندازه آن (تندی) ثابت است.

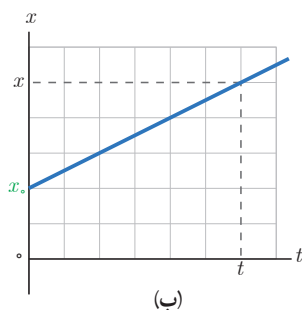
اگر مطابق شکل ۱-۱۱ متحرک در لحظه $t_1 = 0$ در مکان $x_1 = x_0$ و در لحظه $t_2 = t$ در مکان $x_2 = x$ باشد، رابطه اخیر را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

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

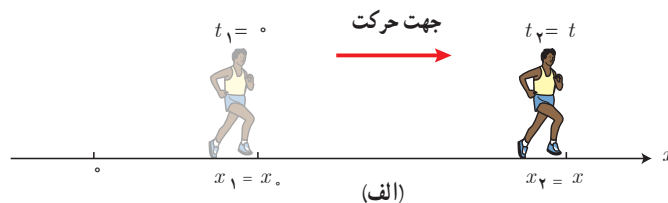
یا:

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

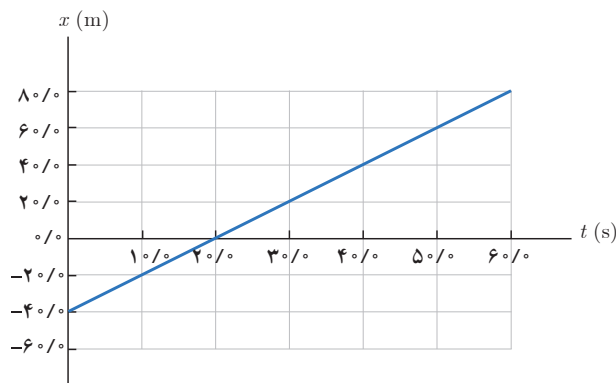
در معادله ۷-۱ معمولاً x_0 را که مکان متحرک در لحظه $t = 0$ است مکان اولیه متحرک می‌نامند. توجه کنید که مکان‌های x_0 و x می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند. سرعت متحرک هم به دلیل ماهیت برداری آن، در صورتی که حرکت در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این صورت منفی است.



شکل ۱-۱۱ الف) مکان یک دونه در دو لحظه متفاوت. ب) نمودار مکان-زمان دونه‌ای که در جهت محور x با سرعت ثابت می‌دود.



مثال ۱۰-۱



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

الف) شخص در مبدأ زمان ($t = 0$ s) در چه مکانی قرار دارد؟
ب) سرعت حرکت این شخص را به دست آورید و نمودار سرعت - زمان آن را رسم کنید.

پ) در چه لحظه یا لحظه‌هایی شخص در فاصله ۲۰ متری از مبدأ محور قرار دارد؟

ت) اگر شخص به مدت 5 min به همین صورت حرکت کند، جابه‌جایی وی را در این مدت به دست آورید.

پاسخ: الف) با توجه به نمودار مکان - زمان، در $t = 0$ s شخص در مکان اولیه $x_0 = -40$ m قرار دارد.

ب) با توجه به داده‌های روی نمودار و قرار دادن داده‌های یک لحظه دلخواه (برای مثال $t = 30$ s و $x = 20$ m) در رابطه ۱-۷، داریم:

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

در نتیجه $v = +2$ m/s به دست می‌آید. علامت مثبت نشان

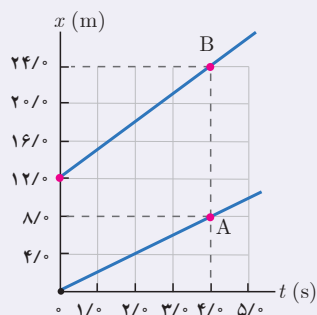
می‌دهد که شخص در جهت محور x حرکت می‌کند. نمودار سرعت - زمان مطابق شکل بالا است.

پ) در لحظه‌های $t = 10$ s و $t = 30$ s. توجه کنید که فاصله از مبدأ مکان، $|x|$ است و نه خود x .

ت) با قرار دادن $t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$ در رابطه $\Delta x = v\Delta t$ داریم:

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

تمرین ۶-۱



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

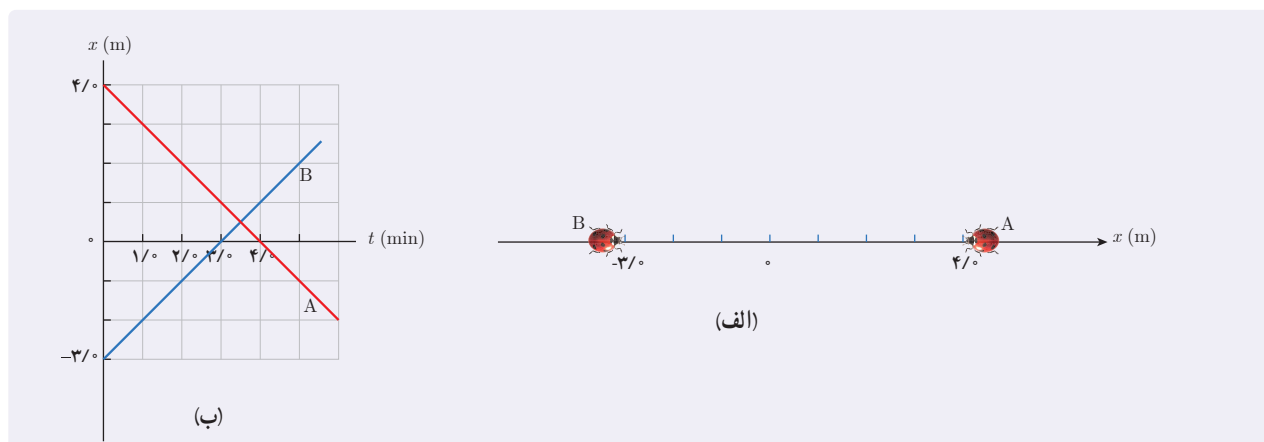
سرعت هر متحرک را پیدا کنید و معادله مکان - زمان آنها را بنویسید.

تمرین ۷-۱

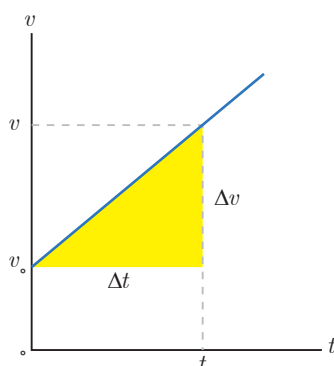
شکل الف، مکان دو کفش دوزک A و B را که در راستای محور x حرکت می‌کنند در لحظه $t = 0$ s نشان می‌دهد. نمودار مکان - زمان این کفش دوزک‌ها در شکل ب رسم شده است.

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

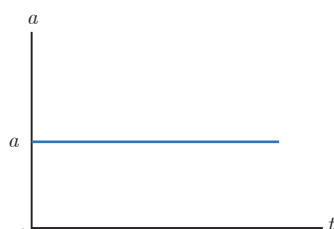
ب) با استفاده از معادله مکان - زمان، زمان و مکان هم‌رسی کفش دوزک‌ها را پیدا کنید.



۳-۱ حرکت با شتاب ثابت



شکل ۱۳-۱ نمودار $v-t$ در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن v و a



شکل ۱۴-۱ نمودار $a-t$ در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن a

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 $a_{av} = a$.

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 سراشیبی 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 باند 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.

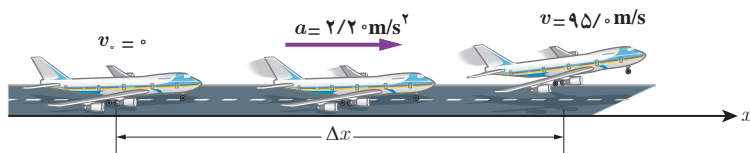
معادله سرعت - زمان در حرکت با شتاب ثابت: اگر مانند نمودار شکل ۱۲-۱ در $t = 0$ سرعت اولیه متحرک v_0 و در لحظه t ، سرعت متحرک برابر v باشد در این صورت معادله ۶-۱ را برای حرکت با شتاب ثابت $(a = a_{av})$ در امتداد خط راست می‌توانیم به‌صورت زیر بازنویسی کنیم:

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

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

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

مثال ۱۱-۱



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

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

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

پ) جابه‌جایی هواپیما در این مدت چقدر است؟

پاسخ: الف) با توجه به ثابت بودن شتاب حرکت هواپیما روی باند پرواز، داده‌های روی شکل را می‌توان در معادله ۸-۱ جای‌گذاری کرد. به این ترتیب داریم:

$$v = at + v_i \Rightarrow 95 \text{ m/s} = (2/2 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 43/2 \text{ s}$$

در اولین فرصتی که سوار هواپیما شدید، نتیجه به‌دست آمده را واریسی کنید!

ب)

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

پ) از رابطه ۴-۱ داریم:

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v_{av} \Delta t = (47/5 \text{ m/s})(43/2 \text{ s}) = 2/5 \times 10^3 \text{ m}$$

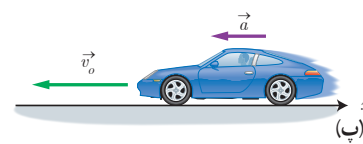
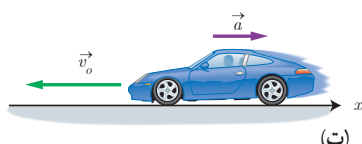
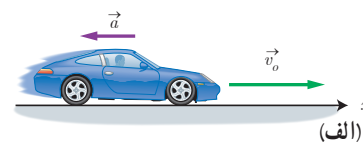
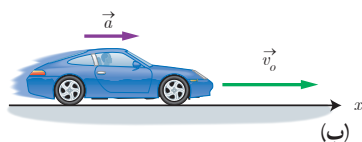
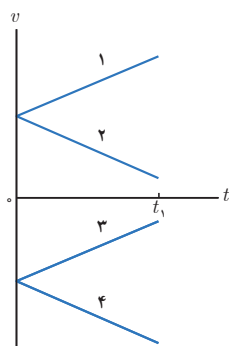
تمرین ۸-۱

معادله سرعت - زمان متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند در SI به صورت $v = -1/8t + 2/2$ است.

الف) سرعت متحرک در لحظه $t = 4 \text{ s}$ چقدر است؟ ب) سرعت متوسط متحرک و جابه‌جایی آن در بازه زمانی صفر تا $t = 4 \text{ s}$ چقدر است؟ پ) نمودار سرعت - زمان این متحرک را رسم کنید.

فعالیت ۲-۱

در تمامی حالت‌های شکل زیر، خودروها در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت‌اند. حرکت هریک از خودروها، توسط کدام یک از نمودارهای $v-t$ در محدوده زمانی نشان داده شده روی نمودارها، توصیف می‌شود؟ همچنین توضیح دهید تندی کدام خودرو در حال افزایش (حرکت تندشونده) و تندی کدام خودرو در حال کاهش (حرکت کندشونده) است.



معادله مکان – زمان در حرکت با شتاب ثابت: اگر جسمی که با شتاب ثابت و در امتداد محور x حرکت می‌کند در $t=0$ در مکان x_0 و دارای سرعت v_0 باشد، در این صورت از رابطه‌های ۱-۲ و ۱-۹ داریم:

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

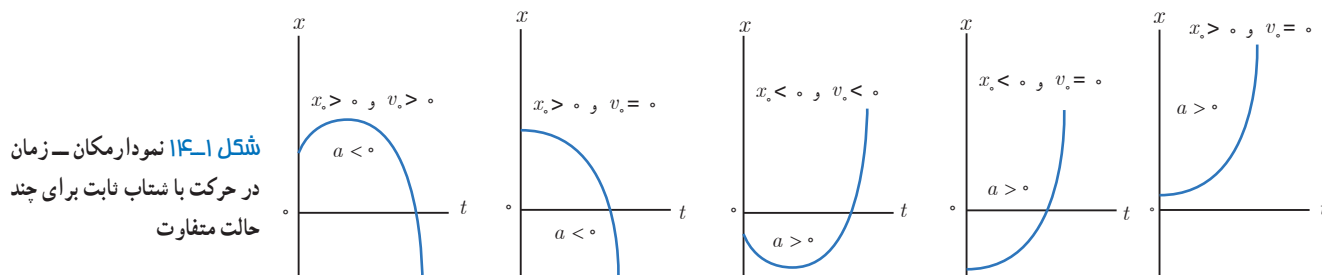
با قرار دادن رابطه ۱-۸ در معادله بالا داریم:

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

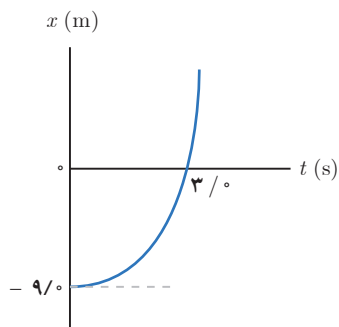
با ساده‌سازی این رابطه خواهیم داشت:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \quad (1-10) \quad (\text{معادله مکان – زمان در حرکت با شتاب ثابت})$$

همان‌طور که دیده می‌شود در این نوع حرکت، مکان متحرک تابعی درجه دوم از زمان است. با رسم تابع‌های درجه دوم در ریاضی ۱ پایه دهم آشنا شدید. شکل ۱۴-۱ نمودار $x-t$ را برای چند حالت مختلف نشان می‌دهد.



مثال ۱-۱۲



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

پاسخ: الف) شیب خط چین مماس بر منحنی در $t = 0/s$ برابر صفر است و نشان‌دهنده این است که سرعت متحرک در این لحظه صفر است ($v_0 = 0/s$). با توجه به داده‌های روی نمودار و معادله ۱-۱۰ داریم:

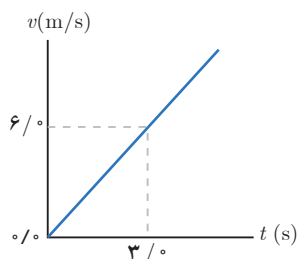
$$x_0 = -9/m, \quad t = 3/s \rightarrow x = 0/m, \quad v_0 = 0/m/s$$

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

ب) از معادله ۱-۸ داریم:

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

نمودار این معادله در شکل روبه‌رو رسم شده است.



پ) با توجه به نمودار مکان-زمان، جابه‌جایی متحرک در بازه زمانی $(\circ/\circ\text{s}, 3/\circ\text{s})$ برابر $9/\circ\text{m}$ برای $\Delta x = \circ/\circ - (-9/\circ\text{m}) = 9/\circ\text{m}$ است. (ت) سطح بین منحنی سرعت و محور زمان در نمودار سرعت-زمان، برابر $9/\circ\text{m} = (3/\circ\text{s})(\frac{1}{\circ} \times 6/\circ\text{m/s})$ است که با نتیجه قسمت پ سازگار است.

ث) از رابطه ۴-۱ داریم:

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

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

تمرین ۹-۱

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

معادله سرعت - جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت: اگر هنگام بررسی حرکت جسمی، زمان t معلوم نباشد، می‌توان از معادله سرعت - جابه‌جایی برای پیدا کردن یکی از کمیت‌های جابه‌جایی Δx ، سرعت اولیه v_o ، سرعت v ، یا شتاب a متحرک استفاده کرد. برای به‌دست آوردن این معادله از رابطه‌های ۴-۱ و ۹-۱ شروع می‌کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام به‌دست آوردن معادله مکان-زمان دیدیم می‌توان نوشت:

$$x = \left(\frac{v + v_o}{2}\right)t + x_o$$

با به‌دست آوردن t از معادله ۸-۱ و قرار دادن آن در رابطه بالا داریم:

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

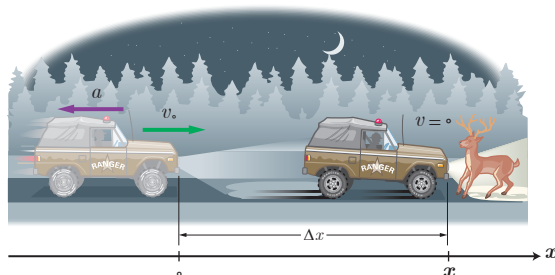
در این صورت داریم:

$$v^2 = v_o^2 + 2a\Delta x \quad (11-1) \quad (\text{معادله سرعت - جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت})$$

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

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

مثال ۱۳-۱



محیط‌بان یک پارک حفاظت شده هنگام گشت شبانه، با تندی $40/\circ\text{km/h}$ در جاده‌ای مستقیم در حرکت است که ناگهان گوزن بدون حرکتی را در جلوی خود می‌بیند و ترمز می‌گیرد (شکل روبه‌رو). حرکت خودرو با شتابی به اندازه $3/80\text{m/s}^2$ کند می‌شود تا سرانجام متوقف شود. اگر لحظه‌ای که محیط‌بان ترمز می‌گیرد، گوزن در فاصله $22/\circ$ متری از خودرو باشد،

الف) خودرو در چه فاصله‌ای از گوزن متوقف می‌شود؟

ب) چه مدت طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟

پاسخ: الف) حرکت خودرو را در جهت مثبت محور x فرض می‌کنیم. همچنین برای سادگی، مبدأ زمان و مکان را جایی می‌گیریم که محیط‌بان ترمز گرفته و در نتیجه $x_0 = 0 \text{ m}$ و $v_0 = 40 \text{ km/h} = 11.1 \text{ m/s}$ است. از طرفی، چون سرعت خودرو در جهت محور x به تدریج در حال کاهش است، شتاب آن بر خلاف جهت محور x و در نتیجه منفی خواهد شد. به این ترتیب از معادله ۱۱-۱ داریم:

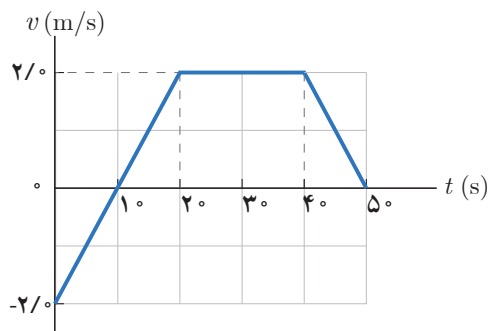
$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) \Rightarrow 0 - (11.1 \text{ m/s})^2 = 2(-3/8 \text{ m/s}^2)(x - 0)$$

در نتیجه $x = 16/2 \text{ m}$ و خودرو در فاصله $5/8 \text{ m}$ از گوزن متوقف می‌شود و خوشبختانه برخوردی بین خودرو و گوزن صورت نمی‌گیرد.

ب) از رابطه ۸-۱ داریم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow 0 \text{ m/s} = (-3/8 \text{ m/s}^2)t + 11.1 \text{ m/s} \Rightarrow t = 2/92 \text{ s}$$

مثال ۱۴-۱



متحرکی که در راستای محور x حرکت می‌کند در لحظه $t = 0$ از مکان $x_0 = 0$ می‌گذرد. نمودار سرعت-زمان این متحرک مطابق شکل روبه‌رو 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 لحظه‌هایی جهت حرکت متحرک تغییر کرده است؟

پ) با توجه به نمودار سرعت-زمان توضیح دهید در کدام بازه‌های زمانی

حرکت جسم تندشونده و یا کندشونده است.

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

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

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

پاسخ: الف) با توجه به نمودار، در 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 $t_4 = 5 \text{ s}$ ، 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.

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

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

در بازه زمانی $t_2 = 2 \text{ s}$ تا $t_3 = 4 \text{ s}$ ، حرکت با سرعت ثابت است.

در بازه زمانی $t_3 = 4 \text{ s}$ تا $t_4 = 5 \text{ s}$ ، تندی در حال کاهش و در نتیجه حرکت کندشونده است.

ت) در بازه زمانی صفر تا $t_4 = 2 \text{ s}$ حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب از معادله ۸-۱ داریم:

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

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

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow x_1 = \frac{1}{2}(20 \text{ m/s}^2)(1 \text{ s})^2 + (-20 \text{ m/s})(1 \text{ s}) + 0 \Rightarrow x_1 = -10 \text{ m}$$

در لحظه $t_p = 2\text{ s}$ داریم:

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

در بازه زمانی 2 s تا 4 s ، حرکت با سرعت ثابت روی خط راست است. به این ترتیب با توجه به معادله ۱-۷، جابه جایی در

این بازه زمانی برابر است با:

$$\Delta x = v\Delta t \Rightarrow \Delta x = (\frac{2}{3}\text{ m/s})(4\text{ s} - 2\text{ s}) = 4\text{ m}$$

در نتیجه متحرک در لحظه $t_p = 4\text{ s}$ در مکان $x_p = x_0 + \Delta x = 0 + 4\text{ m} = 4\text{ m}$ قرار دارد.

در بازه زمانی 4 s تا 5 s ، حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب داریم:

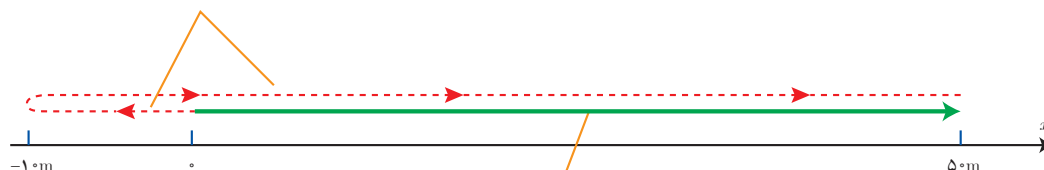
$$\Delta x = (\frac{v_1 + v_2}{2})\Delta t = (\frac{\frac{2}{3}\text{ m/s} + 0}{2})(1\text{ s}) \Rightarrow \Delta x = 1\text{ m}$$

در نتیجه متحرک در لحظه $t_p = 5\text{ s}$ در مکان $x_p = x_0 + \Delta x = 4\text{ m} + 1\text{ m} = 5\text{ m}$ قرار دارد.

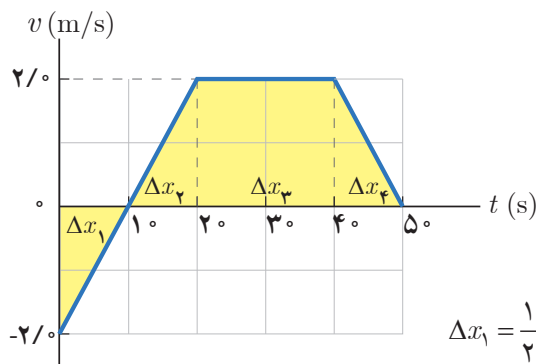


ث) در شکل زیر جابه جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان حرکت نشان داده شده است.

مسافت کل پیموده شده برابر $l = 1\text{ m} + 1\text{ m} + 5\text{ m} = 7\text{ m}$ است.



بردار جابه جایی کل که برابر $\vec{d} = (+5\text{ m})\vec{i}$ 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:

$$\Delta x_1 = \frac{1}{2}(-\frac{2}{3}\text{ m/s})(1\text{ s}) = -1\text{ m} \quad \Delta x_2 = \frac{1}{2}(\frac{2}{3}\text{ m/s})(1\text{ s}) = 1\text{ m}$$

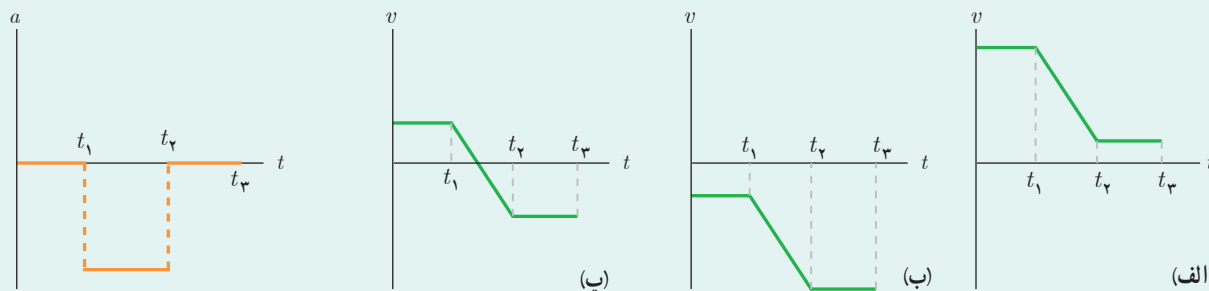
$$\Delta x_3 = (\frac{2}{3}\text{ m/s})(2\text{ s}) = 4\text{ m} \quad \Delta x_4 = \frac{1}{2}(\frac{2}{3}\text{ m/s})(1\text{ s}) = 1\text{ m}$$

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4 = -1\text{ m} + 1\text{ m} + 4\text{ m} + 1\text{ m} = 5\text{ m}$$

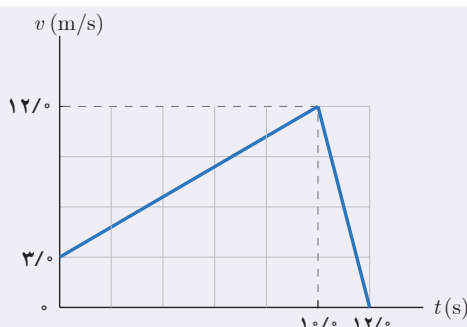
همان طور که از نتیجه بالا دیده می شود، مساحت سطح بین نمودار سرعت - زمان و محور زمان در کل زمان حرکت، با جابه جایی متحرک برابر است.

پرسش ۱-۷

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

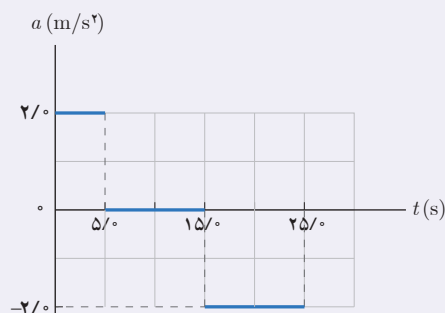


تمرین ۱-۱۰



آهویی در مسیری مستقیم در امتداد محور x می‌دود. نمودار سرعت - زمان آهو در بازه زمانی صفر تا $12/0$ s مطابق شکل است. در این بازه زمانی الف) مسافت کل پیموده شده توسط آهو را به دست آورید. ب) جابه‌جایی آهو را پیدا کنید. پ) نمودار شتاب - زمان آهو را رسم کنید.

تمرین ۱-۱۱



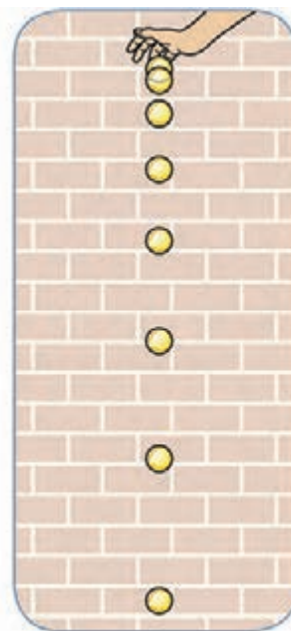
شکل مقابل نمودار شتاب - زمان یک ماشین اسباب بازی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند. با فرض $x_0 = 0$ و $v_0 = 0$ ، در بازه زمانی صفر تا $25/0$ s، الف) نمودارهای سرعت - زمان و مکان - زمان این ماشین را رسم کنید. ب) با توجه به نمودار سرعت - زمان، مشخص کنید در کدام یک از بازه‌های زمانی، حرکت ماشین تندشونده، کندشونده یا با سرعت ثابت است. پ) شتاب متوسط ماشین را پیدا کنید. ت) جابه‌جایی ماشین را پیدا کنید.

۴-۱ سقوط آزاد

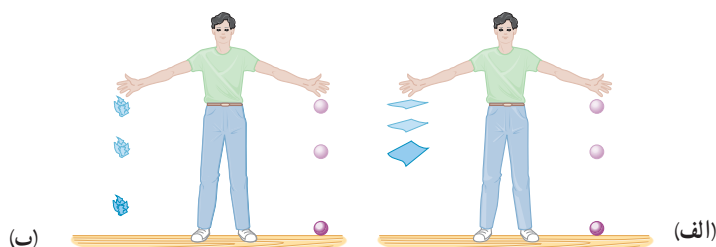
وقتی گلوله‌ای را رها می‌کنیم اثر مقاومت هوا هنگام حرکت آن ناچیز است، ولی وقتی برگه کاغذی را رها می‌کنیم اثر مقاومت هوا را هنگام حرکت آن نمی‌توان نادیده گرفت. با مقایسه زمان سقوط گلوله و برگه کاغذ، به سادگی می‌توان تفاوت اثر مقاومت هوا را روی حرکت این دو جسم تجربه کرد (شکل ۱۵-۱ الف). حال اگر برگه کاغذ را مجاله کنیم، اثر مقاومت هوا هنگام سقوط آن به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد (شکل ۱۵-۱ ب). جسمی که تحت تأثیر جاذبه گرانشی، در نزدیکی سطح

زمین سقوط می‌کند و اثر مقاومت هوا را بتوان برای آن نادیده گرفت، آشناترین مثال برای حرکت با شتاب ثابت است. این حرکت آرمانی، **سقوط آزاد** نامیده می‌شود. شکل ۱۶-۱ تصویری بی‌درپی از یک توپ در حال سقوط آزاد را نشان می‌دهد که برای بازه‌های زمانی مساوی رسم شده است. فاصله رو به افزایش بین تصویرها نشان می‌دهد که سرعت توپ به‌طور پیوسته در حال افزایش است؛ یعنی توپ به طرف پایین شتاب می‌گیرد.

حرکت سقوط آزاد، افزون بررها کردن جسم، شامل پرتاب کردن جسم رو به پایین یا رو به بالا نیز می‌شود. در هر سه حالت یاد شده، جهت شتاب رو به پایین و 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.^۱



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



شکل ۱۵-۱ تجربه‌ای ساده برای مقایسه اثر مقاومت هوا روی حرکت سقوط آزاد گلوله، برگه کاغذ و برگه کاغذ مجاله شده

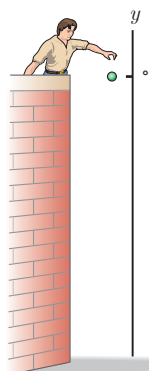
سقوط آزاد بدون سرعت اولیه : با توجه به اینکه در این کتاب تنها سقوط آزاد بدون سرعت اولیه بررسی می‌شود، معادله‌های مورد استفاده برای حل مسئله‌های این حرکت، با فرض اینکه جهت رو به بالا را مثبت بگیریم، با قرار دادن $v_0 = 0$ ، به جای y ، به جای x و $-g$ به جای a در معادله‌های حرکت با شتاب ثابت بر مسیر مستقیم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

$$v = -gt \quad (۱۲-۱)$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \quad (۱۳-۱)$$

$$v^2 = -2g(y - y_0) \quad (۱۴-۱)$$

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



شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که از بالای دیواری بلند، گلوله‌ای را رها می‌کند. (الف) پس از $1/0 \text{ s}$ گلوله چه مسافتی را طی می‌کند و سرعت آن به چقدر می‌رسد؟ (ب) اگر ارتفاع دیوار 10 m باشد سرعت برخورد گلوله به سطح زمین و مدت زمان کل حرکت آن را پیدا کنید. **پاسخ :** (الف) جهت بالا را مثبت و مبدأ مکان را محل رها شدن جسم فرض می‌کنیم. به این ترتیب از معادله ۱۳-۱ داریم :

مثال ۱۵-۱

۱- آموزش سایر حالت‌های سقوط آزاد خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow y = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(1/0 \text{ s})^2 + 0 \Rightarrow y = -4.9 \text{ m}$$

جابه‌جایی گلوله در این مدت $\Delta y = y - y_0 = -4.9 \text{ m}$ و مسافت طی شده 4.9 m است.

همچنین با استفاده از معادله ۱۲-۱ سرعت گلوله پس از $1/0 \text{ s}$ برابر است با:

$$v = -gt = -(9.8 \text{ m/s}^2)(1/0 \text{ s}) = -9.8 \text{ m/s}$$

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 ۱۴-۱ داریم:

$$v^2 = -2g(y - y_0) = -2(9.8 \text{ m/s}^2)(-1.0 \text{ m} - 0) = 19.6 \text{ m}^2/\text{s}^2 \Rightarrow v = \pm 4.4 \text{ m/s}$$

چون جهت بالا را مثبت فرض کردیم، علامت منفی برای سرعت برخورد گلوله با سطح زمین قابل قبول است، یعنی $v = -4.4 \text{ m/s}$.

به دو روش می‌توان زمان کل را به‌دست آورد. از معادله‌های ۱۲-۱ و ۱۳-۱ داریم:

$$v = -gt \Rightarrow -4.4 \text{ m/s} = -(9.8 \text{ m/s}^2)t \Rightarrow t = 1/4 \text{ s}$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 = -1.0 \text{ m} = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)t^2 + 0 \Rightarrow t^2 = 2/0 \Rightarrow t = 1/4 \text{ s}$$

● مثال ۱۶-۱

سنگی از صخره‌ای به ارتفاع $122/5 \text{ m}$ 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.

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

ت) 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 ۱۳-۱ داریم:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow -122/5 \text{ m} = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)t^2 + 0 \Rightarrow t = 5/0 \text{ s}$$

ب) رابطه ۴-۱ را برای امتداد قائم می‌توان به‌صورت $v_{av} = \Delta y / \Delta t$ در نظر گرفت. به این ترتیب داریم:

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

پ) ابتدا با استفاده از رابطه ۱۳-۱ جابه‌جایی سنگ را تا هر یک از لحظه‌های $t_1 = 3/0 \text{ s}$ و $t_2 = 4/0 \text{ s}$ پیدا می‌کنیم. سپس با کم

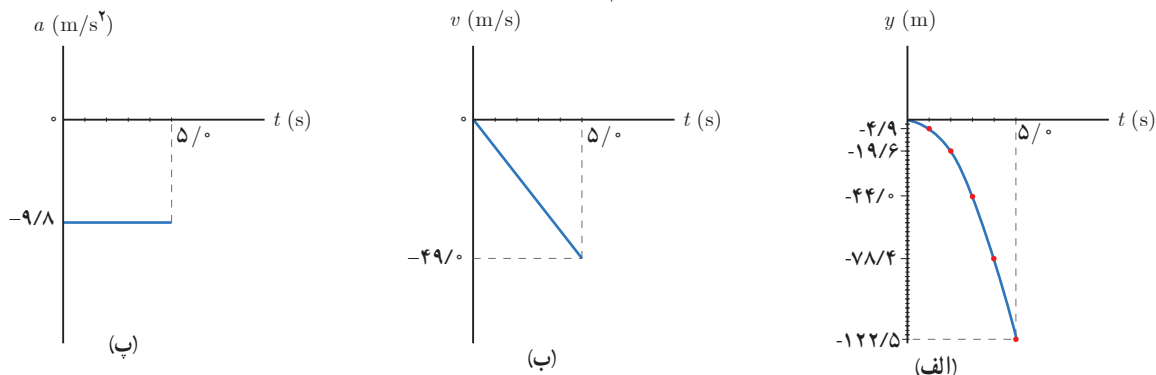
کردن این دو جابه‌جایی از یکدیگر، جابه‌جایی سنگ بین این دو لحظه به‌دست می‌آید.

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow y_1 = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(3/0 \text{ s})^2 + 0 \Rightarrow y_1 = -44/0 \text{ m}$$

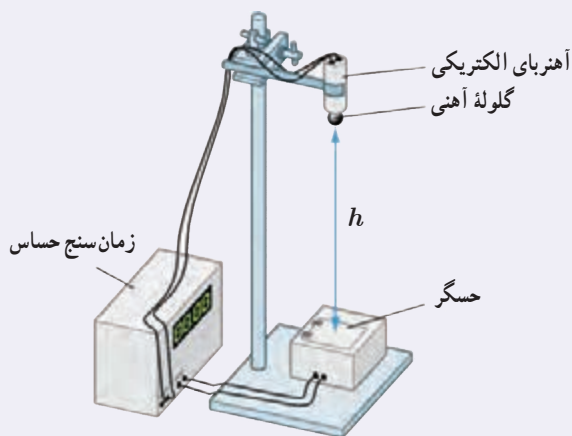
$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow y_2 = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(4/0 \text{ s})^2 + 0 \Rightarrow y_2 = -78/0 \text{ m}$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 = -78/0 \text{ m} - (-44/0 \text{ m}) = -34/0 \text{ m}$$

ت) برای رسم نمودار سرعت - زمان به سرعت جسم در لحظه برخورد با زمین نیاز داریم. با استفاده از رابطه ۱-۱۲ سرعت برخورد سنگ با زمین برابر $v = -gt = -(9/8 \text{ m/s}^2)(5/0 \text{ s}) = -49/0 \text{ m/s}$ است. نمودارهای مکان - زمان، سرعت - زمان و شتاب - زمان سنگ به ترتیب در شکل‌های الف، ب و پ رسم شده است.



تمرین ۱-۱۲

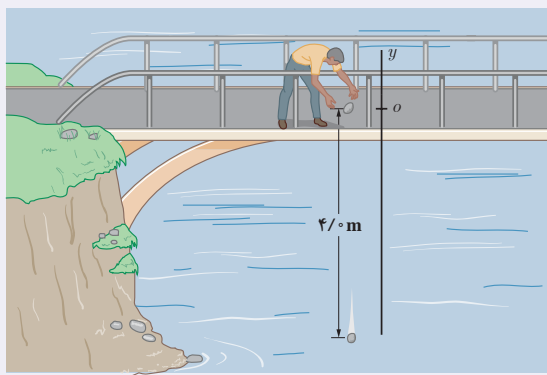


شکل مقابل اسباب انجام آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان شتاب گرانش را در محل آزمایش اندازه گرفت. الف) به نظر شما این وسیله آزمایش چگونه کار می‌کند؟ ب) در یک آزمایش نوعی، داده‌های زیر به دست آمده است:

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

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

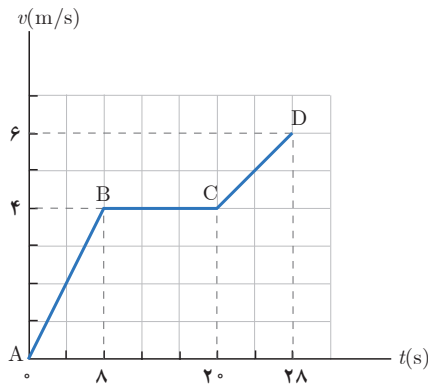
تمرین ۱-۱۳



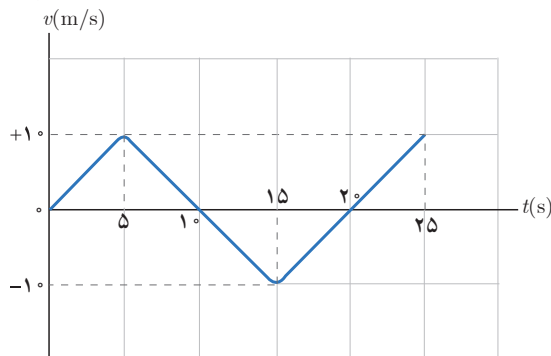
شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که ابتدا سنگی را از بالای پلی به داخل رودخانه‌ای رها کرده است. وقتی سنگ مسافت $4/0 \text{ m}$ را طی می‌کند سنگ دیگری دوباره از همان ارتفاع توسط شخص رها می‌شود. توضیح دهید آیا با گذشت زمان و تا قبل از برخورد سنگ اول به سطح آب رودخانه، فاصله بین دو سنگ کاهش یا افزایش می‌یابد یا تغییری نمی‌کند.

۱-۱ شناخت حرکت

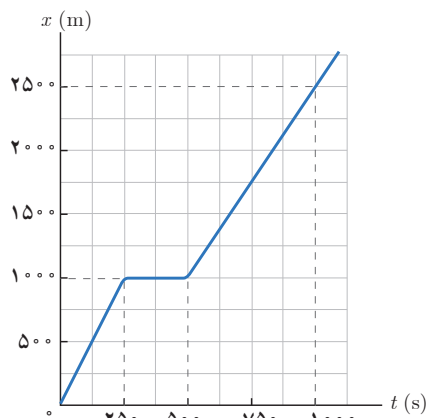
پ) در بازه زمانی s تا s ۱ جابه‌جایی این سه متحرک را پیدا کنید.
۴. شکل زیر نمودار سرعت - زمان متحرکی را که در امتداد محور x حرکت می‌کند در مدت ۲۸ ثانیه نشان می‌دهد.



الف) شتاب در هر یک از مرحله‌های AB، BC و CD چقدر است؟
 ب) شتاب متوسط در بازه زمانی صفر تا ۲۸ ثانیه چقدر است؟
 پ) جابه‌جایی متحرک را در این بازه زمانی پیدا کنید.
۵. نمودار سرعت - زمان متحرکی مطابق شکل زیر است.
 الف) نمودار شتاب - زمان این متحرک را رسم کنید.
 ب) اگر $x_0 = -10\text{ m}$ باشد نمودار مکان - زمان متحرک را رسم کنید.



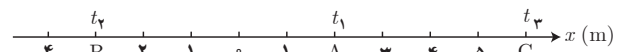
۶. شکل زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دونه دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.



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



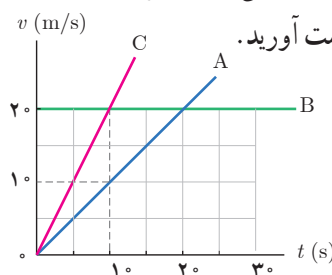
۲. متحرکی مطابق شکل در لحظه t_1 در نقطه A، در لحظه t_2 در نقطه B و در لحظه t_3 در نقطه C قرار دارد.

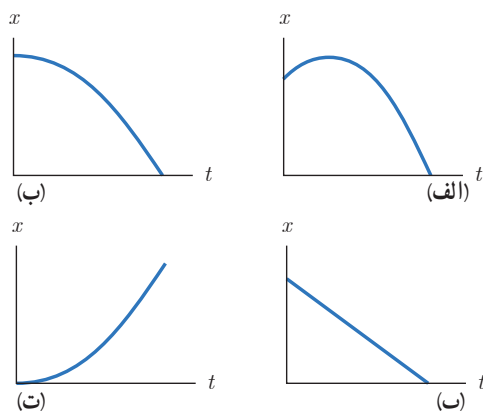


الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور x رسم کنید و برحسب بردار یک‌ه بنویسید.
 ب) بردار جابه‌جایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی t_1 تا t_2 ، t_2 تا t_3 و t_1 تا t_3 به دست آورید.

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

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





الف) در کدام بازه زمانی دونده سریع‌تر دویده است؟

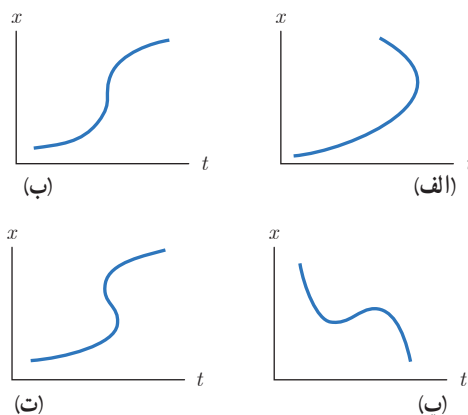
ب) در کدام بازه زمانی، دونده ایستاده است؟

پ) سرعت دونده را در بازه زمانی s تا s حساب کنید.

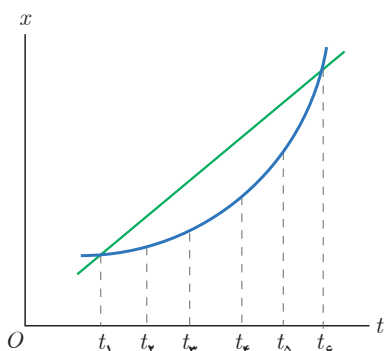
ت) سرعت دونده را در بازه زمانی s تا s حساب کنید.

ث) سرعت متوسط دونده را در بازه زمانی s تا s حساب کنید.

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



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



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

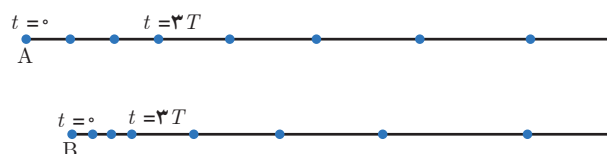
ب) در چه لحظه‌ای تندی دو خودرو تقریباً یکسان است؟

پ) سرعت متوسط دو خودرو را در بازه زمانی t_1 تا t_6 با هم مقایسه کنید.

۹. هر یک از شکل‌های زیر مکان یک خودرو را در لحظه‌های

$t=0$, $t=T$, $t=2T$, $t=3T$, و $t=4T$ نشان می‌دهد. هر دو

خودرو در لحظه $t=3T$ شتاب می‌گیرند. توضیح دهید،



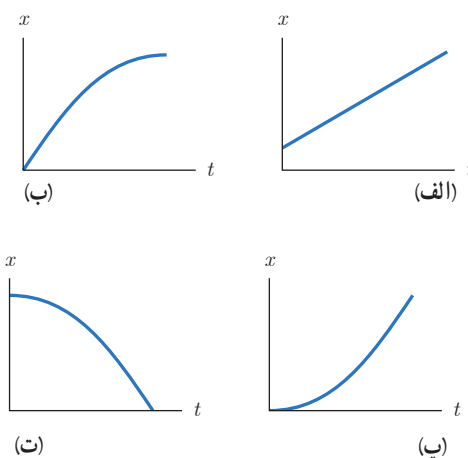
الف) سرعت اولیه کدام خودرو بیشتر است.

ب) سرعت نهایی کدام خودرو بیشتر است.

پ) کدام خودرو شتاب بیشتری دارد.

۱۰. توضیح دهید از نمودارهای مکان-زمان شکل زیر کدام

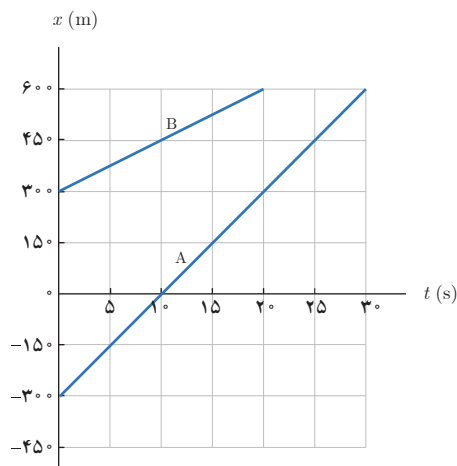
موارد حرکت متحرکی را توصیف می‌کند که از حال سکون شروع به حرکت کرده و به تدریج بر تندی آن افزوده شده است.



۱۱. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان-زمان نشان داده

شده، حرکت متحرکی را توصیف می‌کند که سرعت اولیه آن در جهت محور x و شتاب آن بر خلاف جهت محور x است.

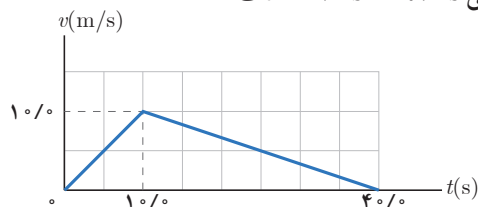
۱۶. شکل زیر نمودار مکان - زمان دو خودرو را نشان می‌دهد که روی خط راست حرکت می‌کنند. الف) معادله حرکت هر یک از آنها را بنویسید. ب) اگر خودروها با همین سرعت حرکت کنند، در چه زمان و مکانی به هم می‌رسند؟



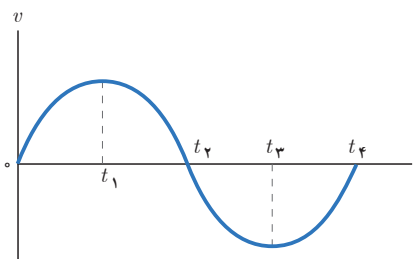
۱۷. دانستن محل قرارگیری یک ماهواره در مأموریت‌های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش‌بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت‌های کارشناسان فضایی است. بدین منظور تپ‌های الکترومغناطیسی را که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند، به طرف ماهواره موردنظر می‌فرستند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می‌شود.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

۱-۳ حرکت با شتاب ثابت

۱۸. نمودار $v-t$ متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل زیر است. اندازه سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی ۰ تا ۵/۰ s تا ۵/۰ s تا ۲۵/۰ s تا ۴۰/۰ s است؟

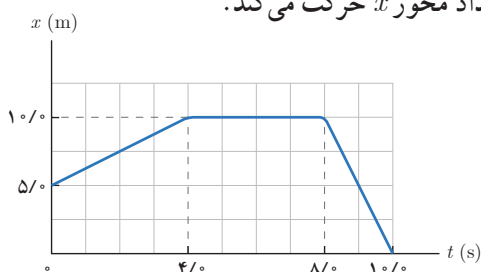


۱۹. معادله حرکت جسمی در SI به صورت $x = t^3 - 3t^2 + 4$ است. الف) مکان متحرک را در $t = 0$ s و $t = 2$ s به دست آورید. ب) سرعت متوسط جسم را در بازه زمانی صفر تا ۲ ثانیه پیدا کنید. **۲۰.** نمودار سرعت - زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. تعیین کنید در کدام بازه‌های زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه‌های زمانی در خلاف جهت محور x است.



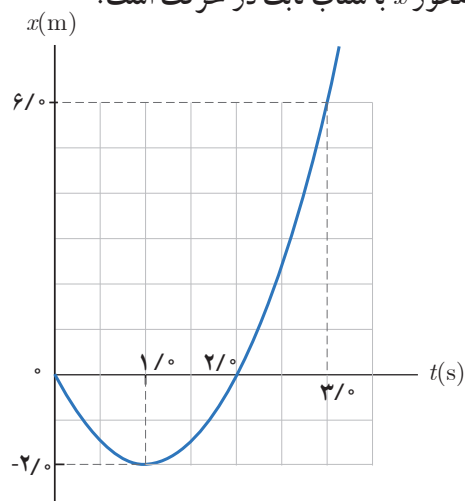
۱-۲ حرکت با سرعت ثابت

۲۱. جسمی با سرعت ثابت بر مسیری مستقیم در حرکت است. اگر جسم در لحظه $t_1 = 5/0$ s در مکان $x_1 = 6/0$ m و در لحظه $t_2 = 2/0$ s در مکان $x_2 = 36/0$ m باشد، الف) معادله مکان - زمان جسم را بنویسید. ب) نمودار مکان - زمان جسم را رسم کنید. **۲۲.** شکل زیر نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند.



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

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



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

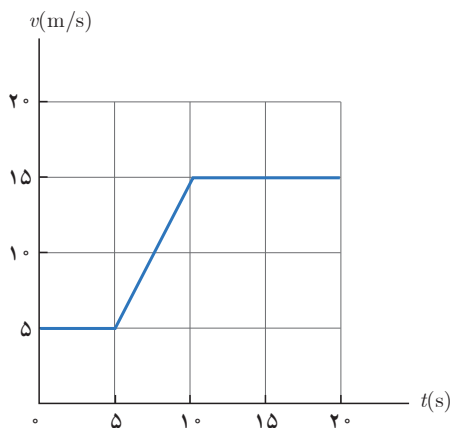
۲۰. متحرکی در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت است. در مکان $x = +10\text{ m}$ سرعت متحرک 4 m/s و در مکان $x = +19\text{ m}$ سرعت متحرک 18 km/h است.

- (الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟
 (ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از 4 m/s به سرعت 18 km/h می رسد؟
۲۱. خودرویی پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب 2 m/s^2 شروع به حرکت می کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت 36 km/h از آن سبقت می گیرد.

- (الف) در چه لحظه و در چه مکانی خودرو به کامیون می رسد؟
 (ب) نمودار مکان - زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.
 (پ) نمودار سرعت - زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

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

نشان می دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می کند.



- (الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه های $t = 3\text{ s}$ ، $t = 8\text{ s}$ و $t = 11\text{ s}$ و $t = 15\text{ s}$ به دست آورید.
 (ب) شتاب متوسط در بازه زمانی $t_1 = 0\text{ s}$ تا $t_2 = 2\text{ s}$ را به دست آورید.
 (پ) در هر یک از بازه های زمانی $t_1 = 5\text{ s}$ تا $t_2 = 11\text{ s}$ و $t_1 = 11\text{ s}$ تا $t_2 = 2\text{ s}$ خودرو چقدر جابه جا شده است؟
 (ت) سرعت متوسط خودرو در بازه های $t_1 = 5\text{ s}$ تا $t_2 = 11\text{ s}$ و $t_1 = 11\text{ s}$ تا $t_2 = 2\text{ s}$ را به دست آورید.

۱-۴ حرکت سقوط آزاد

۲۳. گلوله ای را باید از چه ارتفاعی رها کنیم تا پس از $4/0$ ثانیه به زمین برسد؟ سرعت گلوله در نیمه راه و همچنین در لحظه برخورد به زمین چقدر است؟ مقاومت هوا را نادیده بگیرید.

۲۴. (الف) گلوله A را در شرایط خلأ از ارتفاع h و بدون سرعت اولیه رها می کنیم. سه ثانیه بعد گلوله B را از ارتفاع $h/4$ و بدون سرعت اولیه رها می کنیم. نسبت سرعت گلوله A به سرعت گلوله B در لحظه رسیدن به زمین چقدر است؟

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

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

(الف) اگر سنگ در 2 ثانیه آخر حرکت خود 60 متر را طی کند، ارتفاع ساختمان چند متر است؟

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



دینامیک و حرکت دایره‌ای



امروزه تعداد زیادی ماهواره در مدارهایی به دور زمین می‌چرخند، بدون آنکه چرخش آنها به سوختی نیاز داشته باشد. این مدارها تقریباً دایره‌ای‌اند و زمین در مرکز آنها قرار دارد. آیا می‌دانید ماهواره‌ها تحت تأثیر چه نیرویی در مدار خود باقی می‌مانند و اگر این نیرو وجود نداشته باشد حرکت آنها چگونه خواهد شد؟ با مطالعه این فصل می‌توانید به این نوع پرسش‌ها پاسخ دهید و حتی می‌توانید زمان یک دور چرخش و تندی ماهواره را در یک مدار تعیین کنید.

بخش‌ها

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

در تمام فعالیت‌های روزانه با نیرو سروکار داریم. راه رفتن، باز و بسته کردن در و پنجره، نوشتن، کار با گوشی همراه، شنا کردن و دوچرخه‌سواری نمونه‌هایی از این دست هستند و همچنین حرکت قطار، هواپیما، خودرو و... بدون اعمال نیرو انجام نمی‌شوند.

در فصل اول با کمیت‌های مکان، تندی، سرعت و شتاب آشنا شدیم و حرکت یک جسم را به کمک آنها توصیف کردیم اما از اینکه تحت چه شرایطی مثلاً حرکت جسم با سرعت ثابت است یا در چه شرایطی جسم دارای حرکت با شتاب ثابت روی خط راست است یا در چه شرایطی جسم ساکن می‌ماند و... بحثی نکردیم.

وقتی جسمی را می‌کشیم یا آن را هل می‌دهیم، به آن نیرو وارد می‌کنیم. نیرو، حاصل برهم‌کنش یا اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است. نیرو کمیتی برداری است که علاوه بر اندازه، جهت نیز دارد (شکل ۱-۲). معمولاً نیرو را با \vec{F} نشان می‌دهند^۱. در رسم نیرو از یک پاره‌خط جهت‌دار با مقیاس مناسب استفاده می‌شود؛ مثلاً در شکل ۲-۲، بردار وزن دو گلدان را مشاهده می‌کنید که با مقیاس مناسب رسم شده‌اند.

نیرو را به کمک نیروسنج اندازه‌گیری می‌کنیم و یکای آن، نیوتون است که با نماد N نشان داده می‌شود. اثر نیرو بر یک جسم به شکل‌های مختلف مانند شروع به حرکت کردن، توقف، کم و زیاد شدن اندازه سرعت (تندی)، تغییر جهت سرعت و تغییر شکل آن جسم، خود را نشان می‌دهد. با توجه به آنچه در مورد سرعت فراگرفتیم، می‌توان به‌طور خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می‌تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود.

به‌طور کلی در این فصل می‌خواهیم درباره نیروها، که نقش اساسی در تغییر سرعت یک جسم یا تغییر شکل جسم دارند، قوانین حرکت و حرکت دایره‌ای بحث کنیم. در کتاب علوم نهم با مفهوم نیرو و قوانین نیوتون درباره حرکت آشنا شدیم. در اینجا ضمن مرور و یادآوری آنها، مفاهیم فراگرفته شده را گسترش می‌دهیم تا توانایی و درک شما در رابطه با مفهوم نیرو، عمق بیشتری پیدا کند و بتوانید براساس نیروهای وارد شده به یک جسم، حرکت آن را بررسی و تحلیل کنید.

۱-۲ قوانین حرکت نیوتون

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

قانون اول نیوتون: در علوم نهم دیدیم که اگر به جسمی به‌طور هم‌زمان چند نیرو اثر کند و این نیروها اثر یکدیگر را خنثی کنند، به عبارت دیگر برآیند نیروهای وارد بر جسم صفر شود، می‌گوییم نیروهای وارد بر جسم متوازن هستند.



شکل ۱-۲ هنگام وارد کردن نیرو به توپ، باید جهت و اندازه نیروی وارد بر توپ به گونه‌ای باشد که توپ به مکان مناسب و موردنظر بازیکنان برخورد کند.



شکل ۲-۲ گاهی برای سادگی فرض می‌شود که همه جرم یک جسم در یک نقطه به نام مرکز جرم جسم متمرکز شده است و به‌جای آنکه نیرو به قسمت‌های مختلف جسم وارد شود به این نقطه وارد می‌شود.

۱- F سرواژه انگلیسی Force به معنای نیرو است.

پرسش ۱-۲



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

قبل از سال ۱۶۰۰ میلادی دیدگاه رایج این بود که هر جسم در حال حرکتی برای ادامه حرکت حتماً نیاز به نیرو دارد، ولی گالیله با طراحی آزمایش‌هایی ذهنی نتیجه گرفت که در نبود نیرو، حرکت جسم متحرک ادامه می‌یابد. نیوتون نظر گالیله را به صورت یک قانون بیان کرد که به نام قانون اول نیوتون شهرت دارد: «یک جسم، حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت خود را حفظ می‌کند مگر آنکه نیروی خالصی (غیر صفر) به آن وارد شود». به عبارت دیگر وقتی نیروهای وارد بر جسمی متوازن باشند، اگر جسم ساکن باشد، همچنان ساکن باقی می‌ماند و اگر در حال حرکت باشد، سرعت جسم تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند.

پرسش ۲-۲

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

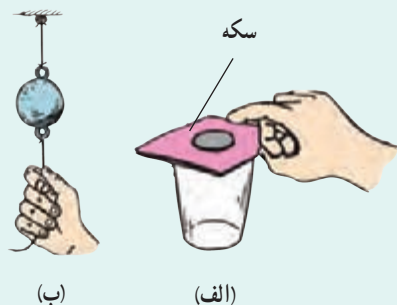
فعالیت ۱-۲

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 راننده ترمز کند و شما کمر بند خود را نبسته باشید، ممکن است به جلو پرتاب شوید (متمایل شوید)، یا اگر اتوبوس ساکن باشد و ناگهان شروع به حرکت کند، به طرف عقب به صندلی خود فشرده می‌شوید. آیا علت آن را می‌دانید؟ بر اساس قانون اول نیوتون، اگر بر جسم نیروی خالصی وارد نشود، جسم ساکن می‌ماند و یا با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. به این خاصیت اجسام که میل دارند وضعیت حرکت خود را هنگامی که نیروی خالص وارد بر آنها صفر است حفظ کنند، **لختی**^۱ گویند.

۱- Inertia

پرسش ۲-۳

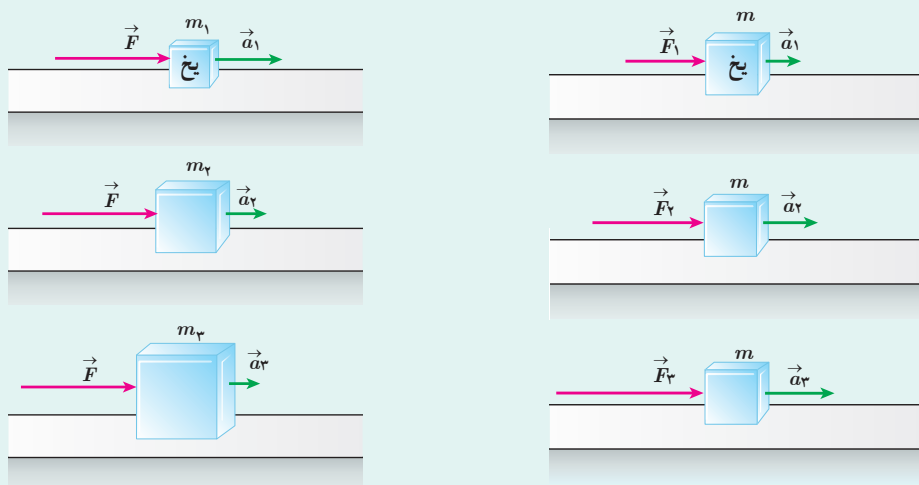


الف) در شکل الف مقوا را به سرعت می‌کشیم، برای سکه چه اتفاقی می‌افتد؟ چرا؟
 ب) در شکل ب، اگر به آرامی نیروی وارد بر گوی سنگین را زیاد کنیم کدام نخ پاره می‌شود؟ اگر ناگهان نخ را بکشیم، کدام نخ پاره می‌شود؟ علت را توضیح دهید.

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 ۲-۴

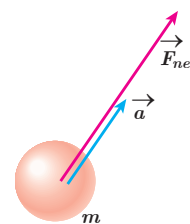
در شکل‌های زیر، قطعه یخ‌ها روی یک سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارند. تفسیر خود را از این شکل‌ها بیان کنید.



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 ۳-۱۲ شتاب جسم (\vec{a}) در جهت نیروی خالص وارد بر آن (\vec{F}_{net}) است.

و یا :

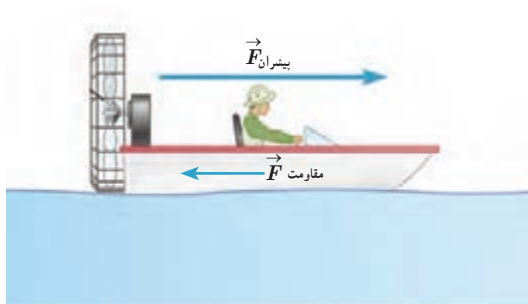
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m}$$

$$\vec{F}_{net} = m \vec{a} \quad \text{(قانون دوم نیوتون)} \quad (۱-۲)$$

یکای SI نیرو، نیوتون است. یک نیوتون برابر با مقدار نیروی خالص^۱ است که به جسمی به جرم یک کیلوگرم، شتابی برابر یک متر بر مربع ثانیه می‌دهد.

توجه: در رابطه ۱-۲، ma نیرو نیست. تمام نیروهای وارد بر یک جسم با هم جمع برداری می‌شوند تا نیروی خالص (\vec{F}_{net}) وارد بر جسم به دست آید و آن را در سمت چپ معادله قرار می‌دهند. این نیروی خالص مساوی با حاصل ضرب جرم در شتاب (ma) است.

مثال ۱-۲



نیروی موتور یک قایق موتوری که جرم آن با سرنشیش 400 kg است، به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در بازه زمانی معینی، همواره نیروی افقی خالص 800 N به طرف جلو بر قایق و سرنشین وارد می‌شود. الف) شتاب این قایق چقدر و در چه جهتی است؟ ب) اگر نیروی پیشران در یک لحظه 1300 N باشد، نیروی مقاومت هوا و آب در آن لحظه چقدر است؟

پ) چقدر طول می‌کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به 15 m/s برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه‌جا می‌شود؟

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

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

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

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

$$F_{net} = F_{پیشران} - F_{مقاومت} \Rightarrow 800 \text{ N} = 1300 \text{ N} - F_{مقاومت}$$

$$F_{مقاومت} = 500 \text{ N}$$

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

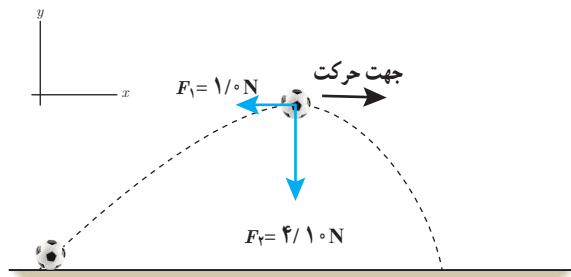
$$v = at + v_0 \Rightarrow 15 \text{ m/s} = (2 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 7.5 \text{ s}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(15 \text{ m/s})^2 - (0 \text{ m/s})^2}{2(2 \text{ m/s}^2)} = 56.25 \text{ m}$$

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

۱- واژه net در زبان انگلیسی به معنای خالص است.

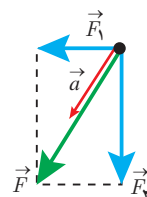
مثال ۲-۲



شکل روبه‌رو نیروهای وارد بر توپ فوتبالی به جرم 420 g را در بالاترین نقطه مسیرش نشان می‌دهد که در آن نیروی مقاومت هوا \vec{F}_2 وزن توپ است. جهت و بزرگی شتاب توپ در این نقطه را تعیین کنید.^۱ از نیروهای دیگر وارد بر توپ صرف‌نظر می‌شود.

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

$$\begin{aligned}\vec{F}_2 &= (-4/10\text{ N})\vec{j} \text{ و } \vec{F}_1 = (-1/10\text{ N})\vec{i} \\ \vec{F}_{\text{net}} &= \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = (-1/10\text{ N})\vec{i} + (-4/10\text{ N})\vec{j} \\ \vec{a} &= \frac{\vec{F}_{\text{net}}}{m} = \frac{(-1/10\text{ N})\vec{i} + (-4/10\text{ N})\vec{j}}{420 \times 10^{-3}\text{ kg}} = (-2/4\text{ N/kg})\vec{i} + (-9/8\text{ N/kg})\vec{j} \\ a &= \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(-2/4\text{ N/kg})^2 + (-9/8\text{ N/kg})^2} = 10\text{ N/kg} = 10\text{ m/s}^2\end{aligned}$$



قانون سوم نیوتون: وقتی فنی را می‌کشید، فنر نیز شما را می‌کشد. در برخورد راکت با توپ تنیس، راکت به توپ نیرو وارد می‌کند و توپ نیز به راکت نیرو وارد می‌کند. اگر شما دیوار را هل دهید. دیوار نیز شما را هل می‌دهد. دو بار الکتریکی بدون آنکه با هم تماس داشته باشند به هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. همچنین دو قطب آهن‌ربا بدون تماس با یکدیگر به هم نیروی مغناطیسی وارد می‌کنند (شکل ۲-۴). 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** بنامیم، نیروی دیگر **واکنش** نامیده می‌شود. قانون سوم نیوتون رابطه کمی بین نیروهای کنش و واکنش را به صورت زیر بیان می‌کند:

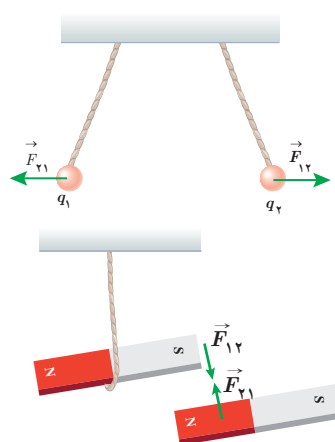
هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم نیز به جسم اول نیرویی هم‌اندازه و هم‌راستا اما در خلاف جهت وارد می‌کند.

بر اساس قانون سوم نیوتون، در تمام مثال‌های بالا، هر دو نیرو هم‌اندازه و هم‌راستا ولی در خلاف جهت یکدیگرند و می‌توانیم بنویسیم:

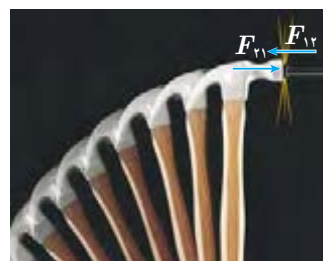
$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} \quad (\text{قانون سوم نیوتون}) \quad (2-2)$$

توجه داریم ممکن است نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی شود؛ مثلاً هنگام کوبیدن میخ در قطعه‌ای چوب، چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و سبب فرورفتن میخ در چوب می‌شود. نیروی وارد از میخ به چکش حرکت چکش را کند و متوقف می‌کند (شکل ۲-۵).

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



شکل ۲-۴ نیروهای کنش و واکنش هم‌اندازه، هم‌راستا و در خلاف جهت یکدیگرند.



شکل ۲-۵ چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و میخ به چکش. این نیروها هم‌اندازه، هم‌راستا و در خلاف جهت یکدیگرند.

۱- بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا یا عمود بر هم نیستند خارج از برنامه دسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

مثال ۳-۲



دو شخص به جرم‌های $m_1 = 75 \text{ kg}$ و $m_2 = 50 \text{ kg}$ با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روبه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی 100 N شخص دوم را به طرف راست هل می‌دهد.

الف) شتابی که شخص دوم می‌گیرد چقدر است؟

ب) شتابی که شخص اول می‌گیرد چقدر است؟

پاسخ: از قانون سوم نیوتون می‌دانیم نیرویی که شخص اول به دوم وارد می‌کند

(\vec{F}_{12}) هم‌اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند

(\vec{F}_{21}) . با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

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

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{21}}{m_2} = \frac{(100 \text{ N}) \vec{i}}{50 \text{ kg}} = (2 \text{ N/kg}) \vec{i} = (2 \text{ m/s}^2) \vec{i}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{12}}{m_1} = \frac{-(100 \text{ N}) \vec{i}}{75 \text{ kg}} = -(1.33 \text{ N/kg}) \vec{i} = -(1.33 \text{ m/s}^2) \vec{i}$$

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

پرسش ۵-۲

شخصی در حال هل دادن جعبه‌ای سنگین روی سطح افقی است و این جعبه در جهت این نیرو حرکت می‌کند. با توجه به آنکه نیرویی

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

۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

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

وزن: همان‌طور که در علوم هفتم خواندیم وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲-۶). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف زمین شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود (حرکت سقوط آزاد)، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم:

$$\text{شتاب} \times \text{جرم جسم} = \text{وزن جسم}$$

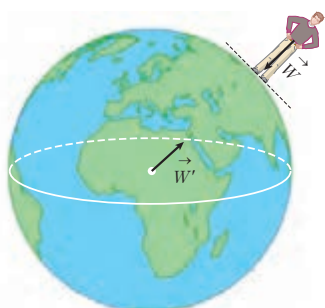
اگر جرم جسم را با m ، شتاب گرانشی را با g و وزن را با \vec{W} نشان دهیم، رابطه بالا به شکل

زیر درمی‌آید:

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

(وزن جسم)

(۳-۲)



شکل ۲-۶ زمین بر جسم نیروی گرانشی

(\vec{W}) وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی (\vec{W}') وارد می‌کند.

توجه داریم که جهت وزن و شتاب گرانشی همواره به طرف زمین (مرکز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است، اما وزن آن طبق رابطه ۲-۳ به مقدار \vec{g} در آن مکان بستگی دارد. مثلاً اگر جرم شخصی 60 kg باشد، در محلی که $g = 9/80\text{ N/kg}$ است، وزن آن 588 N و در بالونی که در ارتفاع زیاد حرکت می‌کند و در آن ارتفاع $g = 9/76\text{ N/kg}$ است وزن آن تقریباً 586 N است. شتاب جاذبه در سطح زمین تقریباً $9/8\text{ N/kg}$ است.

تمرین ۱-۲

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. ($g_{\text{زمین}} = 9/8\text{ N/kg}$, $g_{\text{ماه}} = 1/6\text{ N/kg}$, $g_{\text{مریخ}} = 3/7\text{ N/kg}$)

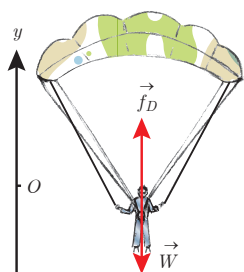
توجه کنید، حتی اگر جسم در حال سقوط آزاد نباشد باز هم نیروی وزن (\vec{W}) بر آن وارد می‌شود. مثلاً بر یک چتر باز قبل از پرش، در حال سقوط و حتی هنگام رسیدن به زمین، نیروی وزن وارد شده و از رابطه ۲-۳ به دست می‌آید.

نیروی مقاومت شاره: وقتی جسمی مانند یک توپ را از بالای ساختمانی رها می‌کنیم، علاوه بر وزن جسم، نیروی دیگری از طرف هوا به جسم در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود. به طور کلی وقتی جسمی در یک شاره (مایع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شاره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن **نیروی مقاومت شاره** می‌گویند^۱ و معمولاً آن را با \vec{f}_D نشان می‌دهند^۲. نیروی مقاومت شاره به بزرگی جسم، تندی آن و ... بستگی دارد. هرچه تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شاره بیشتر خواهد شد. همان طور که می‌دانیم اگر جسم در هوا حرکت کند، به این نیرو، **نیروی مقاومت هوا** می‌گویند.

مثال ۴-۲

چتربازی به جرم 60 kg مدتی پس از یک پرش آزاد، چترش را باز می‌کند. ناگهان نیروی مقاومت هوا به 1140 N افزایش می‌یابد. شتاب چتر باز 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 محور مختصات را رو به بالا انتخاب کنیم، برای محاسبه شتاب چتر باز در این حالت می‌توانیم بنویسیم:



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

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

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

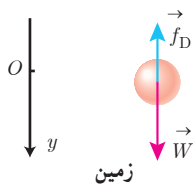
کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن هم‌اندازه شده و نیروهای وارد بر چتر باز متوازن شوند. پس از این چتر باز با تندی ثابتی موسوم به **تندی حدی**، به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک چتر باز نوعی حدود 5 m/s و برای قطرات باران حدود 7 m/s است.

۱- توجه کنید، نیروی مقاومت شاره با نیروی شناوری که از سال دهم با آن آشنا هستید، متفاوت است.

۲- D سرواژه Drag به معنای پسا (پس کشی) است.

مثال ۵-۲

دو گوی هم‌اندازه را که جرم یکی دو برابر دیگری است ($m_2 = 2m_1$) از ارتفاع نسبتاً زیاد h رها می‌کنیم. به گونه‌ای که گوی‌ها در مسیر سقوط به تندی حدی می‌رسند و سپس با زمین برخورد می‌کنند. با فرض اینکه نیروی مقاومت هوا در حرکت گوی‌ها، در تندی‌های یکسان، برابر است؛ الف) قبل از رسیدن به تندی حدی و در تندی‌های یکسان، شتاب گوی‌ها را مقایسه کنید. ب) کدام گوی با تندی بیشتر با زمین برخورد می‌کند؟



پاسخ: الف) بر این گوی‌ها، دو نیروی وزن و مقاومت هوا وارد می‌شود. طبق قانون دوم نیوتون، نیروی خالص 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 $a_2 > a_1$ است. ب) در حالتی که گوی‌ها به تندی حدی می‌رسند:

$$mg - f_D = ma \text{ و } a = 0 \Rightarrow f_D = mg$$

$$m_2 > m_1 \Rightarrow f_{D_2} > f_{D_1}$$

می‌دانیم هر چه تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شاره نیز بیشتر است. بنابراین

$$v_2 > v_1$$

یعنی تندی برخورد گوی سنگین‌تر، بیشتر از گوی سبک‌تر است.

تمرین ۲-۲

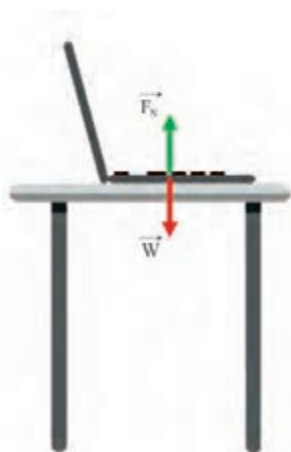
اگر در مثال ۵-۲ از مقاومت هوا صرف نظر کنیم، سرعت برخورد گوی‌ها با زمین را با هم مقایسه کنید.

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

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

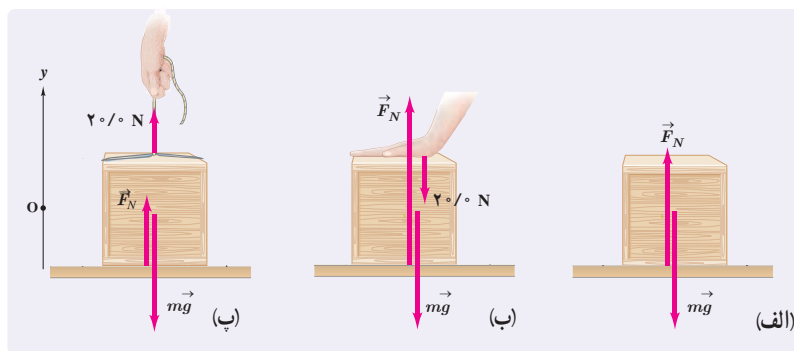
$$\vec{F}_{net} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N + \vec{W} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N = -\vec{W} \Rightarrow F_N = W$$

نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح اسفنجی یا یک تشک قرار دهیم تغییر شکل اسفنج یا تشک به خوبی دیده می‌شود. حتی یک زمین به ظاهر 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.



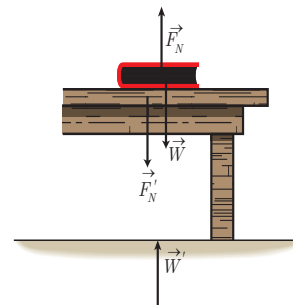
شکل ۷-۲ نیروهای وارد بر لپ‌تاپ متوازن‌اند.

تمرین ۲-۲



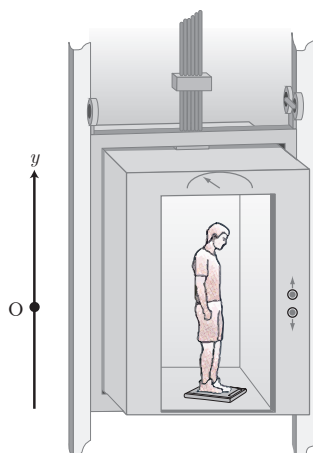
همانند شکل، جعبه‌ای به جرم $4/0 \text{ kg}$ روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده به دست آورید.

نیروی عمودی تکیه‌گاه از طرف سطح به جسمی که روی آن قرار دارد وارد می‌شود، بنابراین واکنش این نیرو F'_N به صورت عمودی و در خلاف جهت F_N از طرف جسم به سطح وارد می‌شود (شکل ۲-۸). همچنین واکنش نیروی وزن (\vec{W}') نیرویی است که از طرف جسم به زمین و در خلاف جهت \vec{W} وارد می‌شود.



شکل ۲-۸ بر جسم نیروی عمودی سطح (F_N) و وزن (\vec{W}) وارد می‌شود.

مثال ۲-۶



شخصی درون آسانسوری ساکن، روی یک ترازوی فنری ایستاده است. در این حالت ترازو عدد 588 N را نشان می‌دهد. الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ ب) وقتی آسانسور شتاب رو به بالای $2/0 \text{ m/s}^2$ دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ پ) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین $2/0 \text{ m/s}^2$ دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ت) اگر کابل آسانسور پاره شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ($g = 9/80 \text{ N/kg}$)

پاسخ: بر شخص نیروی وزن به طرف پایین و نیروی عمودی سطح به طرف بالا وارد می‌شود. جهت مثبت محور y را رو به بالا انتخاب می‌کنیم و از قانون دوم نیوتون برای پاسخ به قسمت‌های مختلف استفاده می‌کنیم.

الف) در حالتی که آسانسور ساکن است می‌توانیم بنویسیم:

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

توجه داریم نیروسنج نیروی وارد بر خودش یعنی F'_N که واکنش F_N است را نشان می‌دهد. پس نیروسنج اندازه F_N را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$F'_N = 588 \text{ N} \Rightarrow F_N = F'_N = 588 \text{ N}, F_N = W = mg \Rightarrow 588 \text{ N} = m(9/80 \text{ N/kg}) \Rightarrow m = 60/0 \text{ kg}$$

ب)

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = (60/0 \text{ kg})(9/80 \text{ N/kg}) + (60/0 \text{ kg})(2/0 \text{ N/kg})$$

$$F_N = 708 \text{ N}$$

یعنی در این حالت، ترازو عددی بزرگ‌تر از اندازه وزن را نشان می‌دهد.

(ب)

$$F_N - W = ma \Rightarrow F_N - mg = ma \Rightarrow F_N = mg + ma = m(g+a)$$

جهت شتاب رو به پایین است.

$$F_N = (60 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} - 2 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 468 \text{ N}$$

یعنی در این حالت ترازو، عددی کوچک‌تر از اندازه وزن را نشان می‌دهد.

ن وقتی کابل آسانسور پاره شود، آسانسور سقوط آزاد می‌کند و شتاب آن برابر g و رو به پایین است.

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = m(g-g) = 0$$

یعنی در سقوط آزاد، نیروی عمودی سطح صفر است. به عبارت دیگر ترازو عدد صفر را نشان می‌دهد.

پوشش ۶-۲

در مثال ۶-۲، در هر یک از حالت‌های زیر، عددی را که ترازوی فنری نشان می‌دهد با وزن شخص مقایسه کنید.

(الف) آسانسور به طرف بالا شروع به حرکت کند.

(ب) آسانسور به طرف پایین شروع به حرکت کند.

(پ) آسانسور در حالی که به طرف بالا حرکت می‌کند، متوقف شود.

(ت) آسانسور در حالی که به طرف پایین حرکت می‌کند، متوقف شود.

نیروی اصطکاک: وقتی تلاش می‌کنیم جسمی را روی سطحی به حرکت درآوریم، چه جسم حرکت کند و چه ساکن بماند، با مقاومتی روبه‌رو می‌شویم که به آن **نیروی اصطکاک** گویند.

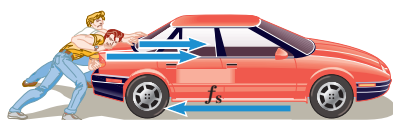
اگر یک خودروی ساکن بر سطح افقی خیابان را (که در وضعیت پارک است) هل دهید، و نتوانید آن را به حرکت درآورید، در این حالت نیرویی در خلاف جهت هل دادن شما بین لاستیک‌ها و سطح به وجود آمده است که با حرکت خودرو مخالفت می‌کند (شکل ۹-۲). این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک ایستایی** است و آن را با f_s نشان می‌دهند. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید

که راننده‌اش ترمز کرده و چرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. در این حالت نیز نیرویی در خلاف جهت حرکت از طرف سطح بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک جنبشی** است و آن را با f_k نشان می‌دهند.

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 زیره 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 ۱۰-۲). حتی سطوحی که بسیار هموار به نظر می‌آیند، ناهمواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارند که سبب اصطکاک می‌شوند.

نیروی اصطکاک عمدتاً به عنوان نیروی اتلافی شناخته می‌شود، با وجود این در زندگی روزمره لازم است. نگه داشتن یک قلم در دست، نوشتن، راندن خودرو، قدم زدن و دویدن، ترمز کردن و... بدون اصطکاک ممکن نیست. بدون اصطکاک حتی ایستادن ناممکن است، زیرا کمترین جابه‌جایی سبب لغزیدن و افتادن می‌شود.



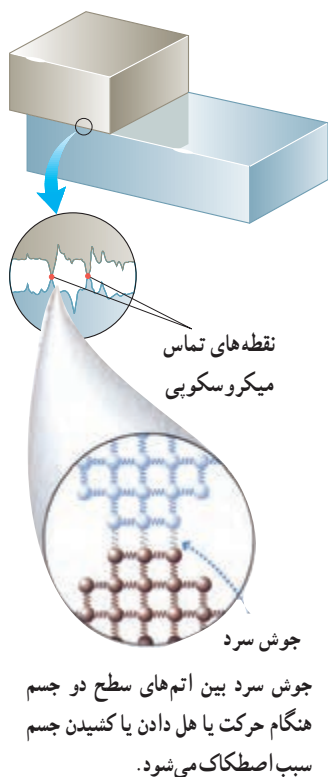
شکل ۹-۲ نیروی اصطکاک ایستایی در خلاف جهت هل دادن به وجود آمده است.



نقطه‌های تماس

شکل ۱۰-۲

الف) بر اساس قانون سوم نیوتون و آنچه از اصطکاک آموختید، توضیح دهید راه رفتن با شروع از حالت سکون چگونه انجام می‌شود؟
 ب) چرا راه رفتن روی یک سطح سُر مانند سطح یخ به‌سختی ممکن است؟



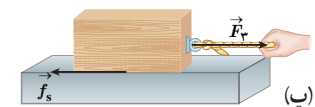
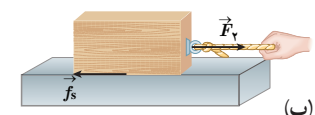
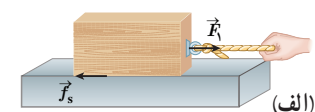
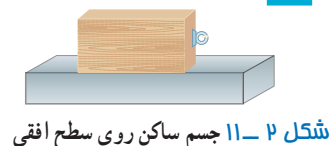
دیدگاه میکروسکوپی: در واقع، نیروی اصطکاک و نیروی عمودی سطح، جمع برداری نیروهای بی‌شماری است که طبیعت الکتریکی دارند و بین اتم‌های سطح یک جسم و اتم‌های سطح جسم دیگر عمل می‌کنند. اگر دو سطح فلزی کاملاً صیقل داده شده و تمیز روی هم گذاشته شوند، نمی‌توان به راحتی آنها را روی هم لغزاند. چون سطح آنها بسیار صاف است، بسیاری از اتم‌های یک سطح در تماس با بسیاری از اتم‌های سطح دیگراند و مطابق شکل انگار دو سطح با هم جوش خورده‌اند که اصطلاحاً به آن جوش سرد گویند. وقتی دو سطح معمولی روی هم قرار داده شوند، برخی نقاط با هم تماس پیدا می‌کنند. سطح میکروسکوپی تماس بسیار کوچک‌تر از سطح ماکروسکوپی ظاهری تماس است (حدود 10^4 بار کوچک‌تر). با وجود این بسیاری از نقاط تماس با یکدیگر جوش می‌خورند. این جوش‌ها وقتی یک نیرو بخواهد دو سطح را روی هم بلغزند، اصطکاک ایستایی ایجاد می‌کنند. اگر نیروی وارد شده برای کشیدن یک سطح روی دیگری به حد کافی بزرگ باشد، نخست جوش‌ها جدا می‌شوند (در لحظه شروع به حرکت) و پس از آن با شروع حرکت، جوش‌ها به‌طور پیوسته مجدداً تشکیل و سپس پاره می‌شوند.

در ادامه نیروی اصطکاک را در دو حالت بررسی می‌کنیم:

الف) **اصطکاک ایستایی**: جسمی مطابق شکل ۲-۱۱ روی یک سطح افقی ساکن است. به این جسم نیروی وزن (\vec{W}) و نیروی عمودی سطح (\vec{F}_N) در راستای قائم وارد می‌شود. در ابتدا نیروی افقی \vec{F}_1 را به جسم وارد می‌کنیم به‌طوری که جسم ساکن بماند (شکل ۲-۱۲ الف)، چون جسم ساکن است بنا به قانون دوم نیوتون باید نیروی خالص وارد بر آن صفر باشد. بنابراین در راستای افقی داریم:

$$F_1 - f_s = ma = 0 \Rightarrow f_s = F_1$$

اکنون فرض کنید اندازه نیروی \vec{F}_1 را افزایش داده و به اندازه \vec{F}_2 رسانده‌ایم (شکل ۲-۱۲ ب). اگر جسم همچنان ساکن بماند، با استدلالی شبیه قبل نتیجه می‌گیریم که نیروی اصطکاک ایستایی افزایش یافته و برابر اندازه \vec{F}_2 شده است. بنابراین با افزایش نیروی افقی، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش این نیرو به حالتی می‌رسیم که اگر اندازه آن برابر \vec{F}_3 شود، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد (شکل ۲-۱۲ پ). به نیروی اصطکاک در این حالت **نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه** می‌گوییم. بزرگی نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه را با $f_{s,max}$ نشان می‌دهیم ($f_{s,max} = F_3$). آزمایش نشان می‌دهد که بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی با اندازه نیروی عمودی سطح (F_N) متناسب است.



شکل ۲-۱۲ با افزایش نیروی \vec{F} ، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینه معین می‌رسد.

$$f_{s,max} = \mu_s F_N \quad \text{(نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه)} \quad (۴-۲)$$

در این رابطه μ_s ضریب اصطکاک ایستایی نام دارد. تجربه و آزمایش نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و... بستگی دارد.

توجه کنید که رابطه ۴-۲ اندازه نیروی اصطکاک ایستایی را فقط در آستانه حرکت می‌دهد. در حالت کلی نیروی اصطکاک ایستایی کوچک‌تر و یا مساوی $f_{s,max}$ است:

$$f_s \leq \mu_s F_N \quad (۵-۲)$$

تمرین ۴-۲

اگر در شکل ۲-۱۲، جرم جسم $۴/۰ \text{ kg}$ و بزرگی نیروها $F_1 = ۴/۰ \text{ N}$ ، $F_2 = ۸/۰ \text{ N}$ و $F_3 = ۱۶/۰ \text{ N}$ باشد، الف) بزرگی نیروهای اصطکاک ایستایی در هر حالت چقدر است؟ ب) ضریب اصطکاک ایستایی را پیدا کنید.

آزمایش ۲-۱: اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ایستایی بین دو جسم



وسایل لازم: نیروسنج، 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- نیروسنج را مانند شکل به مکعب چوبی وصل کنید و سر دیگر نیروسنج را با دست بگیرید و به‌طور افقی بکشید.

۳- نیروی دستتان را به آرامی افزایش دهید تا جایی که مکعب چوبی در آستانه لغزیدن قرار گیرد. در این حالت عددی را که نیروسنج نشان می‌دهد، در جدول یادداشت کنید (برای اینکه دقت شما افزایش یابد لازم است آزمایش را چند بار تکرار کنید).

۴- اکنون مکعب چوبی را از طرف وجه کوچک‌تر روی سطح قرار دهید و مراحل ۲ و ۳ را تکرار کنید.

۵- با اندازه‌گیری جرم مکعب چوبی و استفاده از رابطه ۴-۲ مقدار μ_s را در هر آزمایش محاسبه و در جدول یادداشت کنید.

وزن قطعه:		مساحت سطح تماس قطعه با میز	شماره آزمایش
μ_s	عددی که نیروسنج نشان می‌دهد ($f_{s,max}$)		

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

فعالیت ۲-۲

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



شکل ۱۳-۲ بر چوب‌های اسکی نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود.

(ب) نیروی اصطکاک جنبشی: وقتی جسمی روی سطحی می‌لغزد از طرف سطح بر جسم، نیروی اصطکاک جنبشی وارد می‌شود که موازی با سطح و در خلاف جهت لغزش جسم است. آزمایش نشان می‌دهد که اندازه نیروی اصطکاک جنبشی متناسب با اندازه نیروی عمودی سطح است.

$$f_k = \mu_k F_N \quad (\text{نیروی اصطکاک جنبشی}) \quad (۶-۲)$$

در این رابطه μ_k ضریب اصطکاک جنبشی نام دارد.

تجربه و آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک جنبشی مانند ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و ... بستگی دارد. معمولاً ضریب اصطکاک جنبشی میان دو سطح، کمتر از ضریب اصطکاک ایستایی میان آن دو سطح است؛ یعنی $\mu_k < \mu_s$. جدول ۱-۲ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲

جنس دو سطح تماس	μ_k	μ_s
فولاد بر فولاد	۰/۵۷	۰/۷۴
فولاد بر آلومینیوم	۰/۴۷	۰/۶۱
فولاد بر مس	۰/۳۶	۰/۵۳
مس بر چدن	۰/۲۹	۱/۰۵
مس بر شیشه	۰/۵۳	۰/۶۸
شیشه بر شیشه	۰/۴۰	۰/۹۴
لاستیک بر بتن تر	۰/۲۵	۰/۳۰
لاستیک بر بتن خشک	۰/۸	۱/۰
تفلون بر تفلون	۰/۰۴	۰/۰۴

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 اندازه بگیرید و با استفاده از آن μ_k را به دست آورید.
(ب) بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

مثال ۲-۲



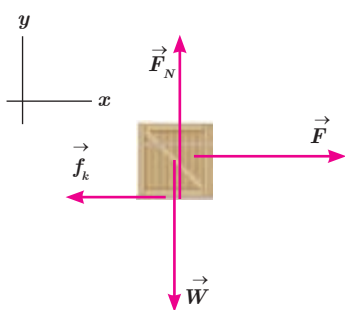
شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبه ۷۵/۰ کیلوگرمی با نیروی 309 N روی سطح افقی است. نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند افقی و جعبه در حال حرکت است. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جعبه $0/400$ باشد،

(الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد به جعبه چقدر است؟

(ب) شتاب جعبه در این حالت چقدر است؟ ($g = 9/80\text{ N/kg}$)

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

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W = mg = (75/0\text{ kg})(9/80\text{ N/kg}) = 735\text{ N}$$



با استفاده از رابطه ۲-۶ داریم :

$$f_k = \mu_k F_N \Rightarrow f_k = 0.40 \times 735 \text{ N} \Rightarrow f_k = 294 \text{ N}$$

(ب) برآیند نیروهای افقی وارد بر جسم برابر با حاصل ضرب جرم در شتاب است.

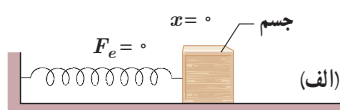
$$F - f_k = ma \Rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} \Rightarrow a = \frac{309 \text{ N} - 294 \text{ N}}{75 \text{ kg}} = 0.2 \text{ m/s}^2$$

تمرین ۲-۵

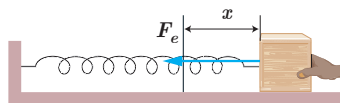
در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین 0.60 و جسم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای به حرکت درآوردن جعبه چقدر است؟



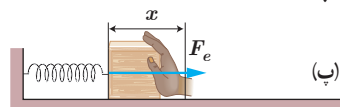
شکل ۲-۱۴ فنرهای به کار رفته در چرخ‌های خودرو



(الف)

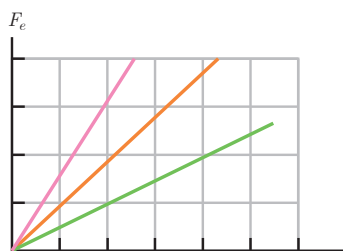


(ب)



(پ)

شکل ۲-۱۵ (الف) فنر طول عادی دارد و جسم در نقطه تعادل است، (ب) فنر کشیده شده است و نیروی کشسانی رو به نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند، و (پ) فنر فشرده شده است و نیروی کشسانی رو به نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند.



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

نیروی کشسانی فنر : همان‌طور که در فیزیک ۱ دیدیم فنرها اجزای مهمی در فناوری هستند و به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند (شکل ۲-۱۴). همچنین با تأثیر نیرو بر یک فنر 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 نه فشرده و نه کشیده شده است. اگر فنر را به اندازه x بکشیم یا فشرده کنیم (شکل ۲-۱۵ ب و پ)، فنر نیرویی به طرف نقطه تعادل به جسم وارد می‌کند. تجربه نشان می‌دهد هر چه فنر را بیشتر بکشیم یا فشرده کنیم (در محدوده معینی از تغییر طول فنر)، نیروی کشسانی فنر نیز بیشتر می‌شود.

برای بیشتر فنرها با تقریب قابل قبولی، اندازه نیروی کشسانی فنر با اندازه تغییر طول آن (x) رابطه مستقیم دارد :

$$F_e = kx \quad (\text{اندازه نیروی کشسانی فنر}) \quad (2-7)$$

ضریب k در رابطه ۲-۷، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است و به اندازه، شکل و ساختار ماده‌ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد. در رابطه ۲-۷ نیرو بر حسب نیوتون (N)، x بر حسب متر (m) و k بر حسب نیوتون بر متر (N/m) است. معادله ۲-۷ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلیسی (۱۷۰۳-۱۶۳۵ م.) که این رابطه را کشف کرد، **قانون هوک** می‌نامند. برای یک فنر انعطاف‌پذیر، 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.

فعالیت ۲-۴

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

۱- زیرنویس e در نماد نیروی کشسانی فنر (F_e) سرواژه elastic به معنی کشسان است.

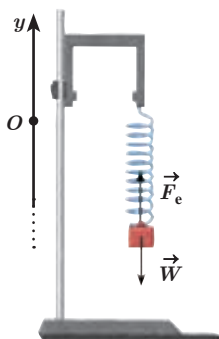
مثال ۸-۲

فتری به طول $L_0 = 10 \text{ cm}$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنه 200 گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L = 12 \text{ cm}$ می‌رسد.

الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟

ب) اگر وزنه‌ای 300 گرمی را به فنر وصل کنیم، پس از رسیدن به تعادل طول فنر چند سانتی‌متر می‌شود؟

پاسخ: الف) محور مختصات را همانند شکل انتخاب می‌کنیم و نیروهای وارد بر جسم را رسم و با استفاده از قانون دوم نیوتون مسئله را حل می‌کنیم.



$$F_e - W = ma \Rightarrow F_e - W = 0 \text{ و } F_e = kx \Rightarrow kx = mg$$

$$k(12 \times 10^{-2} \text{ m} - 10 \times 10^{-2} \text{ m}) = (200 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})$$

$$k = 98 \text{ N/m}$$

ب)

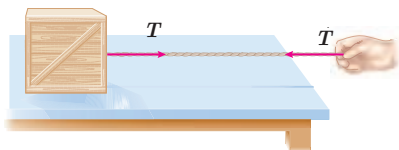
$$kx = mg \Rightarrow (98 \text{ N/m})x = (300 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) \Rightarrow$$

$$x = 0.30 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

$$x = L - L_0 \Rightarrow 30 \text{ cm} = L - 10 \text{ cm} \Rightarrow L = 40 \text{ cm}$$

نیروی کشش طناب: وقتی طناب (کابل، ریسمان و...) متصل به جسمی را مانند شکل ۱۷-۲ می‌کشیم، طناب جسم را با نیرویی می‌کشد که جهت آن از جسم به سمت بیرون و در راستای طناب است. چون در این حالت طناب تحت کشش قرار دارد، به این نیرو، **نیروی کشش طناب** گفته می‌شود و آن را با \vec{T} نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل می‌بینید طناب دست را نیز با نیروی T می‌کشد. بزرگی نیروی کشش طناب برابر با بزرگی نیروی \vec{T} وارد بر جسم است. مثلاً اگر بزرگی نیروی وارد بر جسم از طرف طناب 60 N باشد، کشش طناب نیز 60 N است ($T = 60 \text{ N}$). در این کتاب از جرم طناب و همچنین از کش آمدن آن صرف نظر می‌شود. بنابراین طناب فقط به‌عنوان رابط بین دو جسم عمل می‌کند و هر دو جسم (دست و جعبه) را با بزرگی نیروی یکسان T می‌کشد، حتی اگر این دو جسم و طناب شتابدار باشند.

شکل ۱۷-۲ طناب جسم را با نیروی کشش \vec{T} می‌کشد.



توجه: در حل مسئله‌های دینامیک به کمک

قانون‌های نیوتون، معمولاً گام‌های مشخصی طی می‌شود. این گام‌ها که در حل مسائل می‌توان استفاده کرد، عبارت‌اند از:

۱- با مشخص کردن جسم مورد نظر، شکل ساده‌ای از آن را رسم و دستگاه محورهایی مختصات را مشخص می‌کنیم.

۲- نیروهای وارد بر جسم از طرف اجسام دیگر را مشخص و رسم می‌کنیم (در این کتاب، این نیروها فقط در راستاهای افقی و قائم هستند و در جایی نیاز به تجزیه نیروها پیدا نمی‌کنیم).

۳- در صورت لزوم نیروهایی مانند وزن، اصطکاک، کشسانی فنر، کشش نخ و...

را محاسبه می‌کنیم.

۴- قانون دوم نیوتون را بنا به نیاز در راستای قائم و افقی به کار می‌بریم. در این کتاب فقط به بررسی مسئله‌های تک‌جسمی می‌پردازیم.

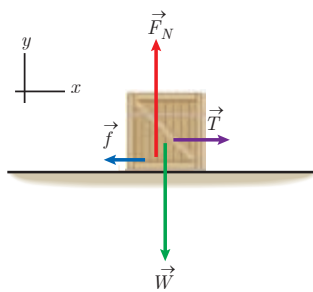
مثال ۹-۲

در شکل روبه‌رو، کارگری جعبه ساکنی را با طنابی افقی با نیروی ثابت افقی 310 N می‌کشد. اگر جرم جعبه 10 kg و ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی

بین جعبه و سطح به ترتیب 0.30 و 0.25 باشد،

الف) آیا جعبه شروع به حرکت می‌کند؟





ب) اگر جعبه حرکت کند، شتاب حرکت آن را حساب کنید.

پ) سرعت جعبه را $6/^\circ \text{s}$ پس از حرکت به دست آورید. ($g = 9/8^\circ \text{m/s}^2$)

پاسخ: الف) شکل ساده‌ای از جسم مورد نظر (جعبه) رسم و نیروهای وارد بر آن را مشخص می‌کنیم. چون جعبه در راستای قائم حرکت ندارد، می‌توانیم بنویسیم:

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W \Rightarrow F_N = mg = (1^\circ \text{kg})(9/8^\circ \text{N/kg}) = 9/8^\circ \text{N}$$

برای اینکه جسم شروع به حرکت کند، باید $T > f_{s,\max}$ باشد. پس ابتدا $f_{s,\max}$ را از معادله

۴-۲ به دست می‌آوریم:

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N = (0/3^\circ)(9/8^\circ \text{N}) = 2/9/4^\circ \text{N}$$

با توجه به اینکه $T = 3/1^\circ \text{N} > 2/9/4^\circ \text{N}$ است، جعبه شروع به حرکت می‌کند.

ب) نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت بر جعبه اثر می‌کند و برابر است با:

$$f_k = \mu_k F_N = (0/25^\circ)(9/8^\circ \text{N}) = 2/4/5^\circ \text{N}$$

$$T - f_k = ma \Rightarrow 3/1^\circ \text{N} - 2/4/5^\circ \text{N} = (1^\circ \text{kg})a \Rightarrow a = 0/65^\circ \text{m/s}^2$$

پ) چون شتاب جعبه ثابت است، از رابطه سرعت - زمان در حرکت با شتاب ثابت روی مسیر مستقیم استفاده می‌کنیم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow v = (0/65^\circ \text{m/s}^2)(6/^\circ \text{s}) + (0/^\circ \text{m/s}) \Rightarrow v = 3/9^\circ \text{m/s}$$

سرعت نیز در جهت محور x است.

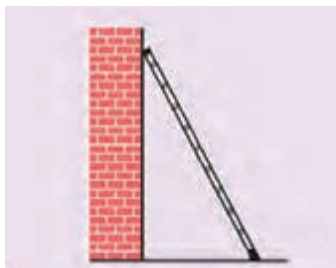
تمرین ۲-۶



کارگری یک سطل محتوی مصالح به جرم $16/^\circ \text{kg}$ را با طناب سبکی به طرف بالا می‌کشد.

اگر شتاب رو به بالای سطل $1/2^\circ \text{m/s}^2$ باشد، نیروی کشش طناب چقدر است؟ ($g = 9/8^\circ \text{m/s}^2$)

مثال ۲-۱۰



در شکل روبه‌رو نردبانی به جرم $20/^\circ \text{kg}$ به دیوار قائم بدون اصطکاک تکیه داده شده است.

ضریب اصطکاک ایستایی بین زمین و پای نردبان $0/46^\circ$ است. در آستانه سُرخوردن نردبان،

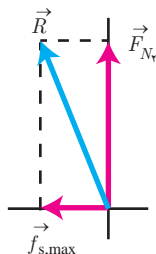
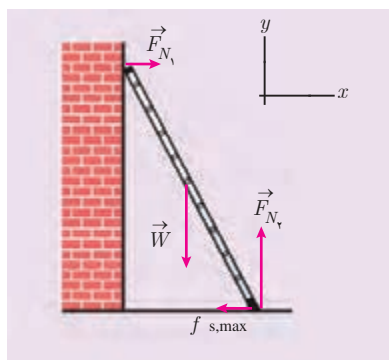
الف) سطح زمین به نردبان چه نیرویی وارد می‌کند؟

ب) چه نیرویی از دیوار به نردبان وارد می‌شود؟

پاسخ: الف) نخست نیروهای وارد بر نردبان را رسم می‌کنیم که عبارت‌اند از:

نیروی عمودی سطح دیوار (\vec{F}_N)، نیروی وزن (\vec{W})، نیروی عمودی سطح زمین (\vec{F}_N)

و نیروی اصطکاک ایستایی بین زمین و نردبان ($f_{s,\max}$).



یک دستگاه مختصات انتخاب می‌کنیم.

در آستانه حرکت، نردبان همچنان در حال تعادل است. بنابراین نیروی خالص در راستای قائم و افقی صفر است.

$$F_{N_y} - W = 0 \Rightarrow F_{N_y} = W = mg = (20 / \text{kg})(9.80 \text{ N/kg}) = 196 \text{ N}$$

$$f_{s,\max} = \mu_s F_{N_y} = (0.46) \times (196 \text{ N}) = 90.7 \text{ N}$$

از طرف سطح زمین بر نردبان دو نیروی عمودی F_{N_y} و افقی $f_{s,\max}$ وارد می‌شود. بنابراین برآیند این دو نیرو که آن را با \vec{R} نشان می‌دهیم، نیرویی است که سطح زمین بر نردبان وارد می‌کند:

$$\vec{R} = \vec{F}_{N_y} + \vec{f}_{s,\max}$$

که بزرگی آن برابر است با:

$$R = \sqrt{F_{N_y}^2 + f_{s,\max}^2} = \sqrt{(196 \text{ N})^2 + (90.7 \text{ N})^2} = 216 \text{ N}$$

(ب) برآیند نیروهای افقی وارد بر نردبان صفر است، پس:

$$F_{N_x} - f_{s,\max} = 0 \Rightarrow F_{N_x} = f_{s,\max} = 90.7 \text{ N}$$

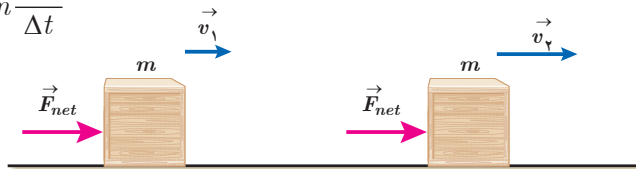
در نبود نیروی اصطکاک بین نردبان و دیوار، نیروی F_{N_x} همان نیروی وارد از دیوار به نردبان است.

۲-۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

قانون‌های نیوتون به ما امکان حل بسیاری از مسائل مکانیک را می‌دهند. قانون دوم نیوتون را می‌توان به صورت دیگری نیز نوشت که در بسیاری از موارد مناسب‌تر است و برخی از پدیده‌های فیزیکی را به کمک آن می‌توان ساده‌تر توجیه و بررسی کرد.

فرض کنید سرعت جسمی به جرم m تحت تأثیر نیروی خالص ثابت \vec{F}_{net} در بازه زمانی Δt از \vec{v}_1 به \vec{v}_2 برسد. در این صورت قانون دوم نیوتون به صورت زیر درمی‌آید:

$$\vec{F}_{\text{net}} = m \vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$



شکل ۲-۱۸ سرعت جسم تحت تأثیر نیروی خالص ثابت \vec{F}_{net} از \vec{v}_1 به \vec{v}_2 می‌رسد.

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.

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (\text{تکانه جسم}) \quad (۸-۲)$$

تکانه کمیتی برداری است زیرا سرعت، یک کمیت برداری و جرم، یک کمیت نرده‌ای است. جهت تکانه همان جهت سرعت است. یکای SI تکانه $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ است. با توجه به تعریف تکانه، قانون دوم نیوتون برای نیروی ثابت را می‌توان چنین نوشت:

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

یعنی نیروی خالص وارد بر جسم برابر با تغییر تکانه جسم تقسیم بر زمان تغییر آن است. همچنین از این رابطه نتیجه می‌گیریم که تغییر تکانه برابر با حاصل ضرب نیرو در مدت زمان تأثیر آن است.

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

تمرین ۲-۲

نشان دهید بین اندازه تکانه (p) و انرژی جنبشی (K) جسمی به جرم m ، رابطه $K = \frac{p^2}{2m}$ برقرار است.

مثال ۲-۱۱

گلوله‌ای به جرم $g \cdot ۱۰^\circ$ با سرعت $\vec{v} = (۵^\circ \cdot \text{m/s}) \vec{i}$ در حال حرکت است. الف) تکانه گلوله را تعیین کنید. ب) انرژی جنبشی گلوله را به دست آورید.

پاسخ: الف) با استفاده از معادله ۸-۲، تکانه جسم را به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} \vec{p} &= m \vec{v} = (۱۰^\circ \cdot \text{kg}) (۵^\circ \cdot \text{m/s}) \vec{i} \\ &= (۵^\circ \cdot \text{kg} \cdot \text{m/s}) \vec{i} \Rightarrow p = ۵^\circ \cdot \text{kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

ب) برای به دست آوردن انرژی جنبشی می‌توانیم از رابطه $K = \frac{p^2}{2m}$ یا $K = \frac{1}{2}mv^2$ استفاده کنیم. در اینجا از رابطه اول استفاده می‌کنیم:

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{(۵^\circ \cdot \text{kg} \cdot \text{m/s})^2}{(2 \times ۱۰^\circ \cdot \text{kg})} = ۱۲۵ \text{ J}$$

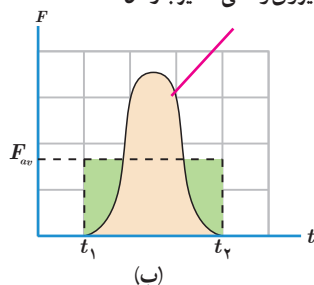
در شرایط واقعی نیروی وارد بر یک جسم به ندرت ثابت است. اگر نیرو ثابت نباشد، معادله‌های داده شده را فقط برای بازه‌های زمانی‌ای می‌توان به کار برد که بسیار کوچک باشد و بتوان نیرو را در این بازه‌ها تقریباً ثابت در نظر گرفت. برای بازه زمانی بزرگ به جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصله زمانی مورد نظر را به کار برد و بنابراین رابطه (۹-۲) چنین می‌شود:

$$\vec{F}_{av} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (\text{نیروی خالص متوسط برحسب تکانه}) \quad (۱۱-۲)$$

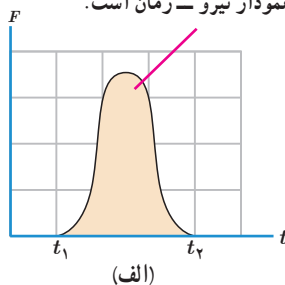
این نتیجه به کاربردهای جالبی در توجیه و بررسی پدیده‌های فیزیکی می‌انجامد.

تغییر تکانه یک جسم (یعنی $\Delta \vec{p} = \vec{F}_{av} \Delta t$) را می‌توان از سطح زیر نمودار نیرو - زمان نیز به دست آورد (شکل ۱۹-۲).

تغییر تکانه ناشی از نیروی متوسط برابر با تغییر تکانه نیروی واقعی متغیر با زمان است.



تغییر تکانه برابر با مساحت سطح زیر نمودار نیرو - زمان است.



شکل ۱۹-۲ (الف) نیروی خالص وارد بر یک جسم می‌تواند بر حسب زمان تغییر کند. (ب) 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 روبه‌رو صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم 1200 kg به دیواری برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب 54 km/h و 9 km/h باشد و تصادف 0.15 s طول بکشد، (الف) تغییر تکانه خودرو را پیدا کنید.

(ب) اندازه و جهت نیروی متوسط وارد بر خودرو را تعیین کنید.

پاسخ: (الف) جهت محور x را به طرف راست انتخاب می‌کنیم و تکانه‌ها را با استفاده از رابطه ۸-۲ به دست می‌آوریم.

$$v_1 = +54 \text{ km/h} = +15 \text{ m/s} \text{ و } v_2 = -9 \text{ km/h} = -2.5 \text{ m/s} \quad \xrightarrow{\quad \quad \quad} x$$

$$p_1 = mv_1 = (1200 \text{ kg})(15 \text{ m/s}) = +18000 \text{ kg.m/s} = +18 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$$

$$p_2 = mv_2 = (1200 \text{ kg})(-2.5 \text{ m/s}) = -3000 \text{ kg.m/s} = -3 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$$

$$\Delta p = (-3 \times 10^3 \text{ kg.m/s}) - (+18 \times 10^3 \text{ kg.m/s}) = -21 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$$

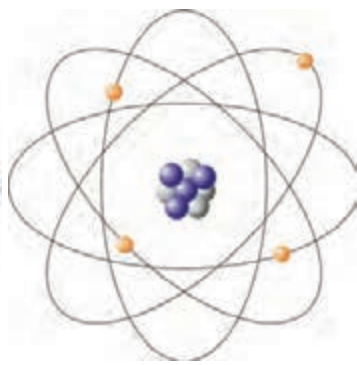
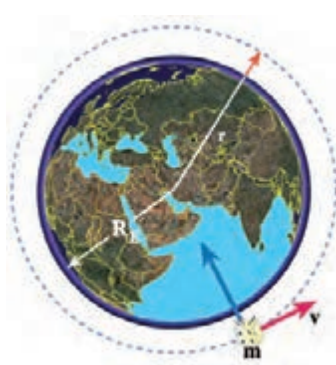
(ب) نیروی متوسط وارد بر اتومبیل با استفاده از رابطه ۱۱-۲ برابر است با:

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-21 \times 10^3 \text{ kg.m/s}}{0.15 \text{ s}} = -14 \times 10^4 \text{ N}$$

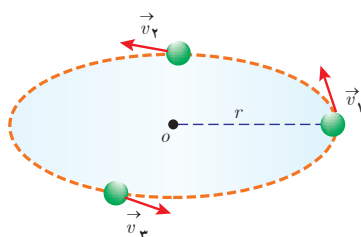
یعنی نیروی خالص متوسطی که از دیوار به خودرو وارد می‌شود در خلاف جهت محور x (یعنی به طرف چپ) است. توجه داریم اگر خودرو پس از برخورد، برنگردد نیروی متوسط وارد بر خودرو کوچک‌تر از مقداری است که اکنون به دست آوردیم.

۴-۲ حرکت دایره‌ای یکنواخت

تاکنون درباره حرکت روی خط راست بحث کردیم. در اینجا می‌خواهیم حرکت جسمی را بررسی کنیم که روی یک دایره یا بخشی از آن حرکت می‌کند (شکل ۲۰-۲).



شکل ۲-۲۰ حرکت جسم‌های مختلف در مسیرهای دایره‌ای



شکل ۲-۲۱ ذره روی یک مسیر دایره‌ای در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت با تندی ثابت ($v_1 = v_2 = v_3 = \dots$) حرکت می‌کند.

بدین منظور ذره‌ای را در نظر می‌گیریم که روی یک مسیر دایره‌ای با تندی ثابت حرکت می‌کند (شکل ۲-۲۱). به این نوع حرکت، حرکت دایره‌ای یکنواخت می‌گویند. با اینکه تندی جسم در این حرکت ثابت است، حرکت ذره شتاب‌دار است (چرا؟). منظور از ذره می‌تواند جسمی مانند یک ماهواره باشد که در یک مدار دایره‌ای حول زمین می‌چرخد یا الکترونی باشد که در مدل اتمی بور حول هسته می‌چرخد و یا گلوله‌ای که به انتهای نخ بسته شده و در یک مسیر دایره‌ای در حرکت است. صرف نظر از آنکه این ذره چه جسمی است، همواره بردار سرعت ذره (\vec{v}) مماس بر مسیر حرکت دایره‌ای است.

پرسش ۲-۸

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

دوره: در حرکت دایره‌ای یکنواخت، مدت زمان لازم برای پیمودن یک دور محیط دایره را دوره تناوب (دوره) می‌نامیم. از آنجا که در این حرکت ذره محیط دایره ($2\pi r$) را با تندی v در زمان T طی می‌کند، داریم:

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad (\text{دوره}) \quad (2-12)$$

یکای دوره ثانیه، (s) است.

پرسش ۲-۹

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



مثال ۱۳-۲



میل لنگ یک خودرو که قطر محور آن 4 cm است، در هر دقیقه 2400 دور می چرخد (2400 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 می کنیم:

$$T = \frac{1\text{ min}}{2400\text{ دور}} \times \frac{60\text{ s}}{1\text{ min}} = \frac{1}{40}\text{ s} = 0.025\text{ s}$$

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

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2(3.14\text{ rad})(0.02\text{ m})}{0.025\text{ s}} = 5\text{ m/s}$$

مثال ۱۴-۲

پره یک بالگرد با دوره 0.2 s به طور یکنواخت می چرخد.

(الف) تعداد دور بر دقیقه (rpm) پره بالگرد چقدر است؟

(ب) اگر شعاع پره 2 m باشد، نوک پره با چه تندی ای می چرخد؟

پاسخ: (الف) یک دور چرخش در زمان T انجام می شود، بنابراین تعداد دور در یک دقیقه (60 s) برابر است با:

$$\text{rpm} = \left(\frac{1\text{ دور}}{T(\text{s})}\right)\left(\frac{60\text{ s}}{1\text{ min}}\right) = \left(\frac{1\text{ دور}}{0.2\text{ s}}\right)\left(\frac{60\text{ s}}{1\text{ min}}\right) = 3000\text{ دور/دقیقه}$$

(ب) با توجه به رابطه $T = \frac{2\pi r}{v}$ می توان تندی حرکت نوک پره بالگرد را تعیین کرد.

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2(3.14\text{ rad})(2\text{ m})}{0.2\text{ s}} = 62.8\text{ m/s}$$

مثال ۱۵-۲



یک دیسک گردان در شهربازی را در نظر بگیرید که توسط یک موتور الکتریکی

در هر دقیقه 500 دور می چرخد. فرض کنید افرادی در فاصله‌های 1 m ،

2 m و 3 m از مرکز آن قرار دارند.

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

پاسخ: ابتدا دوره حرکت را محاسبه می کنیم.

$$T = \frac{1\text{ min}}{500\text{ دور}} \times \frac{60\text{ s}}{1\text{ min}} = 0.12\text{ s}$$

برای محاسبه تندی افراد در فاصله‌های مختلف از مرکز دیسک چرخان، از رابطه ۱۲-۲ استفاده می کنیم.

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

$$r_1 = 1/0 \text{ m} \Rightarrow v_1 = \frac{2\pi r_1}{T} = \frac{2(3/14 \text{ rad})(1/0 \text{ m})}{12/0 \text{ s}} = 0/52 \text{ m/s}$$

$$r_2 = 2/0 \text{ m} \Rightarrow v_2 = \frac{2\pi r_2}{T} = \frac{2(3/14 \text{ rad})(2/0 \text{ m})}{12/0 \text{ s}} = 1/04 \text{ m/s}$$

$$r_3 = 3/0 \text{ m} \Rightarrow v_3 = \frac{2\pi r_3}{T} = \frac{2(3/14 \text{ rad})(3/0 \text{ m})}{12/0 \text{ s}} = 1/57 \text{ m/s}$$

نتیجه می‌گیریم که هر چه از مرکز دیسک دور می‌شویم، تندی حرکت بیشتر می‌شود در حالی که دوره تناوب برای همه افراد یکسان است.

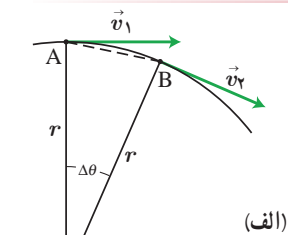
تمرین ۸-۲

مسافتی را که هر یک از افراد در مثال بالا در مدت $3/0 \text{ s}$ طی کرده‌اند محاسبه کنید.

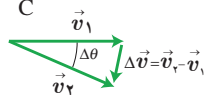
شتاب مرکزگرا و قانون دوم نیوتون: در حرکت دایره‌ای یکنواخت، اندازه سرعت ثابت است اما جهت آن دائماً تغییر می‌کند. به همین دلیل حرکت دایره‌ای، حرکتی شتاب‌دار است (شکل ۲۲-۲ الف و ب). در فصل ۱ دیدیم که شتاب متوسط، از نسبت تغییر سرعت به زمان تغییر آن به‌دست می‌آید ($\vec{a}_{av} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$) 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 $\Delta \vec{v}$ 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 \vec{a}_c نشان می‌دهند (شکل ۲۲-۲ ت). اندازه شتاب مرکزگرا از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

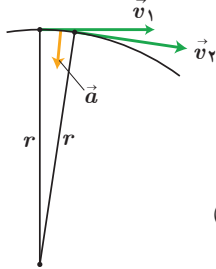
$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad \text{(اندازه شتاب مرکزگرا)} \quad (13-2)$$



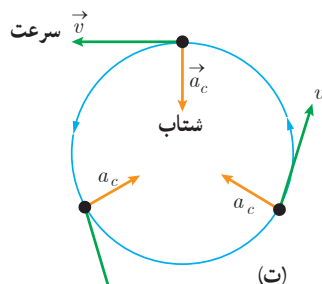
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۲۲-۲

پرسش ۱۰-۲

نشان دهید در حرکت دایره‌ای یکنواخت، شتاب مرکزگرا از رابطه $a_c = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ نیز به‌دست می‌آید که در آن T و r به ترتیب دوره تناوب و شعاع دایره است.

مثال ۲-۱۶

خودرویی 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 یکاها را انجام می‌دهیم و سپس کمیت‌های خواسته شده را به دست می‌آوریم:

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

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2(3.14\text{ rad})(100\text{ m})}{100\text{ m/s}} = 6.28\text{ s}$$

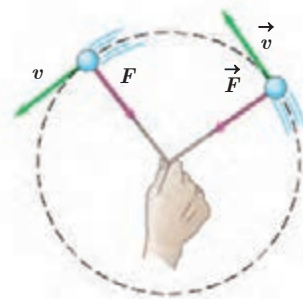
$$a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(100\text{ m/s})^2}{100\text{ m}} = 100\text{ m/s}^2$$

تمرین ۲-۹



شکل روبه‌رو مسیر حرکت سورتمه‌ای را در مسابقه المپیک زمستانی نشان می‌دهد. سورتمه روی یک سطح افقی در حال حرکت است. اگر تندی حرکت سورتمه در کل مسیر 34 m/s باشد، شتاب مرکزگرای آن را در هر یک از پیچ‌ها به دست آورید.

دیدیم شتاب جسم در حرکت دایره‌ای یکنواخت در راستای شعاع دایره و جهت آن به طرف مرکز دایره است. از قانون دوم نیوتون می‌دانیم شتاب یک جسم را نیروی خالص وارد بر آن ایجاد می‌کند و شتاب جسم همواره در راستا و جهت نیروی خالص وارد بر جسم است. بنابراین، در حرکت دایره‌ای یکنواخت نیز یک نیروی خالص رو به مرکز، سبب ایجاد شتاب مرکزگرا می‌شود. به این نیروی خالص که منجر به حرکت دایره‌ای می‌شود، نیروی مرکزگرا می‌گوییم. وقتی جسم متصل به نخ را روی سطح افقی بدون اصطکاک می‌چرخانیم، درمی‌یابیم که باید نخ را دائماً بکشیم؛ یعنی نیروی مرکزگرا به آن وارد کنیم (شکل ۲-۲۳). نخ نیروی مرکزگرایی را به جسم وارد می‌کند که آن را در مسیر دایره‌ای به حرکت وامی‌دارد. نیروی مرکزگرا نوع جدیدی از نیرو نیست، نیروهای گرانشی یا الکتریکی می‌توانند نیروهای مرکزگرا را تأمین کنند؛ مثلاً نیروی گرانشی به طرف مرکز زمین، ماه را در مداری تقریباً دایره‌ای نگه می‌دارد. الکترون‌های مداری اتم‌ها در مدل بور تحت تأثیر نیروی الکتریکی به طرف هسته در مدارهای خود می‌چرخند و ...

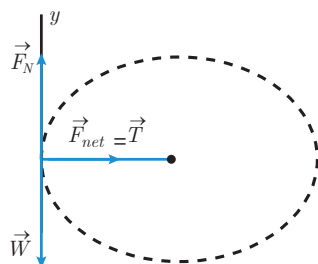
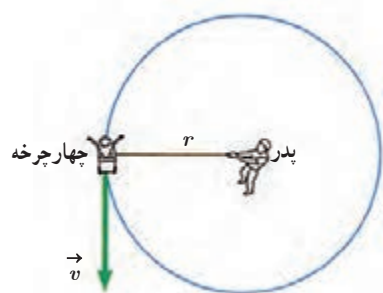


شکل ۲-۲۳ نیروی کشش نخ نیروی مرکزگرای لازم جهت چرخش جسم بر سطح افقی را تأمین می‌کند.

قانون دوم نیوتون ($F_{net} = ma$) را در حرکت دایره‌ای یکنواخت به صورت زیر می‌توانیم بنویسیم:

$$F_{net} = m \frac{v^2}{r} \quad (2-14) \quad (\text{قانون دوم نیوتون در حرکت دایره‌ای یکنواخت})$$

در این رابطه F_{net} بزرگی نیروی خالص وارد بر جسم در راستای شعاع و به طرف مرکز دایره است.



پدری فرزند ۲۰ کیلوگرمی خود را در یک چهارچرخهٔ ایمن ۵/۰ کیلوگرمی قرار می‌دهد و با یک طناب ۲/۰ متری، چهارچرخه را روی سطح افقی زمین به گونه‌ای می‌کشد تا چهارچرخه روی دایره‌ای حرکت کند. با فرض یکنواخت بودن حرکت چهارچرخه و صرف نظر کردن از اصطکاک و با فرض اینکه نیروی کشش طناب ۱۰۰ N باشد، تندی و دورهٔ چهارچرخه را به دست آورید.

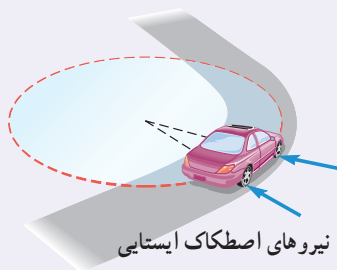
پاسخ: بچه و چهارچرخه را به صورت یک ذره فرض می‌کنیم که در یک مسیر دایره‌ای با نیروی مرکزگرای ۱۰۰ N حرکت می‌کند. بر ذره سه نیروی وزن، نیروی عمودی سطح (در راستای عمودی) و نیروی کشش نخ (مرکزگرا) به طرف مرکز دایره وارد می‌شود. نیروی وزن و نیروی عمودی سطح همدیگر را خنثی می‌کنند و بنابراین تنها نیروی \vec{T} به عنوان نیروی خالص در نظر گرفته می‌شود.

$$m = 25 \text{ kg}, r = 2/0 \text{ m}, F_{\text{net}} = T = 100 \text{ N}$$

$$F_{\text{net}} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{rF}{m}} = \sqrt{\frac{(2/0 \text{ m})(100 \text{ N})}{25 \text{ kg}}} = 2/8 \text{ m/s}$$

$$\text{دوره: } T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(2/0 \text{ m})}{2/8 \text{ m/s}} = 4/5 \text{ s}$$

تمرین ۲-۱۰



خودرویی به جرم ۱۵۰۰ kg را در نظر بگیرید که می‌خواهد در یک پیچ مسطح افقی به شعاع ۵۰/۰ m بدون آنکه بلغزد، دور بزند. اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین لاستیک و سطح جاده ۱/۰ باشد، حداکثر تندی خودرو چقدر می‌تواند باشد؟ (راهنمایی: با اینکه خودرو می‌خواهد یک چهارم دایره را طی کند، می‌توانیم خودرو را به صورت یک ذره در نظر بگیریم که در یک چهارم دایره، حرکت دایره‌ای یکنواخت دارد. در راستای عمود بر سطح، نیروی وزن و نیروی عمودی سطح بر خودرو وارد می‌شود و نیروی اصطکاک ایستایی که عمود بر راستای حرکت است، مانع از لغزش خودرو شده و به طرف مرکز پیچ، بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو شتاب مرکزگرای لازم را برای دور زدن تأمین می‌کند.)

۲-۵ نیروی گرانشی



شکل ۲-۲۴ اگر بر ماه نیرویی وارد نشود ماه باید به طور مستقیم حرکت کند نه به صورت دایره‌ای

وقتی سیبی از یک درخت جدا می‌شود، چه نیرویی سبب سقوط آن به طرف زمین می‌شود؟ وقتی شیر آب را باز می‌کنیم، چه نیرویی سبب می‌شود آب به طرف زمین شارش کند؟ چرا وقتی یک جسم را به بالا پرتاب می‌کنیم پس از مدتی به پایین می‌افتد؟ منشأ نیروی مرکزگرایی 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؟

تا سال ۱۶۸۷ داده‌های زیادی در مورد حرکت ماه و سیارات گردآوری شده بود، اما کسی شناخت روشنی از نیروهای مؤثر بر آنها نداشت. در آن سال ایزاک نیوتون، دانشمند انگلیسی، با انتشار کتاب اصول خود راز این معما را بیان کرد. از قانون‌های نیوتون می‌دانیم که باید نیروی خالصی بر ماه وارد شود. اگر چنین نبود، ماه به جای مدار تقریباً دایره‌ای به گرد زمین، باید روی خط راست حرکت می‌کرد. نیوتون استدلال کرد که این نیرو ناشی از نیروی جاذبه بین ماه و زمین است و گفت این نیرو همان نیرویی 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 الهام‌بخش او برای قانون گرانش عمومی بوده است که بیان می‌دارد:

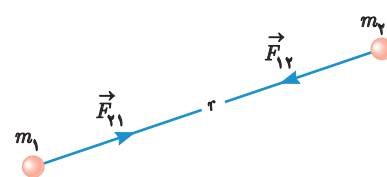
نیروی گرانشی میان دو ذره^۱ با حاصل ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصله آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.

اگر مطابق شکل ۲-۲۵، جرم دو ذره m_1 و m_2 و فاصله آنها از یکدیگر r باشد، اندازه نیروی گرانشی میان دو ذره یعنی F از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (\text{اندازه نیروی گرانشی بین دو ذره}) \quad (2-15)$$

در این رابطه، G ثابت گرانش عمومی نام دارد و برابر است با:

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2 / \text{kg}^2$$



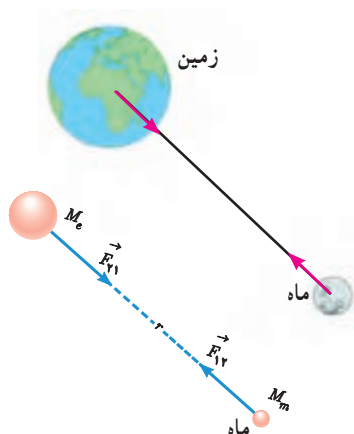
شکل ۲-۲۵ نیروی گرانشی بین دو ذره جاذبه است و در امتداد خط واصل دو ذره وارد می‌شود. طبق قانون سوم نیوتون این دو یک جفت نیروی کنش – واکنش را تشکیل می‌دهند که:

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

فعالیت ۲-۵

ثابت گرانشی G را اولین بار هنری کاوندیش^۲ در سال ۱۷۹۸ اندازه‌گیری کرد. در مورد روش اندازه‌گیری G توسط هنری کاوندیش تحقیق کنید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

مثال ۲-۱۸



جرم زمین و ماه به ترتیب حدود $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ و $7.36 \times 10^{22} \text{ kg}$ و فاصله متوسط آنها از یکدیگر حدود $3.84 \times 10^8 \text{ m}$ است. نیروی گرانشی را که زمین و ماه به یکدیگر وارد 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 ۲-۱۵، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F_{12} = F_{21} = G \frac{M_e M_m}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2 / \text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(7.36 \times 10^{22} \text{ kg})}{(3.84 \times 10^8 \text{ m})^2} = 1.99 \times 10^2 \text{ N}$$

این نیرو سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود.

۱- اگر فاصله دو جسم از یکدیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هر یک از دو جسم در مقایسه با فاصله آنها چشم‌پوشی کرد، می‌توان دو جسم را به صورت ذره در نظر گرفت.

۲- Henry Cavendish

مثال ۱۹-۲

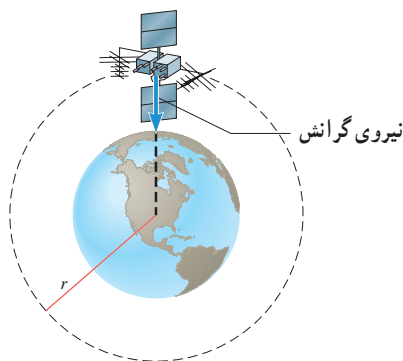
دو کره همگن به جرم‌های 800 kg و 1200 kg را در نظر بگیرید که فاصله مرکز آنها از یکدیگر 100 m است. نیروی گرانشی را که این دو کره بر یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه کنید.

پاسخ: برای محاسبه نیرویی 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:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(800 \text{ kg})(1200 \text{ kg})}{(100 \text{ m})^2} = 6.4 \times 10^{-7} \text{ N}$$

همان‌طور که محاسبه این مثال نشان می‌دهد، نیروی گرانشی میان جسم‌های با جرم کوچک قابل ملاحظه نیست.

مثال ۲۰-۲



ماهواره‌ها در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار تقریباً دایره‌ای به دور زمین می‌چرخند. اگر جرم ماهواره 200 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

پ) دوره گردش ماهواره ($G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$, $M_e = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$, $R_e = 6400 \text{ km}$ شعاع زمین)

پاسخ: ماهواره را به صورت ذره و زمین را به صورت کره‌ای همگن که جرم آن در مرکزش قرار دارد در نظر می‌گیریم و به کمک رابطه ۱۵-۲، نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه می‌کنیم.

الف)

$$r = R_e + h = 6400 \text{ km} + 2600 \text{ km} = 9000 \text{ km} = 9.000 \times 10^6 \text{ m}$$

$$F = G \frac{M_e m}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(200 \text{ kg})}{(9.000 \times 10^6 \text{ m})^2} = 985 \text{ N}$$

ب) از رابطه ۱۴-۲، برای پیدا کردن تندی ماهواره استفاده می‌کنیم:

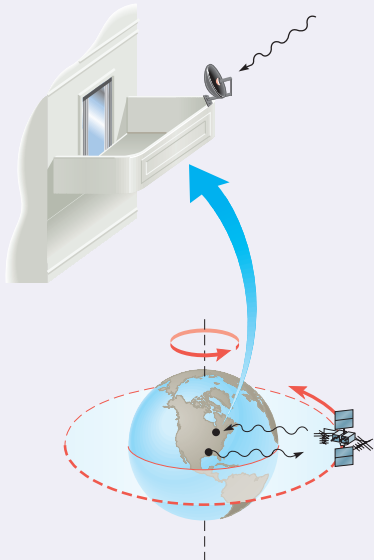
$$F_{net} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow 985 \text{ N} = (200 \text{ kg}) \frac{v^2}{9.000 \times 10^6 \text{ m}} \Rightarrow v = 6.66 \times 10^3 \text{ m/s}$$

پ) با استفاده از رابطه بین سرعت و دوره یعنی رابطه ۱۲-۲، می‌توانیم دوره را محاسبه کنیم:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2(3.14 \text{ rad})(9.000 \times 10^6 \text{ m})}{6.66 \times 10^3 \text{ m/s}} = 8.49 \times 10^3 \text{ s} = 2.36 \text{ h}$$

یعنی این ماهواره در هر 2.36 h یک بار به دور زمین می‌چرخد.

تمرین ۱۱-۲



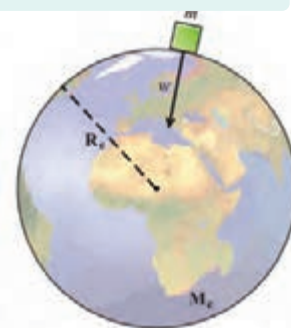
مدار همگام با زمین^۱ و ماهواره‌های مخابراتی: از دیدگاه مخابراتی، باقی ماندن ماهواره در یک محل نسبت به مکانی در روی زمین (مثلاً بالای ایران) امتیاز محسوب می‌شود. این در صورتی رخ می‌دهد که دوره گردش ماهواره به دور زمین با مدت زمان یک دور چرخش زمین به دور خودش، یعنی $h = 24^\circ$ یکسان باشد. (الف) در چه فاصله‌ای از زمین می‌توان این مدار همگام با زمین را یافت؟ (ب) تندی مداری این ماهواره چقدر است؟

پرسش ۱۱-۲

نشان دهید مربع دوره گردش ماهواره‌ها به دور زمین متناسب با مکعب فاصله ماهواره از مرکز زمین است.

وزن و نیروی گرانشی: در بخش ۲-۲، در مورد وزن یک جسم مطالبی را آموختیم. در آنجا گفتیم وزن یک جسم روی زمین برابر با نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند (شکل ۲-۲۶). 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:

$$W = G \frac{M_e m}{R_e^2} \quad (\text{وزن جسم در سطح زمین}) \quad (۱۶-۲)$$



شکل ۲-۲۶ وزن نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند.

تمرین ۱۲-۲

نشان دهید شتاب گرانشی روی زمین برابر است با: $g = G \frac{M_e}{R_e^2}$

تمرین ۱۳-۲

تلسکوپ فضایی هابل با تندی 7560 m/s گرد زمین می‌چرخد. (الف) فاصله این تلسکوپ از سطح زمین چند کیلومتر است؟ (ب) وزن این تلسکوپ در این ارتفاع چند برابر وزن آن روی زمین است؟ (پ) دوره تناوب این تلسکوپ را پیدا کنید. ($R_e = 6380 \text{ km}$)

۱-۲ و ۲-۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص

۱. سیبی 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 جداسدن 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؟ ($g=9.8\text{ N/kg}$)
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، شخص با نیروی 200 N جسم 900 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، 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 روبه‌رو وقتی وزنه 4 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 14 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؟

۵. در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟
الف) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.

ب) کشتی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.

پ) قایقرانی در حال پارو زدن است.

ت) چتربازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.

ث) هواپیمایی در یک سطح پروازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.

ج) تویی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.

۶. راننده خودرویی که با سرعت 72 km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت 20 m متوقف می‌شود.

الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟

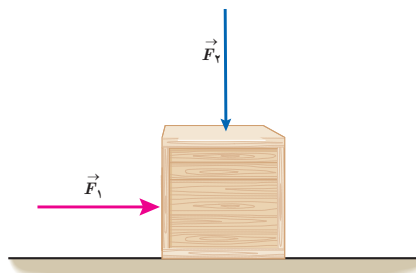
ب) از لحظه ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟

پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟ جرم خودرو را 1200 kg فرض کنید.

۷. چتربازی از یک بالگرد تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌پرد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترباز را از لحظه پرش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

۸. دو گوی هم‌اندازه‌را که جرم یکی دو برابر دیگری است ($m_2=2m_1$) 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؟ چرا؟

۴. 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 \vec{F}_2 که جعبه را به زمین می فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت های زیر چگونه تغییر می کنند؟



- الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه
- ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه
- پ) اندازه بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی
- ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۱-. می خواهیم به جسمی که جرم آن 50°kg است، شتاب 2°m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت های زیر، نیرویی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف نظر می شود.

- الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
- ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک 0.2° به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.
- پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا حرکت کند.
- ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین حرکت کند.

۱۱. قطعه چوبی را با سرعت افقی 10°m/s روی سطحی افقی پرتاب می کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.2° است.

الف) چوب پس از پیمودن چه مسافتی می ایستد؟

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 پرتاب شود، مسافت پیموده شده آن چند برابر می شود؟

۱۲. وزنه ای به جرم 2°kg را به انتهای فنری به طول 12cm که ثابت آن 20°N/cm است می بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می کنیم. طول فنر را در حالت های زیر محاسبه کنید.

الف) آسانسور ساکن است.

ب) آسانسور با سرعت ثابت 2°m/s رو به پایین در حرکت است.

پ) آسانسور با شتاب ثابت 2°m/s^2 از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.

ت) آسانسور با شتاب ثابت 2°m/s^2 از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۱۳. برای یک راننده دانستن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان طور که شکل نشان می دهد کل مسافت توقف، دو قسمت دارد؛ مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظه دیدن مانع تا ترمز گرفتن طی می کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می کند).



کل مسافت توقف = مسافت ترمز + مسافت واکنش

الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.

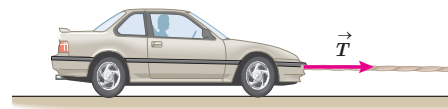
ب) زمان واکنش راننده ای 0.6°s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18m را طی می کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 5°s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.

ت) وقتی خودرو ترمز می کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را 1500°kg فرض کنید.

۱۴. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم 1500°kg را می کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 220°N و

28°N است.



الف) اگر سرعت خودرو ثابت باشد نیروی کشش طناب چقدر است؟

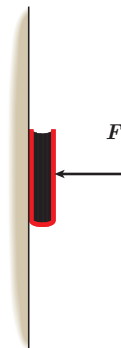
ب) اگر خودرو با شتاب ثابت 2 m/s^2 به طرف راست کشیده شود، نیروی کشش طناب چقدر است؟

۱۵. کتابی را مانند شکل با نیروی عمودی F به دیوار قائمی فشرده و ثابت نگه داشته‌ایم.

الف) نیروهای وارد بر کتاب را رسم کنید.

ب) اگر جرم کتاب $2/5\text{ kg}$ باشد، اندازه نیروی اصطکاک را به دست آورید.

پ) اگر کتاب را بیشتر به دیوار بفشاریم، آیا نیروی اصطکاک تغییر می‌کند؟ با این کار چه نیروهای افزایش می‌یابد؟



۲-۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

۱۶. وقتی در خودروی ساکنی نشسته‌اید و خودرو ناگهان شروع به حرکت می‌کند، به صندلی فشرده می‌شوید. همچنین اگر در خودروی در حال حرکتی نشسته باشید، در توقف ناگهانی به جلو پرتاب می‌شوید.

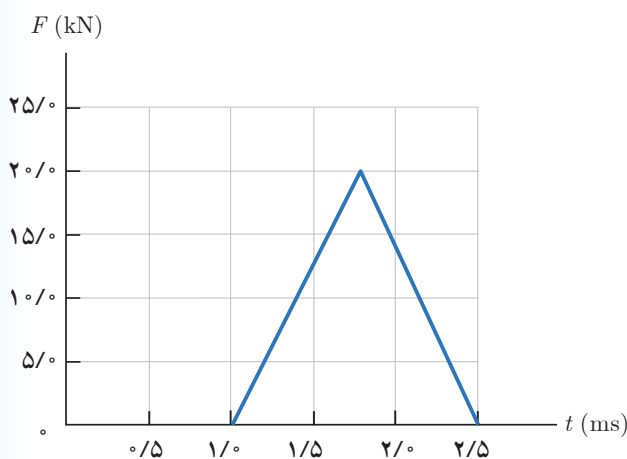


الف) علت این پدیده‌ها را توضیح دهید. ب) نقش کمربند ایمنی و کیسه هوا در کم شدن آسیب‌ها در تصادف‌ها را بیان کنید.

۱۷. تویی به جرم 28 g با تندی 15 m/s به‌طور افقی به بازیکنی نزدیک می‌شود. بازیکن با مشت به توپ ضربه می‌زند و باعث می‌شود توپ با تندی 22 m/s در جهت مخالف برگردد. الف) اندازه تغییر تکانه توپ را محاسبه کنید.

ب) اگر مشت بازیکن 60°s با توپ در تماس باشد، اندازه نیروی متوسط وارد بر مشت بازیکن از طرف توپ را به دست آورید.

۱۸. شکل زیر، منحنی نیروی خالص برحسب زمان را برای توپ بیسبالی که با چوب بیسبال به آن ضربه زده شده است، نشان می‌دهد. تغییر تکانه توپ و نیروی خالص متوسط وارد بر آن را به دست آورید.



۲-۴ حرکت دایره‌ای یکنواخت

۱۹. پره‌های یک بالگرد در هر دقیقه، 1000 دور می‌چرخند. طول پره‌ها را 4 m فرض کنید و کمیت‌های زیر را برای پره‌ها محاسبه کنید.

الف) دوره تناوب پره‌ها

ب) تندی در وسط و نوک پره‌ها

پ) شتاب مرکز گرا در وسط و نوک پره‌ها

۲۰. حداقل ضریب اصطکاک ایستایی بین چرخ‌های خودرو و سطح جاده چقدر باشد تا خودرو بتواند با تندی 54 km/h پیچ افقی مسطحی را که شعاع آن 50 m است، دور بزند؟

۲-۵ نیروی گرانشی

۲۱. دو جسم در فاصله 200 m از هم، یکدیگر را با نیروی

گرانشی کوچک $10^{-8} \times 10^{-8} \text{ N}$ ، جذب می کنند. اگر جرم یکی

از اجسام 500 kg باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟

۲۲. ماهواره ای به جرم 600 kg در مداری دایره ای به ارتفاع

2800 کیلومتر از سطح زمین، به دور آن می چرخد.

الف) نیروی گرانشی وارد بر ماهواره

ب) شتاب ماهواره

پ) تندی ماهواره

ت) دوره تناوب ماهواره را در این ارتفاع به دست آورید.

($M_e = 598 \times 10^{24} \text{ kg}$ و $R_e = 6400 \text{ km}$)

۲۳. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به

نصف مقدار خود در سطح زمین می رسد؟

ب) اگر جرم ماهواره ای 250 kg باشد، وزن آن در ارتفاع

36000 کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟

۲۴. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر

است؟

ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین چقدر است؟

$M_{\text{ماه}} = 736 \times 10^{22} \text{ kg}$ و $M_{\text{خورشید}} = 199 \times 10^{30} \text{ kg}$

$149/6 \times 10^6 \text{ km}$ = فاصله زمین تا خورشید

$3/84 \times 10^5 \text{ km}$ = فاصله زمین تا ماه

۲۵. الف) سفینه ای به جرم $300 \times 10^4 \text{ kg}$ 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 می شود به دست آورید

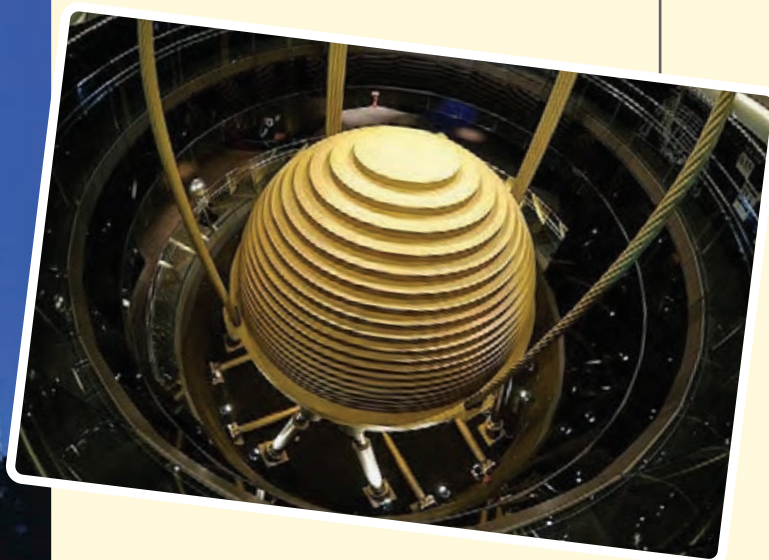
(از داده های مسئله های قبل استفاده کنید).

ب) در چه فاصله ای از زمین، نیروی گرانشی ماه و زمین بر

سفینه، یکدیگر را خنثی می کنند؟



نوسان و موج



بخش‌ها

در طراحی و ساخت برج‌های بلند، توجه به قوانین فیزیکی نوسان و موج اهمیت زیادی دارد و به روش‌های گوناگونی می‌کوشند از نوسان‌های احتمالی آنها کم کنند. مثلاً در برخی از این برج‌ها، آونگ‌های بسیار سنگینی (در حدود چند صد تن) را در طبقات بالایی نصب می‌کنند. چگونه یک آونگ می‌تواند نوسان‌های یک برج 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

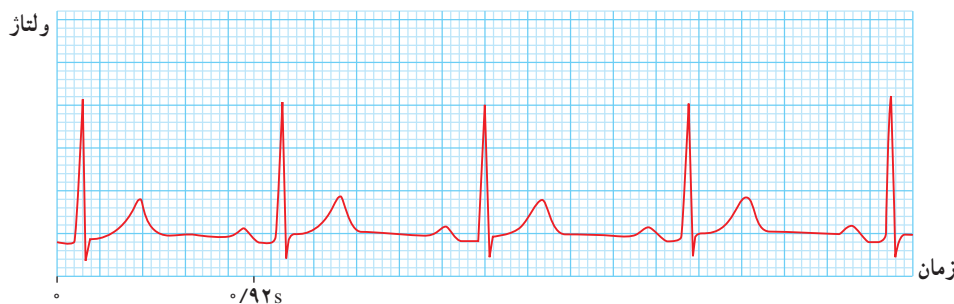
دنیای ما پر از نوسان است. ضربان قلب انسان، تاب خوردن، بالا و پایین رفتن سرنشینان کشتی روی امواج خروشان دریا و زمین لرزه نمونه‌هایی از این دست هستند (شکل ۱-۳). مطالعه و کنترل نوسان‌ها در سامانه‌های مختلف دو هدف اصلی فیزیک‌دان‌ها و مهندسان است. در این فصل نوعی از نوسان موسوم به **نوسان دوره‌ای** و نمونه‌ای مشهور از این نوع نوسان‌ها به نام **حرکت هماهنگ ساده** را بررسی می‌کنیم. در ادامه با پدیدهٔ تشدید و سپس با موج و انواع آن آشنا می‌شویم و آنگاه به موج‌های عرضی و طولی می‌پردازیم. نمونه‌ای از موج‌های عرضی که در این فصل بررسی می‌شود امواج الکترومغناطیسی (و از جمله نور مرئی) و نمونه‌ای از موج‌های طولی که مورد بررسی قرار می‌گیرند، امواج صوتی هستند.

۱-۳ نوسان دوره‌ای

نوسان‌ها می‌توانند دوره‌ای یا غیردوره‌ای باشند؛ مثلاً شکل ۲-۳ تصویری از ضرباهنگ (ریتم) قلب یک شخص را نشان می‌دهد که در هر دقیقه ۶۵ بار می‌زند. نقش‌های این تصویر به‌طور منظم تکرار می‌شوند، که به آن چرخه (سیکل) نوسان گفته می‌شود. چنین نوسان‌هایی را که هر چرخهٔ آن در دوره‌های دیگر دقیقاً تکرار شود **نوسان‌های دوره‌ای** می‌نامند. مدت زمان یک چرخه، **دورهٔ تناوب** حرکت نامیده می‌شود و آن را با T نشان می‌دهند. بنابه این تعریف، دورهٔ تناوب ضربان قلب این شخص $\frac{1}{65}$ دقیقه، یا $92/0^\circ$ ثانیه است.



شکل ۱-۳ الف ضربان قلب انسان، **ب** تاب خوردن، **پ** بالا و پایین رفتن سرنشینان کشتی، **ت** زمین لرزه، نمونه‌هایی از نوسان هستند.



شکل ۱-۳ ب نمونه‌ای از نمودار الکتروقلب نگارهٔ (نوار قلب) یک شخص

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

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-3) \quad (\text{بسامد})$$

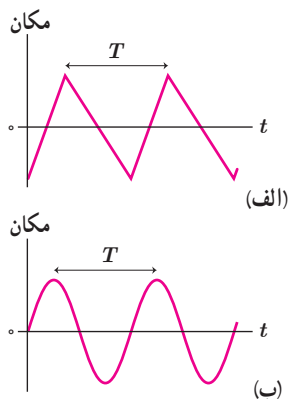
یکای بسامد در SI، هرتز (Hz) است که به افتخار فیزیک‌دان آلمانی، هاینریش هرتز، نام‌گذاری شده است. طبق تعریف:

$$1 \text{ s}^{-1} = \text{هرت兹} = 1 \text{ Hz}$$

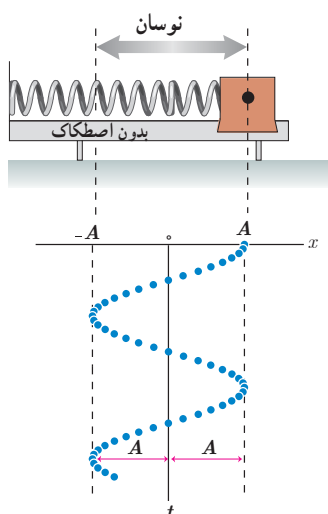
پوشش ۱-۳

بسامد ضربان قلب مربوط به نمودار شکل ۲-۳ چقدر است؟

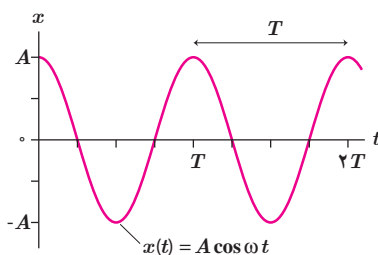
۲-۳ حرکت هماهنگ ساده



شکل ۳-۳ نمودار مکان - زمان
برای دو نمونه از نوسان دوره‌ای



شکل ۳-۴ سامانه جسم و فنر، نمونه
مشهوری از یک حرکت هماهنگ ساده است.



شکل ۳-۵ نمودار مکان - زمان برای حرکت
هماهنگ ساده

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

یک نمونه معروف از حرکت هماهنگ ساده، جرمی است که با یک فنر نوسان می‌کند. شکل ۳-۴ 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 متوالی و یکسان ثبت کنیم به نموداری سینوسی می‌رسیم که در این شکل نشان داده شده است. در این شکل جسم بین $x = +A$ و $x = -A$ به جلو و عقب می‌رود که در آن A دامنه حرکت است. به عبارتی دامنه حرکت، بیشینه فاصله جسم از نقطه تعادل است. توجه کنید که دامنه، فاصله بین دو انتهای مسیر نیست.

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

$$x(t) = A \cos \omega t \quad (2-3) \quad \text{(معادله مکان - زمان در حرکت هماهنگ ساده)}$$

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

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (3-3) \quad \text{(بسامد زاویه‌ای)}$$

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

توجه کنید که در رابطه ۲-۳، شناسه تابع کسینوس (یعنی ωt) برحسب رادیان است. شکل ۳-۵ بازگشت حرکت می‌گویند. همچنین وقتی $x = 0$ است (یعنی نوسانگر از نقطه تعادل می‌گذرد) اندازه سرعت بیشینه است، یعنی بسته به اینکه جسم در جهت $+x$ یا $-x$ از نقطه تعادل بگذرد، $v = +v_{\max}$ یا $v = -v_{\max}$ خواهد بود.^۴ اگرچه روابط ۲-۳ و ۳-۳ و بحث کوتاهی که درباره سرعت نوسانگر انجام دادیم برای سامانه جرم - فنر بود، ولی برای هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای (از جمله آونگ ساده) برقرار است.

۱-Sinusoidal. به‌طور عمومی به همه تابع‌های سینوسی و کسینوسی، تابع سینوسی می‌گویند.

۲-Simple Harmonic Motion

۳-Turning Points

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

فعالیت ۱-۳



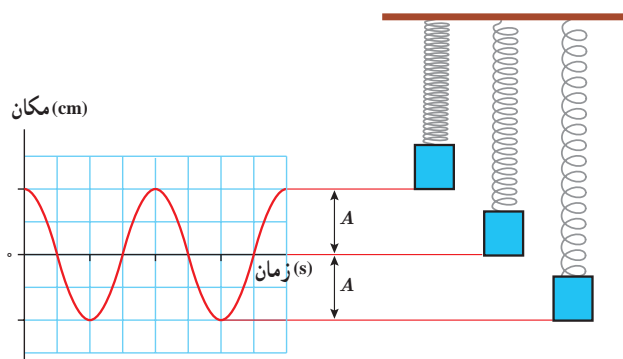
دیپازون با تیغه‌ای نوک تیز



اثر ارتعاش‌های دیپازون روی شیشه دوداندود

نوسان نگار: نوسان نگار وسیله‌ای برای ثبت نوسان‌ها است. می‌خواهیم یک نوسان نگار ساده درست کنیم. به این منظور، یک وجه قطعه شیشه‌ای با طول و عرض تقریبی 2 cm و 1 cm را روی شعله شمعی بگیرد تا به خوبی دوداندود شود. سپس تیغه نوک تیزی را به نوک یکی از شاخه‌های دیپازون^۱ کم‌بسامدی (در حدود 100 Hz) محکم بچسبانید. دیپازون را به نوسان وادارید و آن را به سرعت روی شیشه دوداندود به حرکت درآورد، طوری که اثر نوک تیز تیغه روی سطح دوداندود بیفتد. روی شیشه، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن **نوسان نگاشت**^۲ گفته می‌شود.

مثال ۱-۳



جسمی متصل به یک فنر با بسامد 20 Hz و دامنه 3 cm به‌طور هماهنگ ساده در امتداد قائم نوسان می‌کند. این جسم در لحظه $t=0\text{ s}$ از مکان $+A$ رها شده است. مکان نوسانگر در $t=10/66\text{ s}$ را بیابید.

پاسخ: با استفاده از رابطه $x = A \cos \omega t$ ، مکان نوسانگر جرم - فنر را محاسبه می‌کنیم:

که در آن:

$$A = 0.03\text{ m}, \omega = 2\pi f = 2\pi (20\text{ s}^{-1}) = 40\pi\text{ rad/s}, t = 10/66\text{ s}$$

در نتیجه، در یکای SI داریم^۳:

$$x = (0.03\text{ m}) \cos (40\pi\text{ rad/s} \times 10/66\text{ s}) = 0.02\text{ m}$$

تمرین ۱-۳

ذره‌ای در حال نوسان هماهنگ ساده با دوره تناوب T است. با فرض اینکه در $t=0\text{ s}$ ذره در $x=+A$ باشد، تعیین کنید در هر یک از لحظات زیر، آیا ذره در $x=-A$ ، در $x=+A$ ، یا در $x=0$ خواهد بود؟ (الف) $t=2/5 T$ ، (ب) $t=3/5 T$ ، (پ) $t=5/25 T$ (ر/هنمایی: برای پاسخ به این تمرین، ساده‌تر آن است که چند دوره از یک نمودار کسینوسی 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 $x(t)$ مکان در زمان دلخواه t باشد، آن‌گاه نوسانگر باید در زمان $t+T$ دوباره به همان مکان بازگردد و بنابراین $A \cos \omega t = A \cos \omega (t+T)$. براین اساس نشان دهید $\omega = 2\pi/T$.

۱- Tuning Fork

۲- Oscillogram

۳- اگر از ماشین حساب برای محاسبه چنین روابطی استفاده می‌کنید، دقت کنید که مُد ماشین حساب روی رادیان (RAD) باشد.

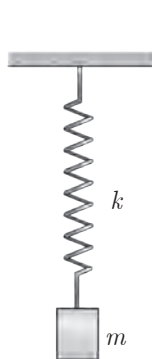


هاینریش هرتز (۱۸۹۴-۱۸۵۷ م.)

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

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

فعالیت ۲-۳



با انتخاب وزنه‌ها و فنرهای مختلف در آرایشی مطابق شکل، و با اندازه‌گیری زمان تعداد مشخصی نوسان کامل، و سپس محاسبه دوره تناوب T برای هر سامانه جرم-فنر، به‌طور تجربی نشان دهید که:

الف) دوره تناوب سامانه جرم-فنر با یک فنر معین ولی وزنه‌های متفاوت، با جذر جرم وزنه به‌طور مستقیم متناسب است ($T \propto \sqrt{m}$).

ب) دوره تناوب سامانه جرم-فنر با یک وزنه معین ولی فنرهای متفاوت، با جذر ثابت فنر به‌طور وارون متناسب است ($T \propto 1/\sqrt{k}$).

پ) دوره تناوب سامانه جرم-فنر مستقل از دامنه است.

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:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4-3) \quad \text{(دوره تناوب سامانه جرم-فنر)}$$

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 68 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 می‌کشیم و از حالت سکون رها می‌کنیم. الف) دوره تناوب و ب) بسامد زاویه‌ای نوسان چقدر می‌شود؟

پاسخ: الف) دوره تناوب با استفاده از رابطه ۴-۳ به دست می‌آید:

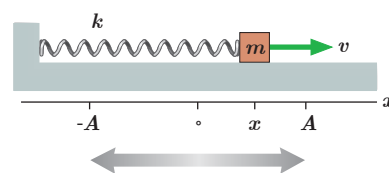
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{0.068\text{ kg}}{65\text{ N/m}}} = 0.64\text{ s}$$

ب) بسامد زاویه‌ای از رابطه ۵-۳ به دست می‌آید:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{65\text{ N/m}}{0.068\text{ kg}}} = 9.8\text{ rad/s}$$

۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

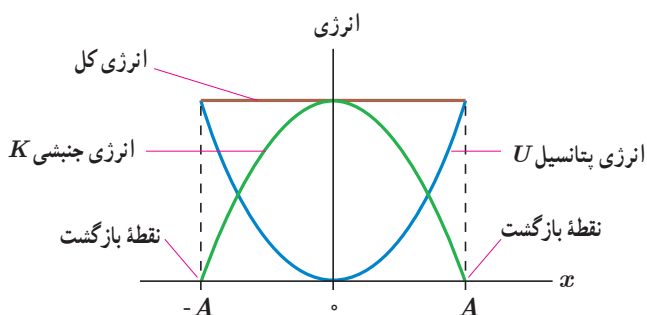
شکل ۳-۶ سامانه جرم-فنری را هنگام نوسان روی سطح افقی بدون اصطکاک نشان می‌دهد. این سامانه مثال بارز حرکت هماهنگ ساده است. در کتاب فیزیک ۱ دیدید وقتی فنری فشرده یا کشیده می‌شود در سامانه جرم-فنر انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره می‌شود، به طوری که با افزایش جابه‌جایی از نقطه تعادل (جایی که فنر نه فشرده و نه کشیده 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.



شکل ۳-۶ سامانه جرم-فنر در نوسان روی سطح افقی بدون اصطکاک

انرژی جنبشی این سامانه نیز به جرم قطعه متصل به فنر و تندی آن بستگی دارد و برابر با $K = \frac{1}{2} m v^2$ 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 ۳-۷ تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر و پایستگی انرژی مکانیکی در حرکت هماهنگ ساده سامانه جرم-فنر را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷ تبدیل انرژی در حین حرکت هماهنگ ساده سامانه جرم-فنر. توجه کنید که در نقطه $x = 0$ انرژی، صرفاً جنبشی و در نقطه‌های $x = \pm A$ انرژی، صرفاً پتانسیل است. در این حرکت انرژی مکانیکی پایسته است، به گونه‌ای که به‌طور پیوسته از انرژی پتانسیل U به انرژی جنبشی K تبدیل می‌شود و بالعکس.

نشان داده می‌شود انرژی مکانیکی سامانه جرم-فنر در حرکت هماهنگ ساده از رابطه زیر به دست می‌آید^۱:

$$E = \frac{1}{2} k A^2 \quad (3-6) \quad (\text{انرژی مکانیکی سامانه جرم-فنر})$$

که در آن k ثابت فنر و A دامنه نوسان است. با استفاده از رابطه‌های ۳-۵ و ۳-۳ به رابطه مفید دیگری می‌رسیم که برای هر نوسانگر هماهنگ ساده دیگری از جمله آونگ ساده نیز

۱- انرژی پتانسیل کشسانی سامانه جرم-فنر در هر نقطه از مسیر نوسان از رابطه $U = \frac{1}{2} k x^2$ به دست می‌آید که آموزش و ارزشیابی آن خارج از برنامه درسی این کتاب است. در نقاط بازگشتی که $x = \pm A$ است، این انرژی مساوی $\frac{1}{2} k A^2$ و برابر با انرژی مکانیکی سامانه است.

برقرار است:

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

یا:

$$(۷-۳) \quad E = \frac{1}{2} \pi^2 m A^2 f^2 \quad (\text{انرژی مکانیکی نوسانگر هماهنگ ساده})$$

اگرچه پایداری انرژی مکانیکی و تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر را فقط برای نوسانگر جرم - فنر بررسی کردیم، ولی می‌توان نشان داد در حالت کلی، برای هرگونه نوسانگر هماهنگ ساده دیگری (از جمله آونگ ساده) نیز برقرار است. همچنین بنا به رابطه ۷-۳ انرژی مکانیکی هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای متناسب با مربع دامنه (A^2) و مربع بسامد (f^2) است.

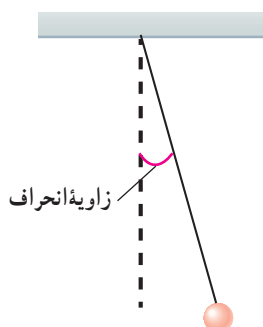
● مثال ۳-۳

الف) نشان دهید تندی بیشینه در حرکت هماهنگ ساده برابر است با $A\omega$.
 ب) تندی نوسانگر هماهنگ ساده‌ای که با دامنه 1 cm و دوره 0.5 s نوسان می‌کند هنگام عبور از نقطه تعادل چقدر است؟
پاسخ: الف) بیشینه تندی در حرکت هماهنگ ساده هنگام عبور نوسانگر از نقطه تعادل رخ می‌دهد، جایی که انرژی پتانسیل صفر است. با استفاده از تعریف انرژی مکانیکی ($E = K + U$) و همچنین رابطه‌های ۷-۳ و ۳-۳ خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2} \pi^2 m A^2 f^2 = \frac{1}{2} m v_{\max}^2 \Rightarrow v_{\max} = \pi A f = A\omega$$

ب)

$$v_{\max} = A\omega = A\left(\frac{2\pi}{T}\right) = (0.01\text{ m})\left(\frac{2\pi}{0.5\text{ s}}\right) = 0.25\text{ m/s}$$



شکل ۳-۸ آونگ ساده، شامل وزنه‌ای

کوچک است که از نخ بدون جرم و کش نیامدنی آویزان است.

آونگ ساده: آونگ ساده شامل وزنه کوچکی به جرم m (موسوم به وزنه آونگ) است که از نخ بدون جرم و کش نیامدنی به طول L که سر دیگر آن ثابت شده، آویزان است (شکل ۳-۸). 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 شتاب گرانشی (g) و طول آونگ (L) بستگی دارد، و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(۸-۳) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (\text{دوره تناوب آونگ ساده})$$

این رابطه نشان می‌دهد که دوره تناوب آونگ ساده به جرم و دامنه آن بستگی ندارد.

● مثال ۴-۳

بستگی دوره تناوب آونگ به شتاب گرانشی، روش دقیقی را برای تعیین g به دست می‌دهد. در این روش با اندازه‌گیری طول L و دوره تناوب T ، می‌توان g را به دست آورد. ژئوفیزیک‌دانی با استفاده از یک آونگ ساده به طول 1.71 m که 0.72° نوسان را در 0.6 s انجام می‌دهد، شتاب g زمین را در مکانی خاص تعیین می‌کند. وی مقدار g را در این مکان چقدر به دست می‌آورد؟

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

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

که در آن T دورهٔ تناوب این آونگ است:

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

در نتیجه g چنین به دست می‌آید:

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

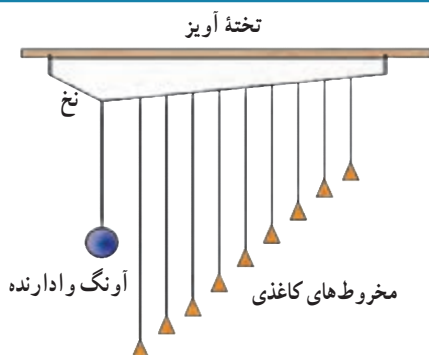
۴-۳ تشدید

در تمام مثال‌هایی که تا اینجا بررسی کردیم، نوسانگر (مثلاً جرم - فنر یا آونگ ساده) با انحراف از وضع تعادل با بسامدی معین شروع به نوسان می‌کرد. به بسامد این نوسان‌ها **بسامد طبیعی** گفته می‌شود. مطابق این تعریف، بسامد طبیعی سامانهٔ جرم - فنر $f = \sqrt{k/m}/2\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f_s = \sqrt{g/L}/2\pi$ است. اما این نوسانگرها می‌توانند با اعمال یک نیروی خارجی نیز، با بسامد f یا با بسامدهای دیگری به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، **نوسان واداشته** گفته می‌شود و بسامد این نوسان را با f_d نمایش می‌دهند^۱. مثالی از یک نوسان واداشته، تاب خوردن کودکی است که به‌طور دوره‌ای هل داده می‌شود (شکل ۳-۹). نوسان تاب بی‌آنکه در ادامهٔ حرکت هل داده شود مثالی از یک نوسان آزاد است، به طوری که نوسان‌های تاب، میرا و سرانجام متوقف می‌شود. ولی وقتی شخصی تاب را هل می‌دهد، او انرژی تلف شده بر اثر اصطکاک و مقاومت هوا را جبران می‌کند و مانع از میراشدن نوسان تاب می‌شود. اگر تاب را با بسامد طبیعی‌اش هل دهیم ($f_d = f_s$) دامنهٔ نوسان‌های تاب می‌تواند، افزایش زیادی داشته باشد. این واقعیتی است که کودکان در هنگام تاب بازی، با آزمون و خطا به سرعت به آن پی می‌برند. در چنین وضعیتی ($f_d = f_s$) اصطلاحاً گفته می‌شود که برای نوسانگر **تشدید** (رزونانس) رخ داده است. اگر بسامد نوسان واداشته کمتر یا بیشتر از بسامد طبیعی نوسانگر باشد ($f_d \neq f_s$) دامنهٔ نوسان کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که تشدید رخ می‌دهد. پدیدهٔ تشدید را می‌توان با فعالیت سادهٔ زیر بررسی کرد.



شکل ۳-۹ با هل دادن تاب، کودک به نوسان واداشته می‌شود.

فعالیت ۳-۳



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

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

تمرین ۳-۳

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از، 0.4°m ، 0.8°m ، 1.2°m ، 2.8°m ، 3.5°m . فرض کنید میله دستخوش نوسان‌هایی افقی با بسامد زاویه‌ای در گستره $2^\circ/\text{rad/s}$ تا $4^\circ/\text{rad/s}$ بشود. کدام آونگ‌ها با دامنه بزرگ‌تری به نوسان درمی‌آیند؟ (توجه کنید گرچه تشدید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنه نوسان در نزدیک این بسامد همچنان بزرگ است).

پرسش ۲-۳

در پی زمین‌لرزه عظیمی (به بزرگی $8/1$ در مقیاس ریشتر) که در ساحل غربی مکزیک در سال ۱۹۸۵ اتفاق افتاد ساختمان‌های نیمه‌بلند فرو ریختند، ولی ساختمان‌های کوتاه‌تر و بلندتر پابرجا ماندند. علت این پدیده را توضیح دهید.



(ب)



(الف)

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

۳-۵ موج و انواع آن



شکل ۳-۱۰ با پرتاب سنگ در آب، فرو رفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.



هر گاه در ناحیه‌ای از یک محیط کشسان، ارتعاشی به‌وجود آید، موجب پدید آمدن ارتعاش‌های پی‌درپی دیگری می‌شود که از محل شروع ارتعاش دور و دورترند، و به این ترتیب آنچه را که **موج مکانیکی** می‌نامند به‌وجود می‌آید. معمولاً موج‌ها را به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: **موج‌های مکانیکی و موج‌های الکترومغناطیسی**. موج‌های مکانیکی – مانند موج‌های روی سطح آب (شکل ۳-۱۰) و موج‌های صوتی – برای انتشار خود به یک محیط مادی نیاز دارند، و موج‌های الکترومغناطیسی – مانند نور مرئی، موج‌های رادیویی و تلویزیونی، میکروموج و پرتوهای x – برای انتشار خود به محیط مادی نیاز ندارند، اما در محیط مادی نیز می‌توانند منتشر شوند.

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

اگر مانند شکل ۳-۱۱ یک سر فنر بلند کشیده شده‌ای را به‌سرعت به چپ و راست تکان دهید، موجی مطابق شکل در طول فنر منتشر می‌شود که به آن **تپ** می‌گویند. اگر سر آزاد فنر را مانند شکل ۳-۱۲ رو به بالا حرکت دهید، 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

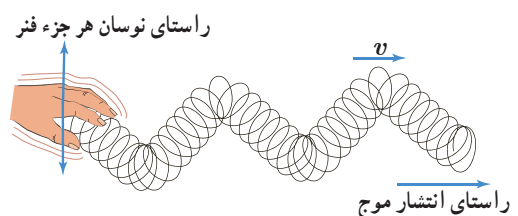
شکل ۳-۱۱ نمایش ایجاد موج در یک فنر بلند کشیده

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

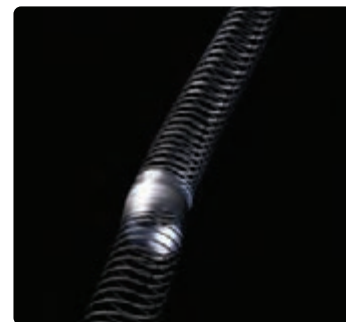
فتر موجب پایین کشیده شدن بخش‌های بعدی فتر می‌شود، و بدین ترتیب آشفتگی‌ای در شکل فتر ایجاد می‌شود که با تندی v در طول فتر حرکت می‌کند. اگر دست خود را پیایی به بالا و پایین حرکت دهید یک موج پیوسته با تندی v در طول فتر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فتر که در هنگام عبور موج به بالا و پایین نوسان می‌کند دقت کنید درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فتر، عمود 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، سر آزاد فتر را به جای اینکه به بالا و پایین یا به چپ و راست حرکت دهید، به سرعت به جلو و عقب ببرید، یک تپ در طول فتر به راه می‌افتد (شکل ۳-۱۳) و اگر دست خود را پیایی به جلو و عقب حرکت دهید یک موج طولی پیوسته با تندی v در طول فتر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فتر که در هنگام عبور این موج به چپ و راست نوسان می‌کند دقت کنید، درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فتر در راستای حرکت موج است (شکل ۳-۱۴). به همین دلیل است که به چنین موجی، موج طولی می‌گویند.

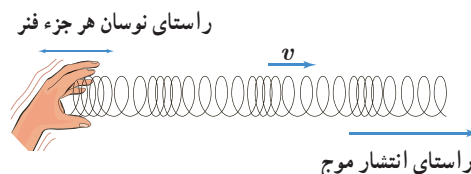
به موج‌های عرضی و طولی که تا اینجا بررسی شد، **موج‌های پیش‌رونده** گفته می‌شود. زیرا، هر دوی این موج‌ها از نقطه‌ای به نقطه دیگر حرکت کرده و انرژی را با خود منتقل می‌کنند. توجه کنید این موج است که از یک سر به سر دیگر حرکت می‌کند نه ماده‌ای (در مثال‌های بالا فتر) که موج در آن حرکت می‌کند. همچنین دریافتید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



شکل ۳-۱۲ در حالی که موج به سمت راست منتشر می‌شود هر جزء فتر عمود بر راستای انتشار موج، به بالا و پایین نوسان می‌کند.



شکل ۳-۱۳ نمایش ایجاد یک تپ طولی در یک فتر بلند کشیده شده



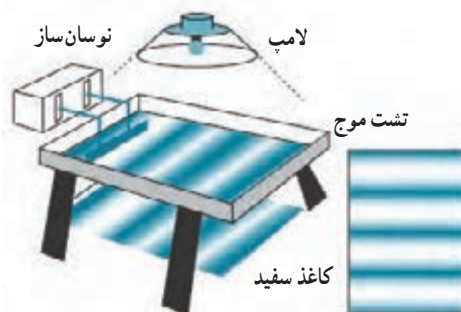
شکل ۳-۱۴ در حالی که موج به سمت راست حرکت می‌کند، هر حلقه فتر هم‌راستا با حرکت موج به چپ و راست نوسان می‌کند، به‌طوری‌که ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فتر ظاهر می‌شود.

پوشش 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 تپ طولی در یک فتر بلند کشیده شده، این ویژگی را توضیح دهید.

۳-۶ مشخصه‌های موج

برای مطالعه برخی از مشخصه‌های موج از وسیله‌ای موسوم به **تشت موج** استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این وسیله در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است. این وسیله شامل یک تشت شیشه‌ای کم‌عمق و یک نوسان‌ساز است. یک راه مشاهده رفتار موج، استفاده از سایه‌ای است که توسط لامپ از سطح آب داخل تشت بر ورقه کاغذی زیر تشت تشکیل می‌شود. برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های موج

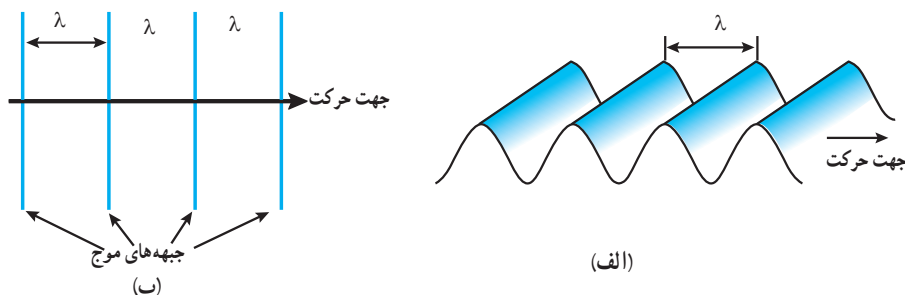


شکل ۳-۱۵ طرحی از دستگاه تشت موج



شکل ۳-۱۶ تشکیل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج

روی سطح آب، به وضوح در سایه تشکیل شده بر ورقه کاغذ دیده می‌شود. اگر مانند شکل ۳-۱۵، تیغه‌ای را بر سطح آب به نوسان درآوریم، موجی تخت بر سطح آب تشکیل می‌شود و اگر به جای تیغه از یک گوی کوچک استفاده کنیم به یک موج دایره‌ای می‌رسیم که از نقطه تماس با سطح آب در تمام جهت‌ها حرکت می‌کند (شکل ۳-۱۶). در هر دو حالت، به هر یک از برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های ایجاد شده روی سطح آب، یک **جبهه موج** می‌گویند. به برآمدگی‌ها، **قله** (ستیغ) و به فرورفتگی‌ها **دره** (پاستیغ) گفته می‌شود. فاصله بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، **طول موج** نامیده می‌شود و آن را با λ نشان می‌دهند (شکل ۳-۱۷). طول موج λ برابر با مسافتی است که موج در مدت دوره تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.



شکل ۳-۱۷ الف) طرحی از تشکیل جبهه‌های موج تخت بر سطح آب یک تشت موج. ب) جبهه‌های موج، روشی مناسب برای نمایش یک موج پیش‌رونده هستند. در رسم جبهه‌های موج معمولاً جبهه‌های مربوط به قله‌ها را رسم می‌کنند.

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

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

دوره تناوب (T): مدت زمانی که هر ذره محیط یک نوسان انجام می‌دهد دوره تناوب موج نامیده می‌شود که برابر با زمانی است که چشمه موج یک نوسان انجام می‌دهد.

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

تندی انتشار موج (v): اگر جبهه موج در مدت Δt مسافت L را طی کند، تندی انتشار موج از رابطه $v = \frac{L}{\Delta t}$ به دست می‌آید. از آنجا که طول موج λ در دوره T طی می‌شود، داریم:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad \text{(تندی انتشار موج)} \quad (۳-۹)$$

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

مثال ۳-۵

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تحت موج شکل ۳-۱۶ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دوره تناوب $1/10$ s در تشتی به عمق $2/5$ cm نوسان کند، فاصله بین دو برآمدگی مجاور $5/0$ cm و اگر در تشتی به عمق $3/5$ cm نوسان کند، این فاصله $6/0$ cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تشت در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

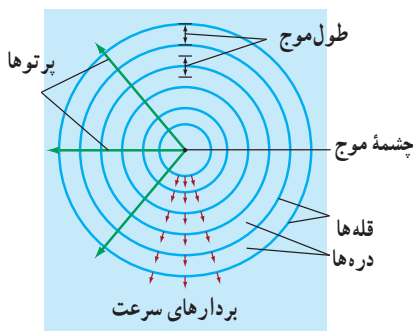
پاسخ: فاصله دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان طور که پیش تر گفتیم دوره تناوب موج برابر با دوره تناوب نوسان‌های چشمه موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطه ۳-۹ به دست می‌آوریم.

با قرار دادن $\lambda_1 = 5/0$ m و $T = 1/10$ s در رابطه ۳-۹ خواهیم داشت:

$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{5/0 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 5/0 \text{ m/s}$$

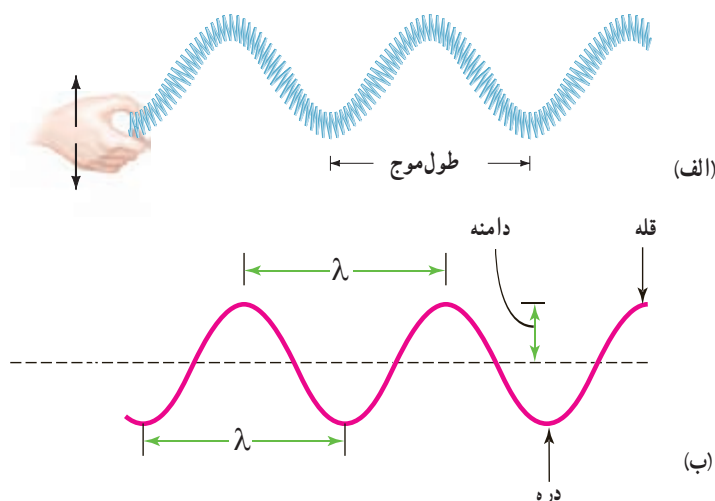
و با قرار دادن $\lambda_2 = 6/0$ m و $T = 1/10$ s در رابطه ۳-۹ خواهیم داشت:

$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{6/0 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 6/0 \text{ m/s}$$

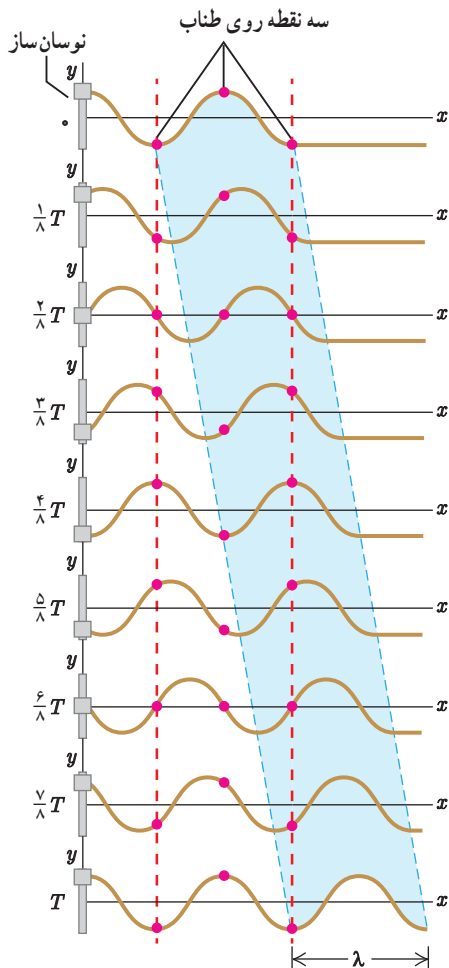


از این مثال درمی‌یابیم که تندی انتشار موج سطحی روی آب‌های کم عمق، به عمق آب که یکی از ویژگی‌های محیط انتشار موج است بستگی دارد.

موج عرضی و مشخصه‌های آن: اگر یک سر فنر بلند کشیده شده‌ای را با حرکت هماهنگ ساده، پیاپی به بالا و پایین حرکت دهید موج عرضی پیوسته‌ای در طول فنر منتشر می‌شود (شکل ۳-۱۸ الف). امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فنر، در هر لحظه از زمان انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۳-۱۸ ب مدل سازی کرد. در این شکل طول موج و دامنه این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.

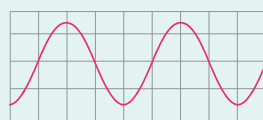


شکل ۳-۱۸ الف) یک موج عرضی در فنر کشیده شده و ب) مدل سینوسی برای این موج

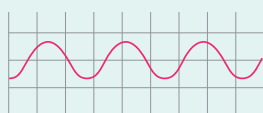


شکل ۳-۱۹: نُه عکس لحظه‌ای از یک موج عرضی منتشر شده در یک تار کشیده شده

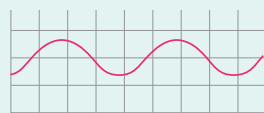
پرسش ۳-۴



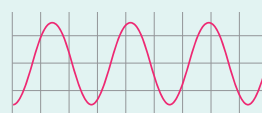
شکل روبه‌رو موجی عرضی را نشان می‌دهد. دامنه و طول موج هر کدام از شکل موج‌های الف، ب، و پ را با دامنه و طول موج این شکل مقایسه کنید.



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۹، نقش یک موج عرضی را در چند لحظه متفاوت در مدت یک دوره تناوب (T) نشان می‌دهد. در این مدت، هر ذره از محیط یک نوسان کامل انجام داده است و موج به اندازه یک طول موج (λ) پیشروی کرده است. بنابراین تندی انتشار موج عرضی نیز از همان رابطه ۳-۹ 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 کشیده به نیروی کشش (F) و چگالی خطی جرم ($\mu = m/L$) بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (۳-۱۰) \quad \text{(تندی انتشار موج عرضی در تار یا فنر)}$$

مثال ۳-۶



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

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۳-۱۰ تندی انتشار موج را به دست می‌آوریم. در اینجا $F = ۱/۲ \text{ N}$ است و چگالی خطی جرم برابر است با:

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

بنابراین تندی انتشار v چنین می‌شود:

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

ب) با استفاده از رابطه ۳-۹ بسامد f را به دست می‌آوریم:

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

تمرین ۳-۴



در سازهای زهی همانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شُل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت 0.628m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار $8/20^\circ$ و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار $32/3^\circ$ است. تارها تحت کششی برابر 226N قرار دارند. تندی انتشار موج در هر یک از این دو تار چقدر است؟

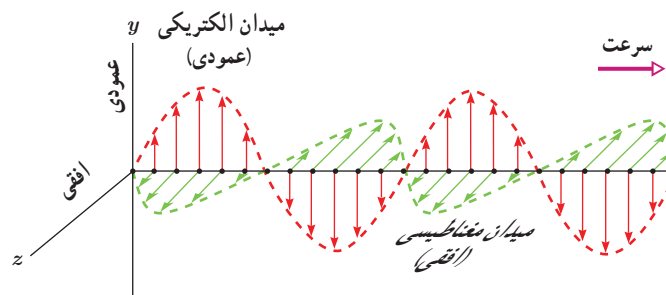
انتقال انرژی در موج عرضی: موج‌های پیش‌رونده، حامل انرژی هستند. وقتی در یک ریسمان یا فنر کشیده موجی عرضی را ایجاد می‌کنیم، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده‌ایم. با انتشار موج، این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می‌یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت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

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

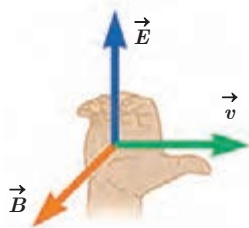


جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱-۱۸۷۹ م.)

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



شکل ۳-۲ یک تصویر لحظه‌ای از موجی الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد قائم (y) و میدان مغناطیسی در امتداد افقی (z) و انتشار موج در جهت x است.



شکل ۳-۲۱ قاعده دست راست برای یافتن جهت انتشار موج الکترومغناطیسی

چند مشخصه بارز چنین موجی به قرار زیر است :

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

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

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

جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان مطابق شکل ۳-۲۱ از قاعده دست راست تعیین کرد.

پرسش ۳-۵

در یک لحظه خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت $+z$ و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت $+y$ است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های $+x$ ، $+y$ و $+z$ را مانند شکل ۳-۲۰ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ به دست می‌آید، که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر $4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ و ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و برابر $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$ است. مقدار c با استفاده از این رابطه $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ می‌شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش‌تر توسط فیزیک‌دان فرانسوی آرماند لوئیس فیزو (۱۸۹۶-۱۸۱۹ 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 پُر بسامدی، آزمایش‌های مشهوری در تأیید نظریه ماکسول انجام داد. هرتز نشان داد که امواج رادیویی نیز با همان تندی نور مرئی در آزمایشگاه حرکت می‌کنند و این حاکی از سرشت یکسان امواج رادیویی و نور مرئی بود.

۴۰۰ nm	۴۵۰	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰	۷۰۰ nm
بنفش	آبی	سبز	زرد	نارنجی	قرمز	

مثال ۳-۷

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

پاسخ: نور یک نوع موج است و برای آن می‌توان از رابطه $v = f\lambda$ استفاده کرد. اما برای این موج v برابر با تندی نور است. بنابراین برای دو حد بالا و پایین بسامد طیف نور مرئی به ترتیب داریم:

$$f_{\text{بنفش}} = \frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{400 \times 10^{-9} \text{ m}} = 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_{\text{قرمز}} = \frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{700 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

تمرین ۳-۵



طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{1}{4}$ طول موج دریافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر $8/5\text{cm}$ باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می‌کند تعیین کنید.

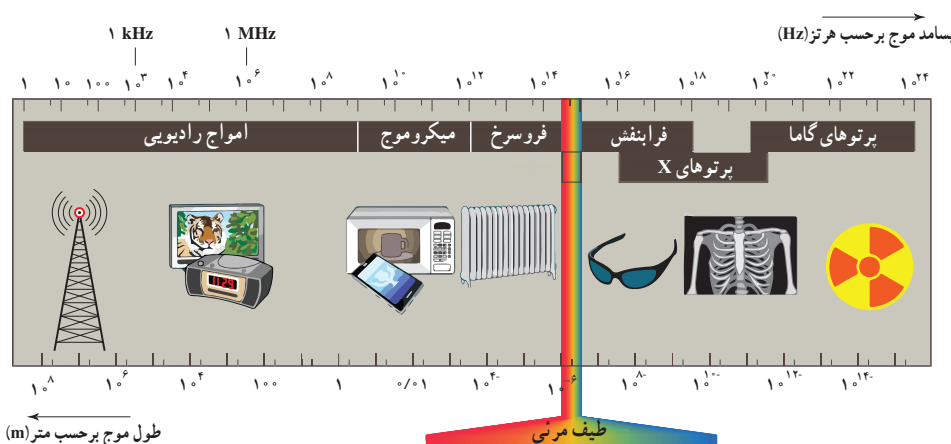
فعالیت ۳-۴



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

همان‌طور که پیش‌تر گفتیم امواج مکانیکی برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند. اما انتشار امواج الکترومغناطیسی به محیط مادی نیاز ندارد و این امواج، انرژی را نه به صورت انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ذرات محیط، بلکه به صورت انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می‌کنند. مثلاً کل انرژی دریافتی 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 100 میلیون گیگاوات (از مرتبه 10^{17} وات) است. جالب است که بدانید 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، فروسرخ، طیف نور مرئی، فرابنفش، پرتوهای X و پرتوهای گاما است، که از کمترین بسامد تا بیشترین بسامد گسترده شده‌اند (شکل ۳-۲۲). تمام این امواج به‌رغم تفاوت فراوان در روش‌های تولید و کاربردهای آنها، امواجی الکترومغناطیسی هستند و همگی با تندی نور در خلأ حرکت می‌کنند و هیچ گسستگی‌ای در این طیف وجود ندارد.

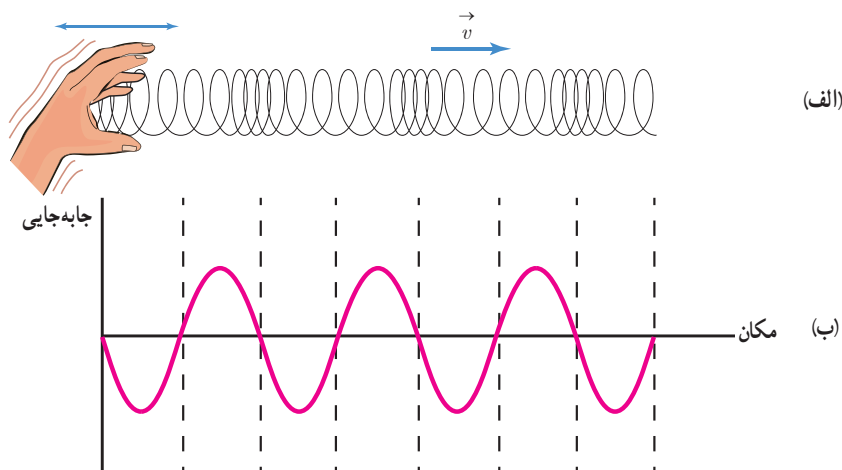


شکل ۳-۲۲ طیف امواج الکترومغناطیسی

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

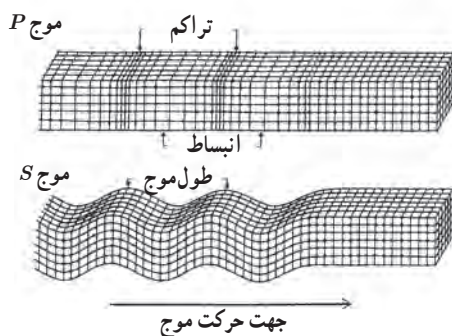
موج طولی و مشخصه‌های آن: در انتشار موج طولی در یک فنر بلند کشیده شده دیدیم که با انتشار موج، ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شوند. برای اینکه این موج را مدل‌سازی کنیم لازم است ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان‌هایی که بیشترین جمع‌شدگی یا بیشترین بازشدگی حلقه‌ها رخ می‌دهد، جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل برابر صفر است. در وسط فاصله بین یک جمع‌شدگی پیشینه و یک بازشدگی پیشینه مجاور هم، اندازه جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل، پیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای فنر شکل ۳-۲۳ الف، نمودار جابه‌جایی - مکان شکل ۳-۲۳ 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 (برای فنر، جمع‌شدگی) یا دو انبساط (برای فنر، بازشدگی) متوالی است. همچنین دامنه موج طولی برابر با پیشینه جابه‌جایی از مکان تعادل است.

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



شکل ۳-۲۳ الف) تصویری لحظه‌ای از ایجاد نواحی جمع‌شدگی و بازشدگی در طول یک فنر بلند کشیده، هنگام انتشار موج طولی سینوسی در فنر ب) نمودار جابه‌جایی - مکان برای موج ایجاد شده در فنر

مثال ۳-۸



امواج لرزه‌ای^۱ موج‌های مکانیکی‌ای هستند که از لایه‌های زمین عبور می‌کنند. یکی از منشأهای مهم امواج لرزه‌ای، زمین لرزه‌ها هستند. دو نوع از امواج لرزه‌ای، امواج اولیه^۲ P و امواج ثانویه^۳ S هستند. امواج P، امواجی طولی و امواج S امواجی عرضی هستند. معمولاً تندی موج‌های P در حدود ۸/۰ km/s و تندی موج‌های S در حدود ۴/۵ km/s است. یک دستگاه لرزه‌نگار^۴ موج‌های P و S حاصل از یک زمین لرزه را ثبت می‌کند. فرض کنید نخستین امواج P، ۳/۰ دقیقه پیش از نخستین امواج S دریافت شوند.

اگر این موج‌ها روی خط راستی حرکت کنند، زمین لرزه در چه فاصله‌ای از محل لرزه‌نگار رخ داده است؟

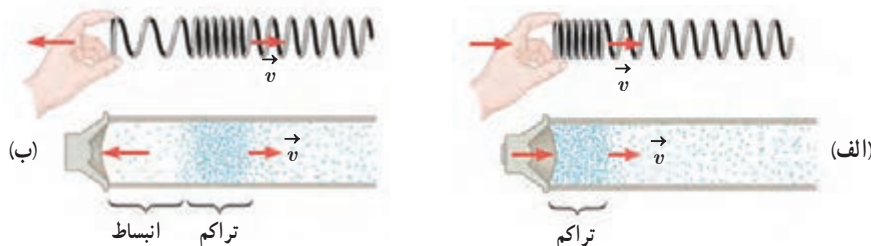
پاسخ: نخست با استفاده از رابطه $\Delta x = v \Delta t$ که در فصل ۱ آموختیم، زمان پیمودن هر یک از دو موج را می‌یابیم. اگر تندی موج S را با v_s و تندی موج P را با v_p نشان دهیم، اختلاف زمان رسیدن این دو موج چنین می‌شود:

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

و از آنجا Δx را به دست می‌آوریم

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

موج صوتی: صوت یک موج طولی است که توسط جسمی مرتعش از قبیل سیم گیتار، پرده‌های صوتی حنجره انسان، دیافراژن، و یا پوسته‌های مرتعشی مانند صفحه مرتعش (دیافراگم) یک بلندگو، تولید می‌شود، که اصطلاحاً به اینها چشمه صوت گفته می‌شود. وقتی یک چشمه صوت مرتعش می‌شود، معمولاً صوت ایجاد شده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. افزون بر این، صوت فقط در محیط‌های مادی مانند گاز، مایع، یا جامد می‌تواند ایجاد و منتشر شود. امواج صوتی به دلیل طبیعت طولی خود، مثل موج طولی ایجاد شده در یک فنر کشیده، در مقایسه با بازشدگی‌ها و جمع‌شدگی‌های فنر، از مجموعه‌ای از تراکم‌ها و انبساط‌ها تشکیل شده‌اند؛ مثلاً با ارتعاش دیافراگم یک بلندگو، موجی صوتی ایجاد می‌شود. حرکت رو به بیرون دیافراگم، هوای جلوی آن را متراکم می‌کند. این تراکم که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود مشابه ناحیه جمع‌شدگی در یک فنر کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳-۲۴ الف). پس از تولید یک ناحیه متراکم، دیافراگم حرکتش



شکل ۳-۲۴ الف) با حرکت رو به بیرون دیافراگم، یک تراکم ایجاد می‌شود. **ب)** با حرکت رو به داخل دیافراگم، یک انبساط ایجاد می‌شود. این تراکم و انبساط شبیه به جمع‌شدگی و بازشدگی در یک فنر بلند است.

۱- Seismic Waves
۳- Secondary Waves

۲- Primary Waves
۴- Seismograph



شکل ۳-۲۵ در حالی که موج از بلندگو به سمت شنونده حرکت می‌کند، مولکول‌های هوا در جای خود نوسان می‌کنند.

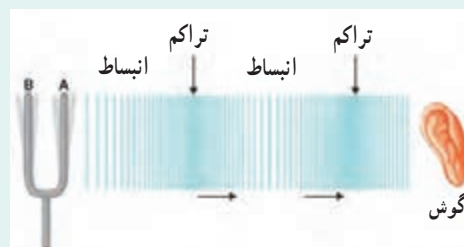
جدول ۳-۱: تندی صوت در محیط‌های مختلف

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

* فشار همه گازها ۱ atm است.

را برعکس می‌کند و به سمت داخل می‌رود. حرکت رو به داخل دیافراگم، هوای جلوی آن را منبسط می‌کند. این انبساط که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود، مشابه ناحیهٔ بازشدگی در یک فنر کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳-۲۴ ب). توجه کنید، در حالی که موج از بلندگو به شنونده می‌رسد، هر مولکول هوا، با موج حرکت نمی‌کند، بلکه در مکان ثابتی به جلو و عقب نوسان می‌کند (شکل ۳-۲۵).

پوشش ۳-۶



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 $v = f\lambda$ به بسامد و طول موج مربوط می‌شود و به ویژگی‌های فیزیکی محیط بستگی دارد.

اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که عموماً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، گرچه استثنائاتی نیز وجود دارد. جدول ۳-۱ تندی صوت را در تعدادی از گازها، مایع‌ها و جامدها نشان می‌دهد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تندی صوت افزون بر جنس محیط به دما نیز بستگی دارد و از این رو معمولاً تندی صوت در مواد، همراه با دمای متناظر آنها نوشته می‌شود.

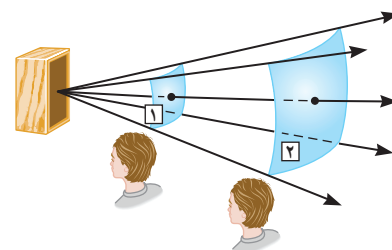
فعالیت ۳-۶

اندازه‌گیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس^۱ متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری کند. وقتی چکش را به صفحه فلزی بکوبیم، 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 اندازه 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 اندازه بگیرید.



تمرین ۳-۶

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



شکل ۳-۲۶ با انتشار صوت از چشمه، انرژی به‌طور عمود، نخست از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می‌گذرد.

شدت و تراز شدت صوت : انتشار صوت از هر چشمه صوتی همراه با انتقال بی‌دری انرژی از ناحیه‌ای از محیط به ناحیه‌ای دیگر از آن است. در واقع چشمه صوت، این انرژی را با به حرکت درآوردن لایه‌ای از محیط که در تماس مستقیم با چشمه است به محیط می‌دهد. انرژی از این لایه به لایه بعدی و از آنجا به لایه‌های بعدی دیگر منتقل و در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی‌ای است که توسط موج به واحد سطح، عمود بر راستای انتشار صوت می‌رسد یا از آن عبور می‌کند (شکل ۳-۲۶).

$$I = \frac{P_{av}}{A} \quad (\text{شدت صوت}) \quad (۱۱-۳)$$

که در آن P_{av} آهنگ متوسط انتقال انرژی و A مساحت سطحی است که صوت با آن برخورد می‌کند. بنابراین یکای شدت صوت، وات بر مترمربع (W/m^2) است. شدت صوت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری شدت صوت‌های مختلف در می‌یابیم نسبت شدت‌های صوت در گستره شنوایی انسان می‌تواند در حدود 10^{12} باشد (جدول ۳-۲). برای بررسی چنین گستره وسیعی از شدت‌ها راحت‌تر آن است که از لگاریتم^۱ (در پایه ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به جای شدت I یک موج صوتی، ساده‌تر این است که از **تراز شدت صوت (تراز صوتی)** که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم :

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (\text{تراز شدت صوت}) \quad (۱۲-۳)$$

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۸۴۷-۱۹۲۲ م.) انتخاب شده است. همچنین I_0 شدت مرجع (10^{-12} W/m^2) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گستره شنیداری انسان است. یک موج صوتی با شدت $I = I_0$ تراز شدت صوتی برابر ۰ dB دارد. جدول ۳-۲، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

جدول ۳-۲ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

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

۱- در این درس از آنچه در مورد لگاریتم در درس ریاضی خوانده‌اید، استفاده می‌شود. مرور این بحث می‌تواند به

مثال ۳-۹

تراز شدت صوت یک مخلوط کن که انتشار صوت آن به صورت شکل ۳-۲۶ است در سطح ۲، 80 dB است. الف) شدت این صدا چقدر است؟ ب) اگر مساحت سطح ۲، برابر 4 m^2 باشد، آهنگ متوسط انتقال انرژی از این سطح را محاسبه کنید. پاسخ: با استفاده از رابطه ۳-۱۲ داریم:

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log (I/I_0) \Rightarrow 80 \text{ dB} = (10 \text{ dB}) \log (I/I_0) \Rightarrow \log (I/I_0) = 8 \quad \text{الف)}$$

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

$$I = \frac{P_{av}}{A} \Rightarrow P_{av} = IA = (10^{-4} \text{ W/m}^2) (4 \text{ m}^2) = 4 \times 10^{-4} \text{ W} \quad \text{ب)}$$

تمرین ۳-۷

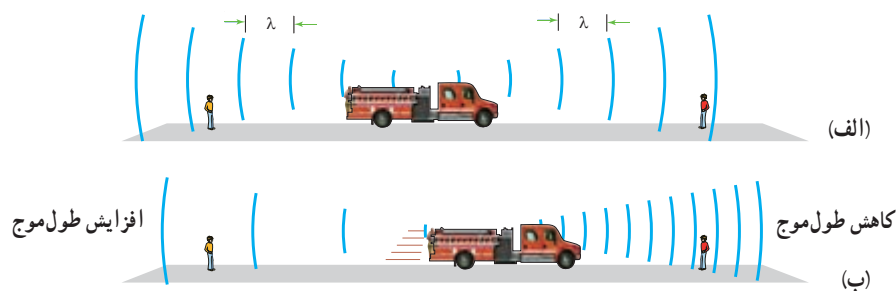
با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد 100 برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

ادراک شنوایی: وقتی دیاپازونی را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی‌داریم، دیاپازون نوسان‌هایی انجام می‌دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین چشمه‌هایی **تُن موسیقی** یا به اختصار **تُن** گفته می‌شود. با شنیدن هر تُن، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت: **ارتفاع**^۲ و **بلندی**^۳ آن. ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک شنوایی ما مربوط می‌شوند. ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می‌کند؛ مثلاً اگر چند دیاپازون با بسامدهای مختلف به طور یکسان نواخته شوند بسامد آنها را می‌توان از کمترین تا بیشترین مقدار تشخیص داد. اما بلندی، شدتی است که گوش انسان از صوت درک می‌کند. اگر یک دیاپازون با بسامد مشخص را با ضربه‌هایی متفاوت به ارتعاش واداریم، با آنکه بسامد صدایی که می‌شنویم تغییر نمی‌کند، اما صداهایی با بلندی متفاوت را حس می‌کنیم که این به شدت ضربه‌ها بستگی دارد. بلندی متفاوت با شدت است. شدت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت، در حالی که بلندی چیزی است که شما حس می‌کنید. دستگاه شنوایی انسان به بسامدهای متفاوت حساسیت‌های متفاوتی نشان می‌دهد، به طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهایی در گستره 2000 Hz تا 5000 Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن تُن‌های صدای 20 Hz تا $20,000 \text{ Hz}$ است.

اثر دوپلر: فرض کنید یک ماشین آتش‌نشانی در حالی که آژیر آن روشن است در کنار خودروی شما متوقف باشد. شما همان بسامدی را از آژیر می‌شنوید که راننده ماشین آتش‌نشانی می‌شنود. ولی اگر خودروی شما به ماشین آتش‌نشانی نزدیک و یا از آن دور شود، بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. همچنین اگر خودروی شما ساکن باشد و ماشین آتش‌نشانی به شما نزدیک و سپس از شما دور شود باز هم بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. اینها مثال‌هایی از اثر دوپلر است که به افتخار کاشف

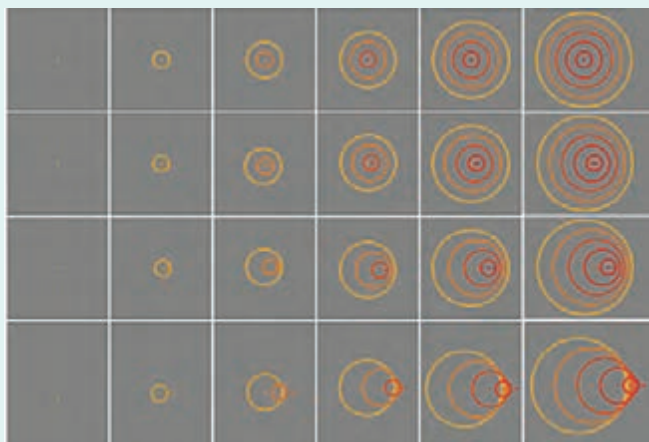
آن یوهان کریستین دوپلر (۱۸۵۳-۱۸۰۳ م.) فیزیک‌دان اتریشی، نام‌گذاری شده است. اثر دوپلر نه تنها برای امواج صوتی بلکه برای امواج الکترومغناطیسی، مانند میکروموج‌ها، موج‌های رادیویی و نور مرئی نیز برقرار است. ما در اینجا نخست امواج صوتی را در نظر می‌گیریم و به عنوان دو حالت خاص، وضعیت‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آنها چشمه صوتی به شنونده ساکن نزدیک و یا از او دور شود، و یا شنونده به چشمه صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود.^۱

الف) چشمه متحرک و ناظر (شنونده) ساکن: شکل ۲۷-۳ الف، جبهه‌های موج حاصل از صدای آژیر یک ماشین آتش‌نشانی ساکن را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود فاصله این جبهه‌ها از هم، در جلو و عقب ماشین یکسان است، ولی اگر ماشین آتش‌نشانی مثلاً به جلو حرکت کند، فاصله جبهه‌های موج در جلوی ماشین کمتر از پشت آن خواهد بود (شکل ۲۷-۳ ب). بنابراین اگر ناظر ساکنی را روبه‌روی 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) وقتی ماشین ساکن است تجمع جبهه‌های موج در جلو و عقب ماشین یکسان است. (ب) با حرکت رو به جلوی ماشین، تجمع جبهه‌های موج در جلوی ماشین بیشتر و در عقب آن کمتر می‌شود.

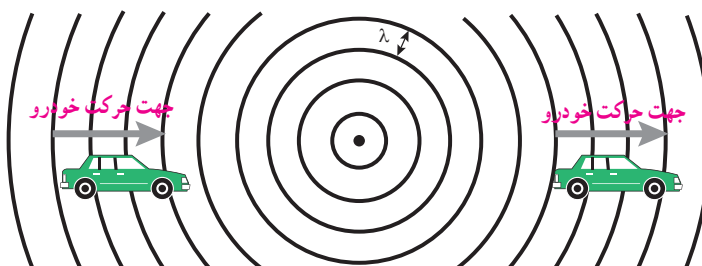
پرسش ۲-۳



- (الف) در هر ردیف شکل روبه‌رو، جبهه‌های موج متوالی حاصل از یک چشمه را می‌بینید.
- (ب) الف) تندی چشمه‌ها را با هم مقایسه کنید.
- (ب) تندی هر چشمه را با تندی صوت مقایسه کنید.
- (ت)

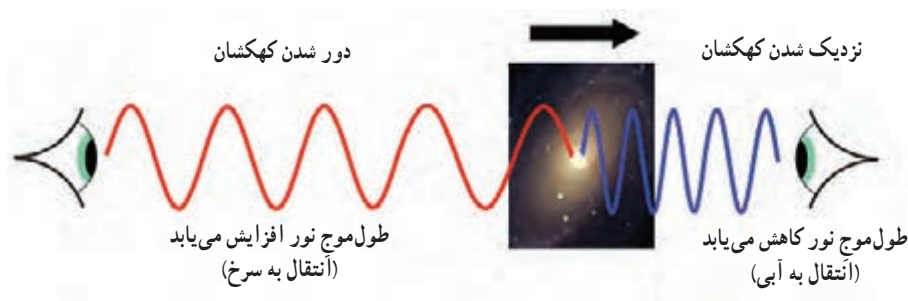
۱- روابط و محاسبات مربوط به اثر دوپلر خارج از برنامه درسی است و نباید در ارزشیابی لحاظ شود.

ب) چشمه ساکن و ناظر (شنونده) متحرک: در این حالت تجمع جبهه‌های موج در دو سوی چشمه یکسان است. اگر ناظر به طرف چشمه حرکت کند، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود که این منجر به افزایش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود. در 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 خودرویی که به چشمه ساکن صوت نزدیک می‌شود با جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که خودرویی که از این چشمه دور می‌شود با جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای موج‌های الکترومغناطیسی همانند نور یا امواج رادیویی نیز اثر دوپلر برقرار است، ولی بررسی آن با اثر دوپلر در صوت متفاوت است. هر گاه چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابه‌جایی دوپلری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصد‌های نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری سماوی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلری نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها به دست آورد. این جابه‌جایی دوپلری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سماوی نسبت به ناظر (آشکارساز) است. وقتی چشمه نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً *انتقال به سرخ*^۱ می‌گویند و وقتی چشمه نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً *انتقال به آبی*^۲ می‌گویند (شکل ۲۹-۳).



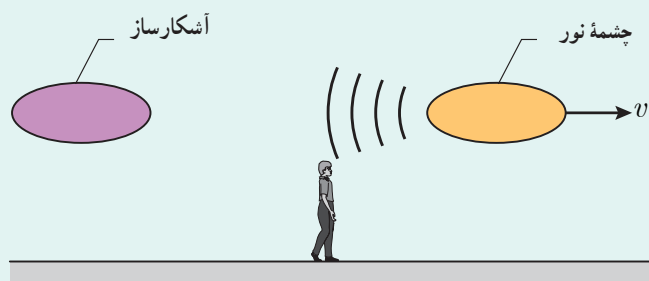
شکل ۲۹-۳ اگر کهکشان به ما نزدیک یا از ما دور شود، بسامد و طول موج دریافتی از آن تغییر می‌کند.

۱- Red Shift

۲- Blue Shift

پرسش ۳-۸

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



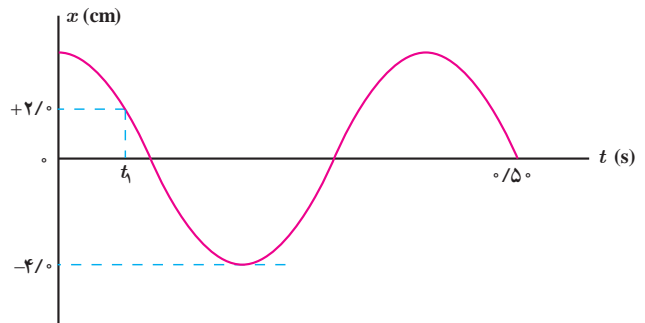
همچنین همان‌طور که در فصل بعد خواهید دید، می‌توان با ارسال یک موج الکترومغناطیسی به سوی خودرویی در حال حرکت و دریافت بازتاب این موج و در نظر گرفتن اثر دوپلر، تندی خودرو را به دست آورد؛ روشی که در دوربین‌های پلیس برای کنترل تندی خودروها در جاده‌ها به کار می‌رود (شکل ۳-۳۰).



شکل ۳-۳۰ تعیین تندی خودروها به کمک اثر دوپلر

۱-۳ و ۲-۳ نوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده

۱. یک وزنه 2 N را از انتهای یک فنر قائم می‌آویزیم، فنر 2 cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنه 5 N متصل است روی میز بدون اصطکاک به نوسان درمی‌آوریم. دوره تناوب این نوسان چقدر است؟
۲. هرگاه جسمی به جرم m به فنری متصل شود و به نوسان درآید، با دوره تناوب 2 s نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم 2 kg افزایش یابد، دوره تناوب 3 s می‌شود. مقدار m چقدر است؟
۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن 1600 kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت 10^4 N/m سوار شده است. دوره تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از چاله‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکنواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.
۴. دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده 10^{-2} m و بسامد آن 5 Hz هرتز است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را در یک دوره رسم کنید.
۵. نمودار مکان-زمان نوسانگر جرم-فنی مطابق شکل زیر است:
الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید.
ب) مقدار t_1 را به دست آورید.
پ) اندازه شتاب نوسانگر را در لحظه t_1 محاسبه کنید.



۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

۴. دامنه نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت 74 N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با 8 cm است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، 10^{-2} J باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم 1 kg به فنری افقی با ثابت 6 N/cm متصل است. فنر به اندازه 9 cm فشرده و سپس رها می‌شود و جسم روی سطح افقی شروع به نوسان می‌کند. با چشم‌پوشی از اصطکاک الف) دامنه نوسان و تندی بیشینه جسم چقدر است؟
ب) وقتی تندی جسم $1/6\text{ m/s}$ است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۸. معادله حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به صورت $x = (0.05\text{ m})\cos 2\pi t$ است.
الف) در چه زمانی، پس از لحظه صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به بیشترین مقدار خود می‌رسد؟
ب) در چه زمانی، پس از لحظه صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به صفر می‌رسد؟
پ) تندی نوسانگر چقدر باشد تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

۹. الف) ساعتی آونگ‌دار (با آونگ ساده) در تهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه‌ای در استوا برده شود، عقب می‌افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلوافتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟
($g_{\text{استوا}} = 9.78\text{ m/s}^2$ و $g_{\text{تهران}} = 9.80\text{ m/s}^2$)
ب) به نظر شما آیا با افزایش دما، یک ساعت آونگ‌دار جلو می‌افتد یا عقب؟

۴-۳ تشدید

۱. هر فرد معمولاً با چرخش اندک بدنش به چپ و راست، راه می‌رود و بدین ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود 5 Hz دارند. لرزش شدید پل هوایی میلینیوم^۱ در آغاز هزاره جدید را به عبور منظم گروهی از افراد از این پل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب چنین لرزشی شده باشد؟

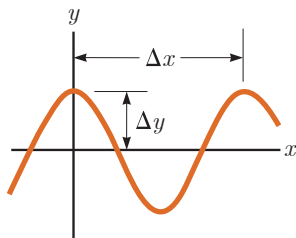


۱- Millennium bridge

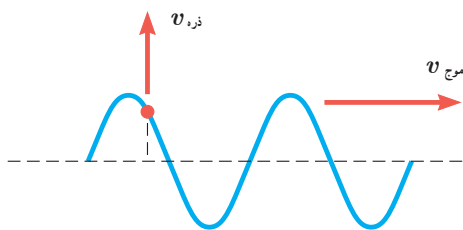
۱۴. در نمودار جابه‌جایی - مکان موج عرضی شکل زیر

نوسان در آوردن آونگ X، آونگ‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟

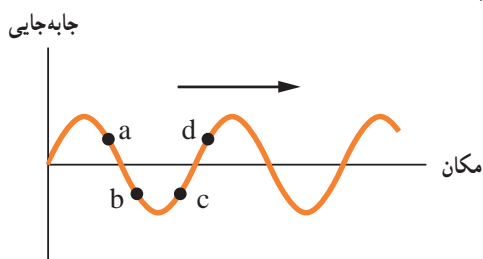
چشمه $8/0^\circ \text{ Hz}$ باشد، طول موج، دامنه، تندی و دوره تناوب موج چقدر است؟



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

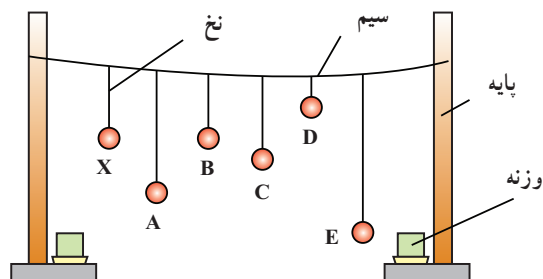


۱۶. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه‌ای از زمان نشان می‌دهد که در جهت محور x در طول ریسمان کشیده شده‌ای حرکت می‌کند. چهار جزء از این ریسمان روی شکل نشان داده شده‌اند. در این لحظه هر یک از این چهار جزء بالا می‌روند یا پایین؟



۱۷. سیمی با چگالی $7/8^\circ \text{ g/cm}^3$ و سطح مقطع 5° mm^2 بین دو نقطه با نیروی 156 N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.

۱۱. مطابق شکل چند آونگ را از سیمی آویخته ایم. توضیح دهید با به نوسان در آوردن آونگ X، آونگ‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟



۳-۵ و ۳-۶ موج و انواع آن، و مشخصه‌های موج

۱۲. یک نوسان ساز موج‌هایی دوره‌ای در یک ریسمان کشیده ایجاد می‌کند.

الف) با افزایش بسامد نوسان ساز کدام یک از کمیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول موج موج.

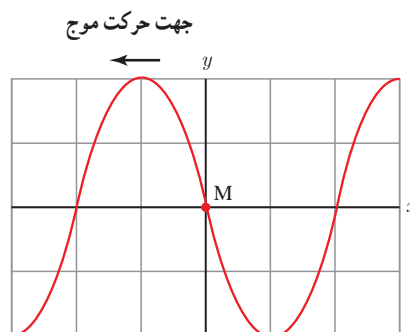
ب) حال اگر به جای افزایش بسامد، کشش ریسمان را افزایش دهیم، هر یک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول موج موج.

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

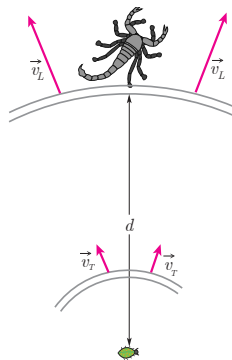
الف) با رسم این موج در زمان $T/4$ بعد، نشان دهید جزء M ریسمان در این مدت در چه جهتی حرکت کرده است. همچنین روی این موج، دامنه موج و طول موج را نشان دهید.

ب) اگر طول موج 5° cm و تندی موج 1° cm/s باشد، بسامد موج را به دست آورید.

پ) تعیین کنید موج در مدت $T/4$ چه مسافتی را پیموده است؟



که در سطح ماسه منتشر می‌شوند، بر دو نوع اند: امواج عرضی با تندی $v_T = 50 \text{ m/s}$ و امواج طولی با تندی $v_L = 150 \text{ m/s}$. عقرب ماسه‌ای می‌تواند با استفاده از اختلاف زمانی بین زمان رسیدن این امواج به نزدیک‌ترین پای خود، فاصله خود از طعمه را تعیین کند. اگر این اختلاف زمان برابر $\Delta t = 4 \text{ ms}$ باشد، طعمه در چه فاصله‌ای از عقرب قرار دارد؟



۱۳. توضیح دهید کدام یک از عامل‌های زیر بر تندی صوت در هوا مؤثر است.

(الف) شکل موج (ب) دامنه موج (پ) بسامد موج (ت) دمای هوا **۱۴.** در سونوگرافی معمولاً از کاوه‌ای^۱ دستی موسوم به تراگذار فراصوتی^۲ برای تشخیص پزشکی استفاده می‌شود که دقیقاً روی ناحیه موردنظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می‌شود. این کاوه در بسامد $6/7 \text{ MHz}$ عمل می‌کند. (الف) بسامد زاویه‌ای در این کاوه نوسان چقدر است؟ (ب) اگر تندی موج صوتی در بافتی نرم از بدن 1500 m/s باشد، طول موج این موج در این بافت چقدر است؟



^۱— probe

^۲— Ultrasonic Transducer

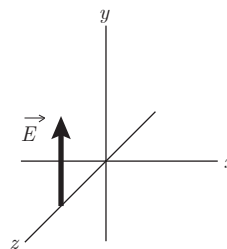
۱۸. شکل زیر طیف موج‌های الکترومغناطیسی را بدون در نظر گرفتن مقیاس نشان می‌دهد.

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

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

T	S	R	Q	P	پرتوهای x	پرتوهای γ

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



۲۰. (الف) طول موج نور نارنجی در هوا حدود $6/20 \times 10^{-7} \text{ m}$ است، بسامد این نور چند هرتز است؟

(ب) بسامد نور قرمز در حدود $4/30 \times 10^{14} \text{ Hz}$ است. طول موج این نور را در هوا و آب حساب کنید. (سرعت نور را در هوا $3/0 \times 10^8 \text{ m/s}$ و در آب $2/25 \times 10^8 \text{ m/s}$ فرض کنید.)

۲۱. چشمه موجی با بسامد 10 Hz در یک محیط که تندی انتشار موج در آن 100 m/s است، نوسان‌هایی طولی ایجاد می‌کند. اگر دامنه نوسان‌ها $4/0 \text{ cm}$ باشد،

(الف) فاصله بین دو تراکم متوالی این موج چقدر است؟

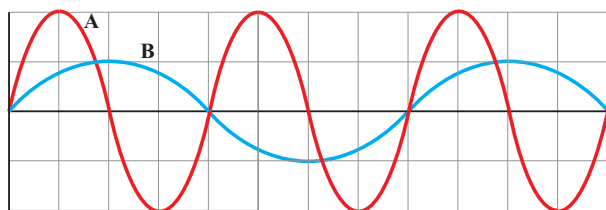
(ب) فاصله بین یک تراکم و یک انبساط متوالی چقدر است؟

۲۲. عقرب‌های ماسه‌ای وجود طعمه را با امواجی که بر اثر حرکت طعمه در ساحل شنی ایجاد می‌شود، احساس می‌کنند. این امواج

می‌شود. فرض کنید صوت به‌طور یکنواخت 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 $I = 10^{-10} \text{ W/m}^2$ به شنونده‌ای برسد که به فاصله $r_1 = 64 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد، این صوت به شنونده‌ای که در فاصله $r_2 = 16 \text{ m}$ از

محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟

۳۱. نمودار جابه‌جایی - 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.



۳۲. شکل زیر جهت‌های حرکت یک چشمه صوتی و یک ناظر (شنونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

چشمه	ناظر (شنونده)	
•	•	(الف)
•→	•	(ب)
←•	•	(پ)
•	•→	(ت)
•	←•	(ث)
•→	←•	(ج)
←•	•→	(ح)

بسامدی را که ناظر در حالت‌های مختلف می‌شنود با حالت الف مقایسه کنید.

۳۵. تندی صوت در یک فلز خاص، برابر $v_{\text{فلز}}$ است. به یک سر لوله توخالی بلندی از جنس این فلز به طول L ضربه محکمی می‌زنیم. شنونده‌ای که در سر دیگر این لوله قرار دارد دو صدا را می‌شنود. یکی ناشی از موجی است که از دیواره لوله می‌گذرد و دیگری از موجی است که از طریق هوای داخل لوله عبور می‌کند.

(الف) اگر تندی صوت در هوا $v_{\text{هوا}}$ باشد، بازه زمانی Δt بین دریافت این دو صدا در گوش شنونده چقدر خواهد بود؟

(ب) اگر $\Delta t = 1/10 \text{ s}$ و فلز از جنس فولاد باشد، طول L لوله چقدر است؟ ($v_{\text{هوا}} = 340 \text{ m/s}$)

۳۶. موجی صوتی با توان 10^{-4} W از دو صفحه فرضی شکل ۲۶-۳ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به ترتیب $A_1 = 4 \text{ m}^2$ و $A_2 = 12 \text{ m}^2$ باشد، شدت صوت در دو سطح را تعیین کنید و توضیح دهید چرا شنونده در محل صفحه دوم، صدا را آهسته‌تر می‌شنود.

۳۷. شدت صدای حاصل از یک مته سنگ‌شکن در فاصله 10 m از آن 10^{-2} W/m^2 است. تراز شدت صوتی آن برحسب dB چقدر می‌شود؟

۳۸. اگر به مدت 10 دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت 120 dB باشیم، آستانه شنوایی به‌طور موقت از 28 dB افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که به‌طور متوسط اگر به مدت 10 سال در معرض صدایی با تراز شدت 92 dB قرار گیریم، آستانه شنوایی به‌طور دائم به 28 dB افزایش می‌یابد. شدت‌های صوت مربوط به 28 dB و 92 dB چقدر است؟ (راهنمایی: برای پاسخ دادن لازم است از ماشین حساب مناسب استفاده کنید.)

۳۹. یک دستگاه صوتی، صدایی با تراز شدت $\beta_1 = 90 \text{ dB}$ و دستگاه صوتی دیگر، صدایی با تراز شدت $\beta_2 = 95 \text{ dB}$ ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این دو تراز (برحسب W/m^2) به ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_2/I_1 را تعیین کنید.

۳۰. در یک آتش‌بازی، موشکی در بالای آسمان منفجر

برهم کنش های موج



در این تصویر نقشی شگفت انگیز از امواج دریا موسوم به دریای شطرنجی (Cross Sea) را می بینید. این نقش افسون کننده چگونه ممکن است ایجاد شده باشد؟

بخش ها

- ۱-۴ بازتاب موج
- ۲-۴ شکست موج
- ۳-۴ پراش موج
- ۴-۴ تداخل امواج

آیا تاکنون پژواک صدای خود را شنیده‌اید؟ پژواک نمونه‌ای از بازتاب امواج مکانیکی است. برخی از جانداران نظیر خفاش از همین ویژگی برای یافتن مسیر خود یا طعمه استفاده می‌کنند (شکل ۱-۴). امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) نیز بازمی‌تابند. در واقع همان‌طور که در علوم هشتم آموختیم، وقتی نور بازتابیده از جسمی به چشم ما برسد، آن جسم را می‌بینیم. بازتاب، تنها راه برهم‌کنش امواج با محیط نیست. شکست نیز نوع دیگری از برهم‌کنش امواج با محیط است.



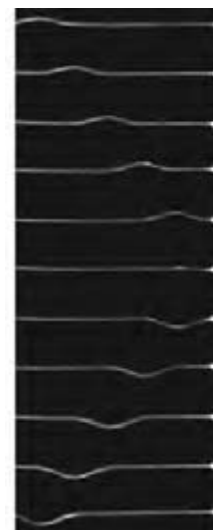
شکل ۱-۴ خفاش برای یافتن طعمه از پژواک موج صوتی خود استفاده می‌کند. **شکل ۲-۴** شکارچیان بومی آمریکای جنوبی به تجربه دریافته‌اند که محل واقعی یک ماهی متفاوت با محلی است که آن را می‌بینند.

شکست وقتی رخ می‌دهد که جهت پیشروی موج در ورود به یک محیط جدید تغییر کند. وقتی یک ماهی را از بالای برکه‌ای می‌بینید، آن را در مکان واقعی خود مشاهده نمی‌کنید، بلکه مکانی ظاهری بر اثر شکست نور را ادراک می‌کنید (شکل ۲-۴). همان‌طور که خواهیم دید، شکست برای امواج مکانیکی نیز رخ می‌دهد. پراش نیز نوع دیگری از برهم‌کنش امواج با محیط است. امواج نه تنها با محیط بلکه با یکدیگر نیز برهم‌کنش می‌کنند. تداخل نمونه‌ای از برهم‌کنش امواج با یکدیگر است. در این فصل، بازتاب، شکست، پراش و تداخل را به‌عنوان برهم‌کنش‌های امواج بررسی می‌کنیم.

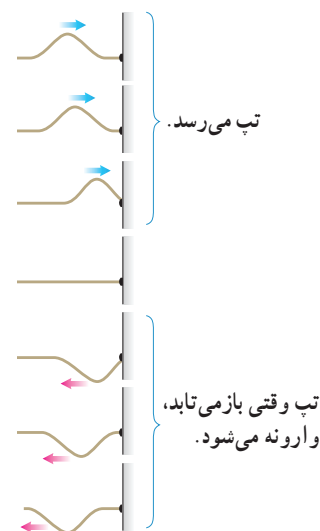
۱-۴ بازتاب موج

تولید صدا در آلات موسیقی، پژواک صداها، دیدن ماه، دیدن صفحه‌ای کتاب، گرم شدن مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی، جمع شدن امواج رادیویی در کانون آنتن‌های بشقابی و... مثال‌هایی از کاربرد بازتاب امواج در زندگی هستند. در این بخش، نخست بازتاب امواج مکانیکی و سپس بازتاب امواج الکترومغناطیسی را بررسی می‌کنیم.

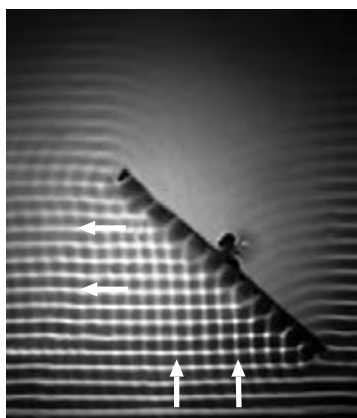
بازتاب امواج مکانیکی: اگر تپی را در یک فنر (یا یک ریسمان) کشیده بلند که یک سر آن بر تکیه‌گاهی ثابت شده است روانه کنیم، وقتی تپ به تکیه‌گاه (مرز) می‌رسد نیرویی به آن وارد می‌کند و طبق قانون سوم نیوتون، تکیه‌گاه نیز نیرویی با اندازه برابر و در جهت مخالف بر فنر وارد می‌آورد. این نیرو در محل تکیه‌گاه، تپی در فنر ایجاد می‌کند که روی فنر در جهت مخالف تپ تابیده حرکت می‌کند (شکل ۳-۴). شکل ۴-۴ طرحی واضح‌تر از تابش و بازتابش چنین تپی را نشان می‌دهد. چنین بازتابی را بازتاب در یک بُعد می‌گویند.



شکل ۳-۴ چند تصویر لحظه‌ای متوالی از پیشروی و بازتاب یک تپ عرضی در یک فنر بلند کشیده شده که یک سر آن در تکیه‌گاهی واقع در سمت راست، ثابت شده است.



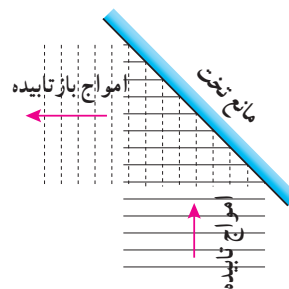
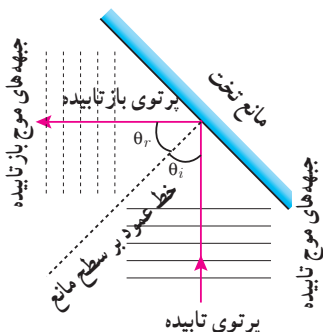
شکل ۴-۴ طرحی از پیشروی و بازتاب تپ عرضی شکل ۳-۴



شکل ۴-۵ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تشت موج.

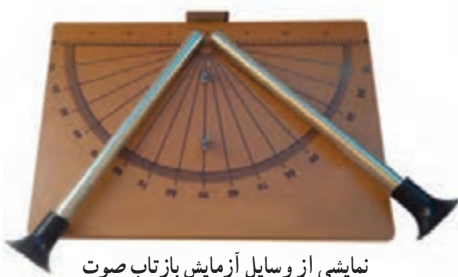
به خاطر داریم وقتی تیغه تختی را بر سطح آب تشت موج به نوسان درمی‌آوردیم، امواج تختی بر سطح آب تشکیل می‌شد. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع‌هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این موانع باز می‌تابند. به‌چنین بازتابی، بازتاب در دو بُعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل یک مانع، مانعی تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۴-۵)¹. شکل ۴-۶ طرحی از چنین بازتابی را نشان می‌دهد. با استفاده از جبهه‌های موج می‌توانیم به‌طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع پی ببریم. طرح معادل دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از نمودار پرتویی است. یک پرتو، پیکان مستقیمی عمود بر جبهه‌های موج است که جهت انتشار موج را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نمودار پرتویی شکل ۴-۶ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۴-۷ رسم کرد. زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فرودی) را زاویه تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند² و زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را زاویه بازتابش می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند³. آزمایش‌هایی نظیر آنچه در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، و همه انواع دیگر موج، مانند امواج دایره‌ای یا کروی نیز، همواره زاویه بازتابش برابر با زاویه تابش است یعنی: $\theta_i = \theta_r$ که به آن، قانون بازتاب عمومی گفته می‌شود.

نمونه دیگری از بازتاب امواج مکانیکی، بازتاب امواج صوتی است. صوت می‌تواند از یک سطح سخت مانند دیوار بازتابش کند. این مثالی از بازتاب امواج در سه بُعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند. در فعالیت ۴-۱ به تحقیق این امر می‌پردازیم.



شکل ۴-۶ طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط توپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خفین) شکل ۴-۷ نمودار پرتویی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانعی تخت

فعالیت ۴-۱



نمایشی از وسایل آزمایش بازتاب صوت

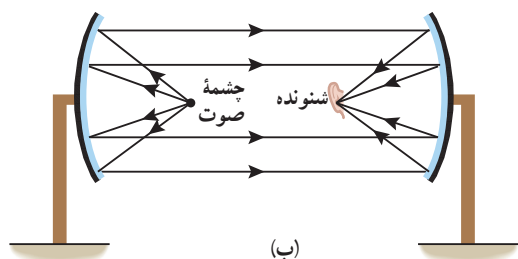
با وسایل ساده نشان داده شده در شکل روبه‌رو، می‌توان زاویه تابش و زاویه بازتابش را در امواج صوتی اندازه‌گیری کرد. با استفاده از این وسایل، قانون بازتاب عمومی را برای امواج صوتی نشان دهید.

۱- توجه کنید که طول مانع باید در مقایسه با طول موج λ بسیار بزرگ باشد. دلیل این الزام را در بحث پراش امواج می‌بینید.

۲- i سرواژه کلمه incident به معنی تابش است.

۳- r سرواژه کلمه reflection به معنی بازتابش است.

امواج صوتی می‌توانند مانند سایر امواج از سطوح خمیده نیز بازتابیده شوند. شاید در برخی از پارک‌های تفریحی، دو سطح کاو را در برابر هم دیده باشید که وقتی شخصی در کانون یکی از این سطوح صحبت می‌کند، شخص دیگری در کانون سطح کاو دیگر آن را می‌شنود (شکل ۴-۸).



(الف)

شکل ۴-۸ (الف) دو سطح بازتابنده کاو در یک پارک تفریحی و (ب) طرحی از بازتاب امواج صوتی از دو سطح کاو مقابل هم با استفاده از نمودار پرتویی

فعالیت ۲-۴



تصویری از یک میکروفون سهموی

درباره میکروفون سهموی که از آن برای ثبت صداهای ضعیف و دستگاه لیتوتریپسی^۱ که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود تحقیق کنید.

پژواک^۲: در برابر دیواره یا صخره بلندی که چند ده متر از شما فاصله دارد، بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی، بازتاب صدای دست زدن خود را خواهید شنید. اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شنونده‌ای برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی **پژواک** می‌گویند. اگر تأخیر زمانی بین این دو صوت کمتر از $\frac{1}{10}$ s باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

فناوری و کاربرد: مکان‌یابی پژواکی

مکان‌یابی پژواکی^۳ روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند. مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر که در فصل پیش آموختیم، در تعیین مکان اجسام متحرک و نیز تعیین تندی آنها به کار می‌رود. برخی از جانوران نظیر خفاش و دلفین از این روش استفاده می‌کنند. همین‌طور در فناوری‌هایی نظیر اندازه‌گیری تندی شارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود. خفاش، قورانی از امواج فراصوتی را گسیل می‌کند که این بسته به نوع خفاش از دهان یا سوراخ‌های بینی آن گسیل می‌شود. این امواج از اشیایی که در مسیر خفاش قرار دارند بازمی‌تابد و بدین ترتیب خفاش را از اشیایی که بر سر راه او قرار دارند آگاه می‌سازد. البته بسته به اینکه شیء بازتابنده، خود خفاش، یا هر دو متحرک باشند، خفاش تغییر بسامدی ناشی از اثر دوپلر را در موج بازتابیده ادراک می‌کند و بدین وسیله می‌تواند سرعت خود یا شیء 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.

تمرین ۱-۴

کمترین فاصله بین شما و یک دیوار بلند چقدر باشد تا پژواک صدای خود را از صدای اصلی تمیز دهید؟ تندی صوت در هوا را 340 m/s در نظر بگیرید.

مثال ۱-۴

والِ عنبر یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکان‌یابی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی‌ای که این وال تولید می‌کند حدود 10^5 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 مانعی که در فاصله 10^3 m از آن قرار گرفته، چقدر است؟

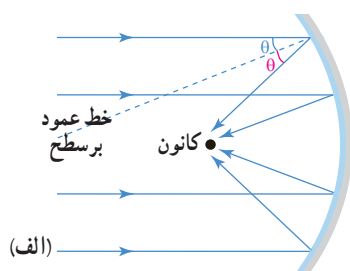
پاسخ: الف) با استفاده از رابطه $\lambda = v/f$ داریم:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1520 \times 10^3 \text{ m/s}}{10^5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 152 \times 10^{-2} \text{ m} = 152 \text{ cm}$$

همان‌طور که بعداً در بحث پراش خواهید دید برای تشخیص یک جسم، اندازه آن باید در حدود طول موج به کار رفته یا بزرگ‌تر از آن باشد. بنابراین، وال اجسامی در حدود این طول موج یا بزرگ‌تر را می‌تواند تشخیص دهد.

ب) زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و مانع برابر است با:

$$t = \frac{x}{v} = \frac{2L}{v} = \frac{2 \times 10^3 \text{ m}}{1520 \times 10^3 \text{ m/s}} = 0.132 \text{ s}$$



(ب)

شکل ۹-۴ الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کانون در نقطه‌ای مقابل سطح، کانونی می‌شود. (ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

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 کانون پس از بازتابش، مانند شکل ۹-۴ الف در یک نقطه کانونی می‌شوند. این نمونه دیگری از بازتاب در سه بُعد است. از همین سازوکار برای دریافت امواج رادیویی توسط آنتن‌های بشقابی و یا امواج فروسرخ برای گرم کردن آب یا مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی (شکل ۹-۴ ب) استفاده می‌شود.

فعالیت ۳-۴



رادار دوپلری: از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی پژواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید.

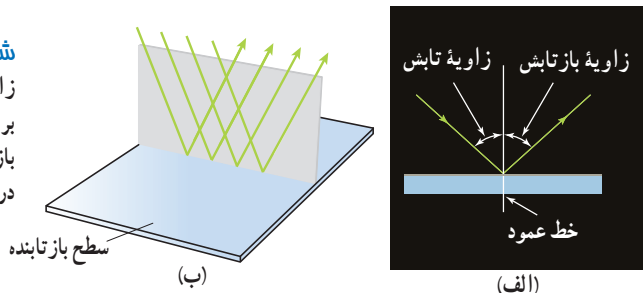
همان‌طور که قبلاً دیدیم نور مرئی بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است. بنابراین نور مرئی نیز از همان قانون بازتاب عمومی امواج پیروی می‌کند؛ یعنی زاویه تابش و بازتابش در هر بازتابشی با هم برابرند (شکل ۴-۱۰ الف)، افزون بر این، برای نور مرئی نیز همچون سایر امواج، پرتوی تابش، پرتوی بازتابش و خط عمود بر سطح بازتابنده، در هر بازتابشی در یک صفحه واقع‌اند (شکل ۴-۱۰ ب).



کریستین هویگنس (۱۶۹۵-۱۶۲۹ م.)

در لاهه هلند به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیدن و پراگ تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله‌هایی در زمینه ریاضی و اخترشناسی نوشت که مورد توجه رنه دکارت، ریاضی‌دان نامی، قرار گرفت. هویگنس در زمان خود دانشمندی با ذوق و مبتکر بود. در سال ۱۶۵۷ ساعت آونگی را اختراع کرد که بیش از آن دانشمندانی مانند گالیله روی آن کار کرده بودند، اما به جایی نرسیده بودند. علاوه بر این، او پژوهش‌هایی با ارزش روی نور نیز انجام داد و نظریه مشهور خود را در این مورد ارائه کرد. بنا به نظریه هویگنس، نور از موج‌های زیادی تشکیل شده است که این موج‌ها را می‌توان به موج‌های صوتی یا موج‌های روی آب تشبیه کرد. نظریه موجی بودن نور هویگنس بحث‌های فراوانی برانگیخت تا اینکه در حدود ۲۰۰ سال بعد ماکسول فیزیک‌دان اسکاتلندی دوباره به این نظریه پرداخت و به آن جان تازه‌ای بخشید. هویگنس اخترشناس برجسته‌ای نیز بود و اسباب‌ها و دستگاه‌های نوری زیادی را اختراع کرد. اختراع ریزسنج را نیز به او نسبت داده‌اند.

شکل ۴-۱۰ الف در هر بازتابشی زاویه تابش و زاویه بازتابش با هم برابرند. (ب) پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

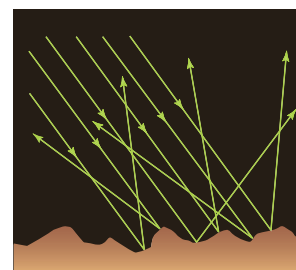


در مواردی که سطح بازتابنده نور همچون یک آینه، بسیار هموار باشد، بازتاب نور را **بازتاب آینه‌ای^۱ یا منظم** می‌گویند.

نوع دیگر بازتابش، **بازتاب پخشنده^۲ یا نامنظم** است. این بازتاب وقتی رخ می‌دهد که نور به سطحی برخورد کند که صیقلی و هموار نباشد. پرتوهای نور به‌طور کاتوره‌ای از پستی و بلندی‌های سطح بازتابنده و در تمام جهات پراکنده می‌شوند (شکل ۴-۱۱). به دلیل این بازتاب است که شما این صفحه کاغذ، دیوار، دستتان، دوست خود، و... را می‌بینید. در بازتاب آینه‌ای از یک آینه تخت، بازتابش یک دسته پرتوی موازی را فقط در یک جهت می‌توانید ببینید، ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته پرتو را می‌توانید در جهت‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که ابعاد ناهمواری‌های سطح در حدود طول موج نور یا بیشتر باشد؛ مثلاً یک کاغذ در ظاهر بسیار هموار به نظر می‌رسد اما از دید میکروسکوپی این سطح از اجزای متمایز و کوچکی تشکیل شده است که بسیار بزرگ‌تر از $1\mu\text{m}$ هستند. با توجه به اینکه طول موج نور مرئی در حدود $0.5\mu\text{m}$ است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می‌شود. در مقابل، ناهمواری‌های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچک‌تر از $1\mu\text{m}$ است و بنابراین برای نور مرئی سطوحی هموار محسوب می‌شوند.

۴-۲ شکست موج

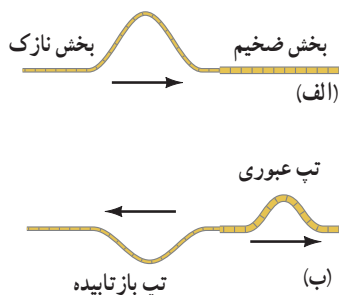
رنگ‌های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و... مثال‌های رایجی از شکسته‌شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به اندازه موج‌های نوری اهمیت ندارد. وقتی موج به مرز جدایی دو محیط می‌رسد بخشی از آن بازتابیده می‌شود و بخشی دیگر عبور می‌کند که این افزون بر جذب موج است که در هر دو محیط رخ می‌دهد؛ مثلاً عبور یک تپ در طول طنابی را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی



شکل ۴-۱۱ برخی از بازتاب پخشنده نور از سطحی ناهموار. توجه کنید که در اینجا نیز در هر بازتاب، زاویه‌های تابش و بازتابش با هم برابرند و پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

^۱— specular reflection

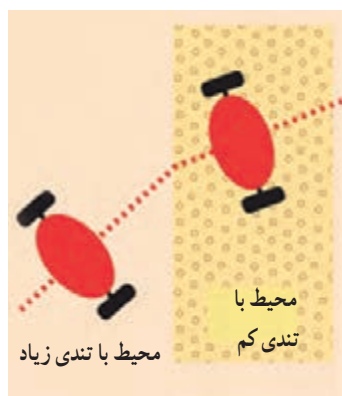
^۲— diffuse reflection



شکل ۱۲-۴ الف تپ فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم‌تر آن می‌شود. (ب) بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی باز می‌تابد.

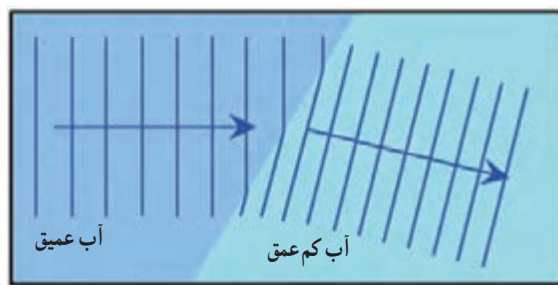
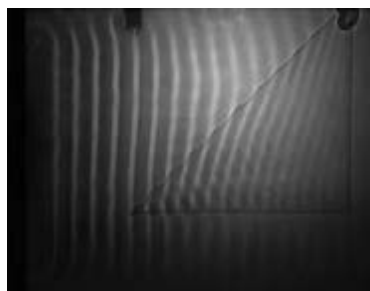
پرسش ۱-۴

اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول موج عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟



شکل ۱۴-۴ وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا چرخ‌ها که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.

در حالت‌های دو یا سه بُعدی با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج شکست پیدا کند. همان‌طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب‌های کم‌عمق، به عمق آب بستگی دارد. از این ویژگی می‌توانیم برای تحقیق پدیده شکست در تشت موج استفاده کنیم؛ یعنی با تغییر دادن عمق آب در بخشی از تشت می‌توان تندی موج سطحی در آن بخش را تغییر داد که این همان‌طور که دیدیم به تغییر جهت انتشار موج در آن بخش، و به عبارتی به شکست موج می‌انجامد. مشاهده می‌شود با ورود موج به بخش کم‌عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش از جبهه موج که زودتر به ناحیه کم‌عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیه جبهه موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصله بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۱۳-۴ در مرز دو ناحیه تغییر جهت می‌دهند. این مطلب را می‌توان در نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیب‌دار نیز مشاهده کرد که با رسیدن جبهه‌های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می‌شود، جهت انتشار جبهه‌های موج تغییر می‌کند. شاید برای تفهیم این موضوع، مثال یک اسباب‌بازی چرخ‌دار که با عبور از کف صاف اتاق وارد قالیچه‌ای می‌شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب‌بازی به قالیچه، تندی آن کم می‌شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می‌کند (شکل ۱۴-۴).



شکل ۱۳-۴ الف طرحی از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم عمق در تشت موج و (ب) تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تشت موج

تمرین ۴-۲

چشمه موج تخت

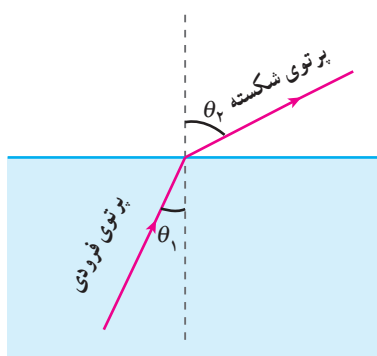


در یک تست موج به کمک یک نوسان‌ساز تیغه‌ای که با بسامد $5/0 \text{ Hz}$ کار می‌کند، امواجی تخت ایجاد می‌کنیم، به‌طوری که فاصله بین دو برآمدگی متوالی آن برابر با 10 cm می‌شود. اگر اکنون بُره‌ای شیشه‌ای را در کف تست قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیه کم‌عمق بالای بُره، شکست پیدا می‌کنند. اگر تندی امواج در ناحیه کم‌عمق، 40° برابر تندی در ناحیه عمیق باشد، طول موج امواج در ناحیه کم‌عمق چقدر می‌شود؟

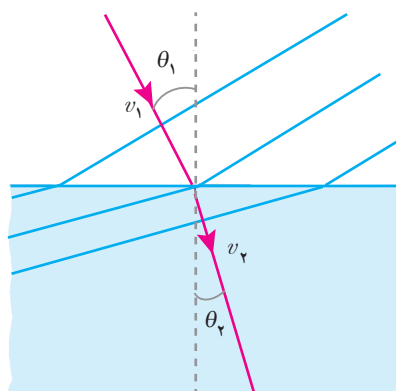
قانون شکست عمومی: در پدیده‌های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می‌پردازیم. فرض کنید مطابق شکل ۴-۱۵ جبهه‌های موج تختی به‌طور مایل به مرز دو محیط می‌رسند و سپس شکست پیدا می‌کنند. از آنجا که جبهه‌های موج در مرز جدایی دو محیط می‌شکنند، پرتوهای موج که همواره عمود بر جبهه‌های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می‌دهند. این پرتوها نیز در شکل ۴-۱۵ 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_1 نشان می‌دهند، در حالی که زاویه پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز را **زاویه شکست** می‌نامند و با θ_2 نشان می‌دهند^۱. در شکل ۴-۱۵، 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 شکست 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.

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

(۴-۱) (قانون شکست عمومی)



شکل ۴-۱۶ 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.



شکل ۴-۱۵ جبهه موجی با زاویه تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می‌شود و با زاویه θ_2 شکست پیدا می‌کند (شکل با فرض $v_2 < v_1$ رسم شده است).

در شکل ۴-۱۵ 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 ۴-۱۶).



ابن سهل (۳۷۹-۳۹۹ هجری شمسی)

ابوسعبداللّه ابن سهل معروف به ابن سهل، ریاضی‌دان و فیزیک‌دان ایرانی در عصر طلایی علوم اسلامی بود که در دربار عباسیان در بغداد کار می‌کرد. ابن سهل در سال ۳۶۳ هجری شمسی رساله بسیار مهمی به نام «در باب آینه‌ها و عدسی‌های سوزان» نوشت و در آن تشریح کرد که چگونه آینه‌های خمیده و عدسی‌ها می‌توانند نور را کانونی کنند. بنابه منابع متعددی، او بیش از اسنل، دانشمند هلندی، قانون شکست نور را کشف کرده بود. تصویر زیر بخشی از دست‌نوشته ابن سهل را در اثبات این قانون نشان می‌دهد.



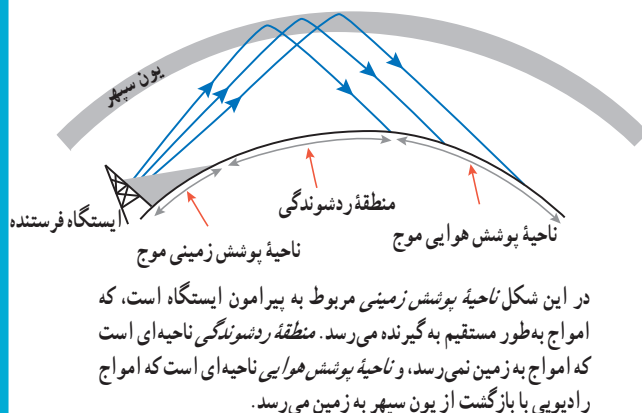
او با استفاده از قانون شکست نور به شکلی از عدسی‌ها دست یافت که می‌توانستند نور را به‌خوبی کانونی کنند. سایر بخش‌های رساله او به آینه‌های سهمی، آینه‌های بیضی، عدسی‌های همگرا و روش‌هایی برای رسم کمان هذلولی می‌پردازد.

۱- شاخص پایین n سرواژه کلمه انگلیسی refraction به معنی شکست است.

تمرین ۳-۴

در تمرین ۲-۴ با فرض اینکه زاویه تابش امواج برابر 30° باشد، زاویه شکست چقدر می‌شود؟

شکست امواج الکترومغناطیسی: امواج الکترومغناطیسی (و از جمله نور مرئی) نیز با گذر از یک محیط به محیطی دیگر که در آن تندی آنها متفاوت می‌شود، شکست پیدا می‌کنند. به جز گستره نور مرئی که بیشترین و معروف‌ترین موارد شکست برای آنها مطرح می‌شود و به پیامدها و کاربردهای جالبی می‌انجامد، شکست امواج رادیویی نیز اهمیتی کاربردی در ارتباطات رادیویی دارد.

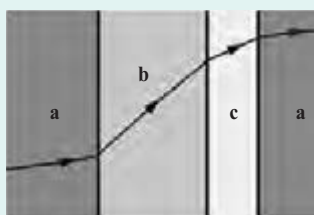


موج‌های ارسال شده از یک ایستگاه فرستنده رادیویی دوردست را به همان وضعی می‌شنویم که در محدوده آن ایستگاه شنیده می‌شود. روش کار به این ترتیب است که یک موج پر قدرت رادیویی، با بسامد بین ۳ تا 30 مگاهرتز، به لایه یون‌سپهر (یونسفر) بالای جو که در ارتفاع 80 تا 1000 کیلومتری سطح زمین واقع است فرستاده می‌شود. این لایه به علت وجود یون‌ها و الکترون‌های آزاد، پلاسمایی را ایجاد می‌کند که ویژگی‌های فیزیکی‌اش

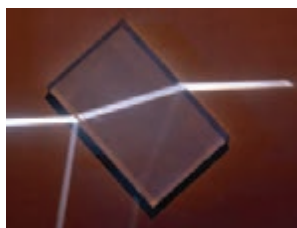
آن را از بقیه جو متمایز می‌سازد. یون‌سپهر در حالی که نور مرئی و تابش فروسرخ را عبور می‌دهد، امواج رادیویی با طول موج‌های بلند (بالای بزرگ‌تر از حدود 10 m) را که در جهت‌های مناسبی به سوی این لایه ارسال شده باشند، به طرف زمین برمی‌گرداند. دلیل این اتفاق، یکنواخت نبودن چگالی الکترون‌های آزاد در این لایه و در نتیجه، تفاوت تندی امواج رادیویی در قسمت‌های مختلف آن است، به‌طوری که در سازوکاری مانند پدیده سراب که بعداً خواهیم آموخت، امواج را به سمت پایین بازمی‌گرداند.

خوب است بدانید

پوشش ۲-۴



شکل روبه‌رو یک پرتوی موج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که با عبور از محیط اولیه a ، از طریق محیط‌های b و c به محیط a بازمی‌گردد. این محیط‌ها را بر حسب تندی موج در آنها از بیشترین تا کمترین مرتب کنید.



شکل ۴-۱۷ در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفاف دیگر، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی می‌شکند.

وقتی یک پرتوی نور از محیطی شفاف وارد محیط شفاف دیگری شود، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم می‌شود. همان‌طور که انتظار داریم آن بخش نور که وارد محیط دوم می‌شود، به دلیل آنکه تندی آن در محیط دوم تغییر می‌کند، شکسته می‌شود (شکل ۴-۱۷). 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:

$$(2-4) \quad (\text{تعریف ضریب شکست}) \quad n = \frac{\text{تندی نور در خلأ}}{\text{تندی نور در یک محیط}} = \frac{c}{v}$$

جدول ۱-۴ ضریب شکست چند ماده مختلف*

محیط	ضریب شکست
خلأ	دقیقاً ۱
هوا (شرایط متعارف)	۱/۰۰۰۲۹
یخ	۱/۳۱
آب (۲۰°C)	۱/۳۳
استون	۱/۳۶
اتانول	۱/۳۶
محلول آب قند (۳۰٪)	۱/۳۸
محلول آب قند (۸۰٪)	۱/۴۹
بنزن	۱/۵۰
پلاستیک پلیکسی گلاس	۱/۵۱
شیشه خالص	۱/۵۲
سدیم کلرید (نمک خوراکی)	۱/۵۴
کوارتز (SiO _۲)	۱/۵۴
الماس	۲/۴۲

* برای طول موج ۵۸۹nm (نور زرد سدیم)

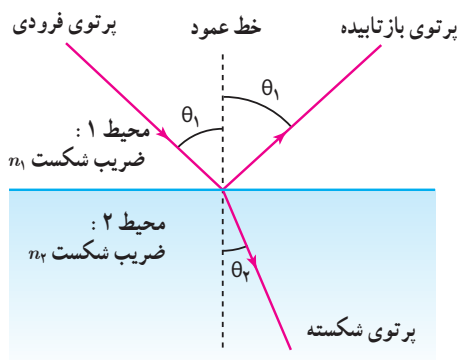
که در آن c تندی نور در خلأ با مقدار دقیق $۳۰۰ \times ۱۰^۸ \text{ m/s}$ است که در محاسبات، آن را برابر با $۳۰۰ \times ۱۰^۸ \text{ m/s}$ در نظر می‌گیریم؛ چون تندی نور در خلأ بیشترین تندی ممکن است، ضریب شکست همواره بزرگ‌تر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلأ است). جدول ۱-۴ ضریب شکست برای چند ماده مختلف را به‌دست می‌دهد. بنابراین برای دو محیط خاص ۱ و ۲، ضریب شکست‌ها به‌ترتیب $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ است که v_1 و v_2 تندی نور در آن دو محیط است. حال اگر پرتوی نوری از محیط ۱ با زاویه تابش θ_1 وارد محیط ۲ شود و با زاویه θ_2 شکست پیدا کند (شکل ۱۸-۴)، از قانون شکست عمومی (رابطه ۱-۴) درمی‌یابیم:

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{c/n_2}{c/n_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

و یا

$$(۳-۴) \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{قانون شکست اسنل})$$

این رابطه را به افتخار فیزیک‌دان هلندی، ویلبرد اسنل (۱۶۲۶-۱۵۸۰م.) که آن را به‌طور تجربی کشف کرد، **قانون شکست اسنل** می‌نامند.



شکل ۱۸-۴ طرحی از بازتاب و شکست نور، در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفافی دیگر

مثال ۲-۴

پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیغه شیشه‌ای متوازی‌السطوحی، با زاویه تابش ۶۰° فرود می‌آید. الف) زاویه شکست (θ_A) پرتو در شیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_B) پرتو از شیشه چقدر است؟

پاسخ: الف) برای ورود پرتوی نور از هوا به شیشه قانون شکست اسنل را به کار می‌بریم. با توجه به جدول ۱-۴ ضریب شکست هوا $n_1 = ۱/۰۰$ و ضریب شکست شیشه $n_2 = ۱/۵۲$ است.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (۱/۰۰)(\sin ۶۰^\circ) = (۱/۵۲)(\sin \theta_A)$$

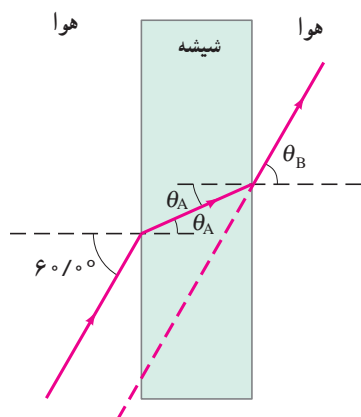
$$\sin \theta_A = ۰/۵۶۹۸ \Rightarrow \theta_A = ۳۴/۷^\circ$$

ب) برای خروج پرتوی نور از شیشه نیز دوباره قانون اسنل را به کار می‌بریم. توجه کنید که زاویه تابش در اینجا برابر زاویه شکست در شیشه است؛ یعنی $\theta_1 = \theta_A$.

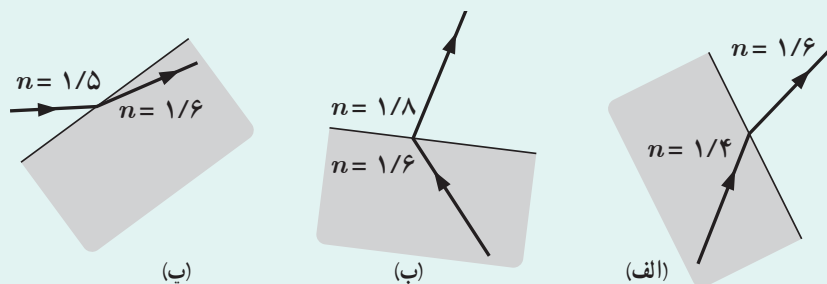
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (۱/۵۲)(۰/۵۶۹۸) = (۱/۰۰)(\sin \theta_B)$$

$$\sin \theta_B = ۰/۸۶۶۱ \Rightarrow \theta_B = ۶۰/۰^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می‌توانستید مقدار θ_B را بیابید.



کدام یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



(پ)

(ب)

(الف)

فعالیت ۴-۴

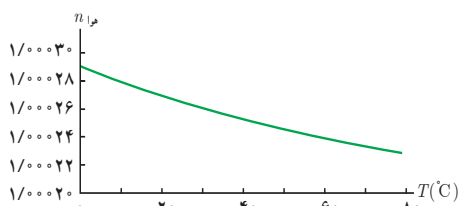
اندازه‌گیری ضریب شکست: با توجه به مثال ۲-۴، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغه متوازی‌السطوح شفاف را اندازه گرفت.



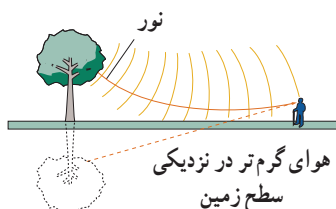
شکل ۴-۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده

سراب: در روزهای گرم ممکن است برکه‌آبی را در دوردست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد، اما وقتی به آن محل می‌رسید، آنجا را خشک می‌یابید. به این پدیده **سراب** یا سراب آبگیر می‌گویند و نه تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۴-۱۹).

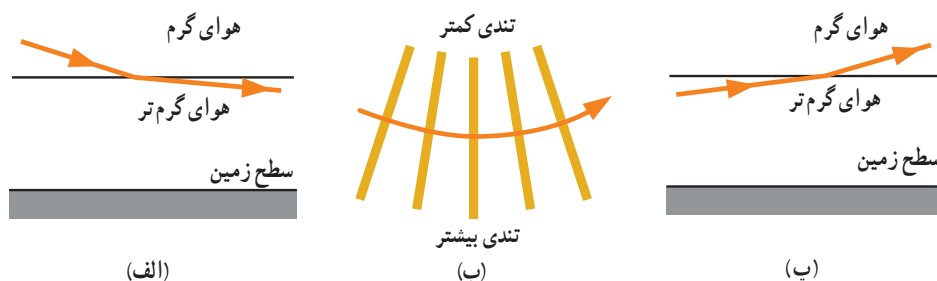
در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، چگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می‌شود (شکل ۴-۲۰). در شکل ۴-۲۱ پدیده سراب را مبتنی بر جبهه‌های موج نشان داده‌ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه‌های موجی را در نظر می‌گیریم که به طرف پایین می‌آیند. با پایین آمدن هر چه بیشتر پرتوهای نظیر این جبهه‌های موج، آنها با ضریب شکست‌های کوچک‌تر و کوچک‌تری روبه‌رو می‌شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می‌شوند (شکل ۴-۲۲ الف). وقتی پرتوها در نزدیکی سطح زمین تقریباً افقی می‌شوند به سمت بالا خم برمی‌دارند. این خم شدن رو به بالا را می‌توان با استفاده از جبهه‌های موج توضیح داد. بخش پایینی هر جبهه موج در هوای کمی گرم‌تر قرار دارد و بنابراین کمی تندتر از بخش بالایی جبهه موج حرکت می‌کند و این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه‌های موج، موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۴-۲۲ ب). وقتی پرتوها رو به بالا می‌روند به خم شدن رو به بالای خود ادامه می‌دهند، زیرا اکنون مدام با محیط‌هایی با ضریب شکست‌های بزرگ و بزرگ‌تر مواجه می‌شوند و بنابراین در هر مرحله با نزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۴-۲۲ پ). اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می‌آید که منشأ این نور از امتداد رو به عقب پرتوهایی است که به چشم ما رسیده‌اند و همان‌طور که در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.



شکل ۴-۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

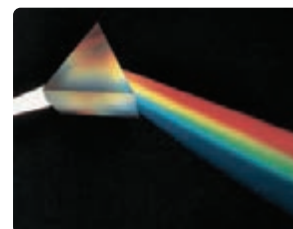


شکل ۴-۲۱ مدل‌سازی پدیده سراب به کمک جبهه‌های موج. ناظری که پرتوهای نور در پدیده سراب به چشمش می‌رسد، گمان می‌برد که این پرتوها از یک تصویر آمده‌اند.

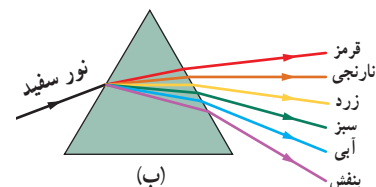


شکل ۲۲-۴ الف) خمیدگی اغراق آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم به سمت هوای گرم تر پایین می‌رود. (ب) تغییر جبهه‌های موج و خمیدگی مربوط به آن، به این دلیل رخ می‌دهد که انتهای پایین جبهه‌های موج در هوای گرم تر سریع‌تر حرکت می‌کنند. (پ) خمیدگی اغراق آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم تر به سمت هوای گرم بالا می‌رود.

پاشندگی نور: همان‌طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی باریکه نور سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۲۳-۴ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به جز خلأ به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی باریکه نوری شامل پرتوهایی 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 معین برای طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۲۴-۴ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای شیشه معمولی نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار اگر مثلاً دو باریکه نور آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد شیشه شوند باریکه آبی بیشتر از باریکه قرمز خم می‌شود.



(الف)

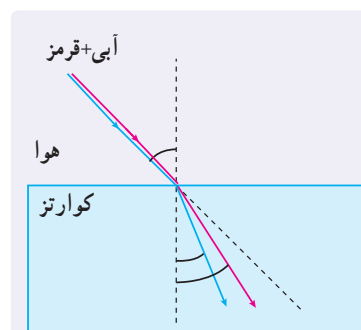


(ب)

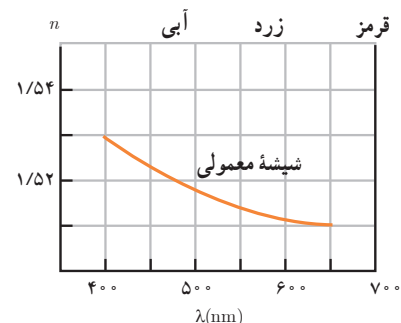
شکل ۲۳-۴ الف) باریکه‌ای از نور سفید که بر یک منشور شیشه‌ای تابیده است، به مؤلفه‌های رنگی خود پاشیده است. (ب) طرحی از پاشیدگی نور سفید در یک منشور با قاعده مثلثی

اگر باریکه نور سفید از هوا بر یک سطح شیشه‌ای فرود آید بر اثر شکست نور، مؤلفه‌های سازنده باریکه نور سفید هر کدام به میزان متفاوتی خم می‌شوند که البته این تفاوت چندان محسوس نیست. برای افزایش جدایی رنگ‌ها در پاشندگی نور، معمولاً از یک منشور با سطح مقطع مثلثی استفاده می‌کنیم. پاشندگی ناچیز در سطح اول، سپس با پاشندگی در سطح دوم افزایش می‌یابد و مؤلفه‌های رنگی نور سفید به‌طور محسوس از هم جدا می‌شوند (شکل ۲۳-۴ ب).

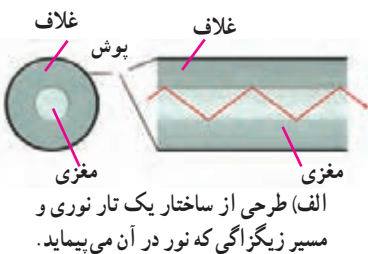
تمرین ۴-۴



شکل روبه‌رو باریکه نوری متشکل از دو پرتوی قرمز و آبی را نشان می‌دهد که از هوا با زاویه تابش 45° بر سطح تیغه تختی از کوارتز می‌تابد. زاویه‌های شکست برای این دو پرتو را محاسبه کنید. ضریب شکست نورهای قرمز و آبی در کوارتز به ترتیب برابرند با $n_{\text{قرمز}} = 1/459$ و $n_{\text{آبی}} = 1/467$.

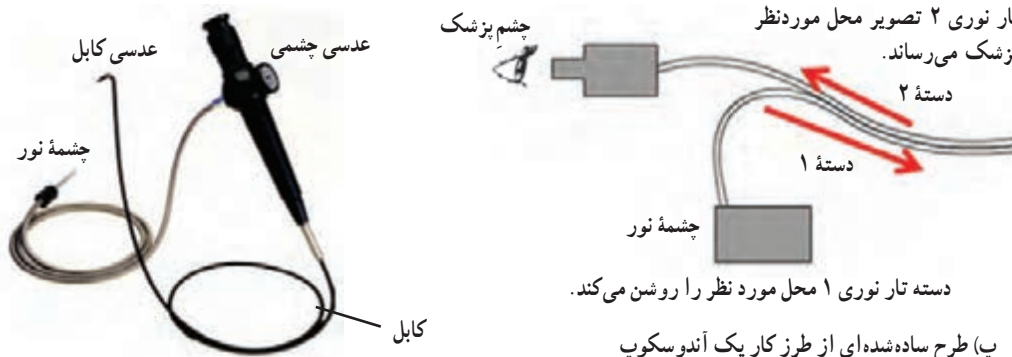


شکل ۲۴-۴ تغییرات ضریب شکست در طیف مرئی نور بر حسب طول موج برای شیشه معمولی



ب) یک کابل سبک تار نوری (شکل سمت چپ) می‌تواند مکالمه‌های تلفنی بسیار بیشتری را از یک کابل سیمی معمولی (شکل سمت راست) انتقال دهد.

تار نوری: وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به طور مایل وارد محیطی با ضریب شکست کمتر شود، به ازای زاویه تابش خاصی موسوم به **زاویه حد**، زاویه شکست 90° می‌شود و از آن پس برای هر زاویه تابش بزرگ‌تری همه نور فرودی بازمی‌تابد که به این پدیده، **بازتاب داخلی کلی** گفته می‌شود. تار نوری که هم در پزشکی و هم در فناوری ارتباطات نقش مهمی دارد، بر اساس این پدیده عمل می‌کند. در مرکز یک تار نوری، مغزی استوانه‌ای شفاف 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 حد به اندازه کافی کوچک باشد. نور طوری از یک سر مغزی وارد می‌شود که به مرز مغزی - غلاف تحت زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویه حد بتابد و در نتیجه تماماً به درون مغزی بازتاب کند. سپس همین اتفاق در مرز روبه‌روی مرز قبلی رخ می‌دهد و نور بر اثر بازتاب داخلی کلی دوباره به مغزی بازتابیده می‌شود و این رفت و برگشت نور در مسیری زیگزاگ ادامه می‌یابد (شکل الف) تا اینکه به سر دیگر تار برسد. در یک تار نوری خوب، نور در مغزی کمی جذب پیدا می‌کند و بنابراین می‌تواند پیش از آنکه شدتش کاهش یابد، تا مسافت‌های طولانی حرکت کند. تارهای نوری اغلب به صورت دسته‌ای کنار هم قرار می‌گیرند تا به شکل یک کابل درآیند. چون تارها بسیار نازک‌اند کابل‌ها نسبتاً کوچک و انعطاف‌پذیر هستند و به این ترتیب می‌توانند در بسیاری موارد، برای انتقال اطلاعات جایگزین کابل‌های فلزی بزرگ شوند (شکل ب). یکی از کاربردهای مهم تارهای نوری در عمل آندوسکوپی در پزشکی است. از آندوسکوپ برای دیدن درون بدن، بدون انجام جراحی استفاده می‌شود. در آندوسکوپی، جراح دو دسته تار نوری را وارد بدن بیمار می‌کند که یکی نور را به محل موردنظر می‌رساند و دیگری تصویر محل موردنظر را به یک چشمی یا صفحه نمایشگر می‌رساند. شکل پ، طرح ساده شده‌ای از چگونگی این تصویربرداری و شکل ت، یک اسباب آندوسکوپی معمولی را نشان می‌دهد.

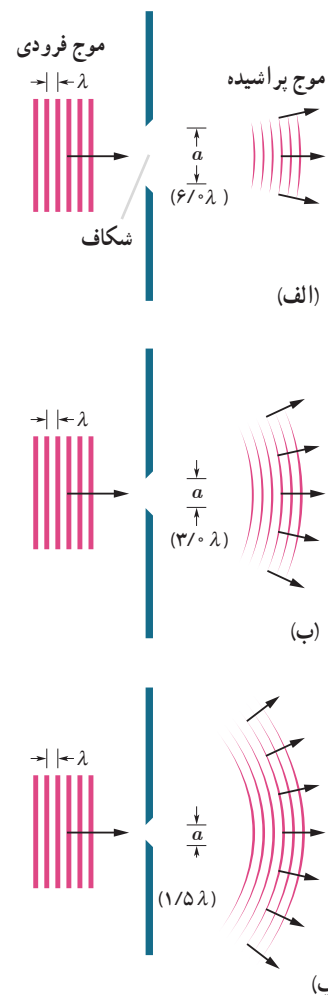


پ) طرح ساده شده‌ای از طرز کار یک آندوسکوپ
ت) یک اسباب آندوسکوپی معمولی

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 یا جذب می‌شود و به پشت مانع نمی‌رسد و بخشی دیگر، از لبه‌های مانع یا شکاف‌های موجود در آن، می‌گذرد. در صورتی که ابعاد مانع یا شکاف در حدود طول موج باشد، بخشی از موج که از لبه‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، به وضوح به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود.

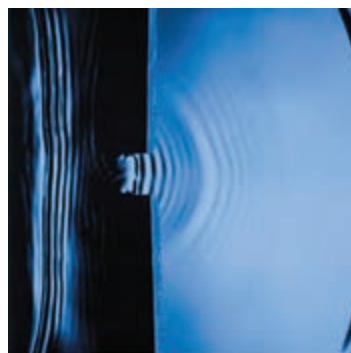
شکل ۲۵-۴ وضعیت طرح‌واری را نشان می‌دهد که در آن موجی تخت با طول موج λ به مانعی می‌رسد که شکافی به پهنای a دارد. در شکل ۲۵-۴ الف، پهنای شکاف خیلی بزرگ‌تر از طول موج λ است ($a = 6 \cdot \lambda$). همان‌طور که دیده می‌شود قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد تقریباً تخت باقی می‌ماند. در شکل ۲۵-۴ ب، پهنای شکاف کمتر شده است ($a = 3 \cdot \lambda$) 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 ۲۵-۴ پ، که پهنای شکاف، $a = 1/5 \lambda$ شده است، قسمتی از موج که از شکاف می‌گذرد کاملاً از حالت موج تخت خارج و به اطراف شکاف گسترده شده است. به این پدیده که موج در عبور از یک شکاف با پهنایی از مرتبه 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 موج باشد نیز رخ می‌دهد. پراش برای همه انواع موج اتفاق می‌افتد. برای مثال شکل ۲۶-۴، پراش امواج تخت را روی سطح آب در یک تشت موج، هنگام عبور امواج از یک شکاف باریک نشان می‌دهد.



البته پراش در واقع چیزی فراتر از صرفاً یک گستردگی بیشتر موج است و مثلاً اگر پراش نوری تکفام از یک شکاف باریک یا لبه‌ای تیز را روی یک پرده ملاحظه کنیم، همواره نوارهای تاریک و روشنی موسوم به **نقش پراش** را موازی با لبه‌های شکاف مشاهده می‌کنیم. شکل ۲۷-۴، نقش پراش نوری تکفام از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ را نشان می‌دهد. تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحث تداخل امواج است. تداخل امواج را در بخش بعد می‌آموزیم.



شکل ۲۷-۴ پراش نوری تکفام که از لبه‌های تیز درون و بیرون یک تیغ ایجاد شده است.



شکل ۲۶-۴ پراش امواج تخت هنگام عبور از شکافی باریک در تشت موج

شکل ۲۵-۴ پراش به‌طور طرح‌وار برای سه شکاف با پهنای مختلف و به‌ازای یک طول موج مشخص فرودی نشان داده شده است. هرچه پهنای شکاف کوچک‌تر شده پراش بارزتر شده است.

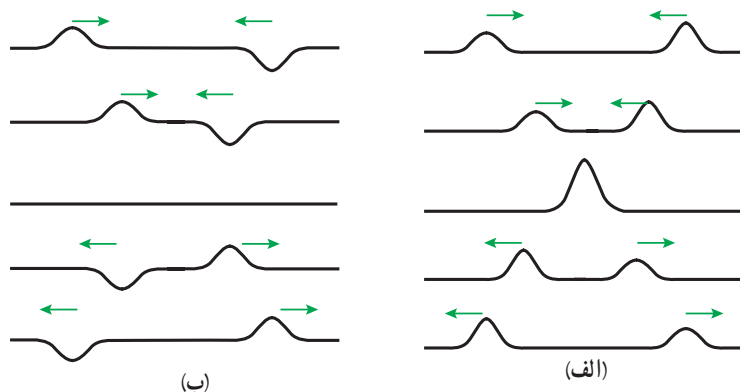
پرسش ۴-۴

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 پراشیده شود). سابق بر این، طول موج سیگنال‌های تلویزیونی در حدود ۵۰ cm بود، ولی طول موج سیگنال‌های تلویزیونی دیجیتالی 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؟

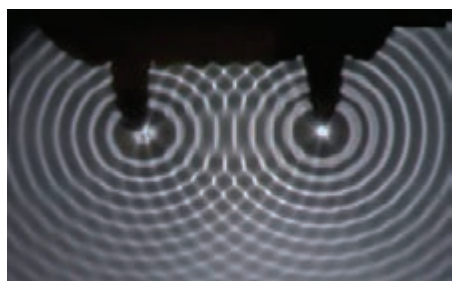
۴-۲ تداخل امواج

وقتی در تالاری به نوای موسیقی گوش می‌دهید، امواج صوتی حاصل از سازهای مختلف به‌طور هم‌زمان به گوش‌تان می‌رسد. الکترون‌ها در آنتن گیرنده‌های رادیو و تلویزیون تحت تأثیر هم‌زمان امواج الکترومغناطیسی زیادی که از فرستنده‌های مختلف ارسال می‌شوند، به حرکت می‌افتند. آب یک دریاچه یا بندرگاه ممکن است بر اثر تأثیر هم‌زمان موج‌هایی که به دنبال تعداد زیادی قایق در حال حرکت به‌راه می‌افتند، متلاطم شود. اینها همگی نمودهایی 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 ۴-۲۸، عکس‌های دو تپ را که در جهت‌های مخالف هم در یک ریسمان کشیده شده حرکت می‌کنند در چند لحظه متوالی نشان می‌دهد. وقتی این تپ‌ها به هم می‌رسند و با یکدیگر همپوشانی می‌کنند، بنا بر اصل برهم‌نهی، تپ برآیند با مجموع دو تپ برابر است. توجه کنید چه برای تپ‌ها و چه برای موج‌هایی که همپوشانی می‌کنند، آنها به هیچ وجه شکل و حرکت یکدیگر را تغییر نمی‌دهند، و بنابراین پس از همپوشانی، بدون هرگونه تغییر شکلی به حرکت خود ادامه می‌دهند. به ترکیب موج‌ها با یکدیگر، **تداخل** می‌گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که هم‌زمان از یک منطقه عبور می‌کنند. در شکل ۴-۲۸ الف، تپ‌ها هنگام همپوشانی تپ بزرگ‌تری را ایجاد کرده‌اند که به آن **تداخل سازنده** می‌گویند، در حالی که در شکل ۴-۲۸ ب، تپ‌ها هنگام همپوشانی اثر یکدیگر را حذف کرده‌اند که به آن **تداخل ویرانگر** می‌گویند. تداخل‌های سازنده و ویرانگر برای موج‌ها نیز همچون تپ‌ها رخ می‌دهد که آن را در قسمت‌های بعدی بررسی خواهیم کرد.



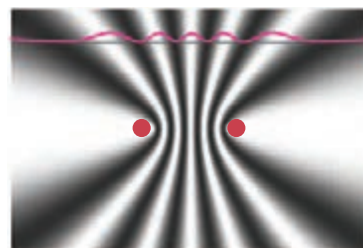
شکل ۴-۲۸ دو تپ پیش‌رونده در جهت‌های مخالف هم در طول یک ریسمان کشیده که با یکدیگر (الف) تداخل سازنده و (ب) تداخل ویرانگر انجام می‌دهند.



شکل ۴-۲۹ تداخل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج. هرگاه فاصله دو گوی از هم از طول موج بزرگ‌تر باشد چنین نقشی ایجاد می‌شود.

تداخل امواج سطحی آب: برای مشاهده تداخل امواج سطحی بر سطح آب، دو گوی کوچک را با بسامد یکسان، به‌طور هم‌زمان بر سطح آب به نوسان درمی‌آوریم. دو دسته موج دایره‌ای ایجاد می‌شود که بی‌آنکه بر انتشار یکدیگر تأثیر بگذارند با یکدیگر همپوشانی می‌کنند و نقشی مانند نقش شکل ۴-۲۹ را بر سطح آب به‌وجود می‌آورند. امواج در برخی نقاط همدیگر را تقویت می‌کنند و تداخل سازنده انجام می‌دهند و در برخی نقاط همدیگر را تضعیف می‌کنند و تداخل ویرانگر انجام می‌دهند. به عبارتی، برآمدگی‌ها یا فرو رفتگی‌های دو موج که در یک زمان در نقطه‌ای به همدیگر برسند، سطح آب را در آن نقطه به شدت بالا یا پایین می‌برند، در

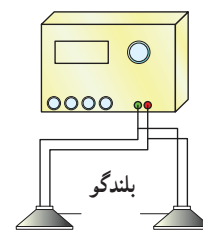
حالی که اگر برآمدگی یک موج در یک زمان و در یک نقطه به فرورفتگی موج دیگر برسد، دو موج یکدیگر را تضعیف می کنند و بنابراین سطح آب در چنین نقطه ای نوسان چندانی نخواهد داشت. به این ترتیب، در برخی نواحی روی سطح آب دامنه موج برآیند بیشینه و در برخی ناحیه ها، کمینه است. چنین نقش متناوب یک درمیانی از بیشینه ها و کمینه ها را نقش تداخلی امواج سطحی آب می نامیم و آنها را به وضوح می توانیم در سایه تشکیل شده بر سطح ورقه کاغذ زیر تشت موج مشاهده کنیم (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳ طرحی از نواحی بیشینه ها و کمینه های یک نقش تداخلی حاصل از امواج سطحی آب. نمودار قرمز رنگ، دامنه موج برآیند است که همان طور که می بینیم در نواحی با تداخل سازنده (نواحی کاملاً روشن) بیشینه و در نواحی با تداخل ویرانگر (نواحی کاملاً تیره) کمینه است.

تداخل امواج صوتی: امواج صوتی نیز می توانند تداخل کنند. به این منظور، آزمایش نشان داده شده در شکل ۴-۳۱ را در نظر بگیرید. در این آزمایش دو بلندگو که به یک مولد سیگنال الکتریکی متصل اند امواج سینوسی هم بسامدی را در فضا منتشر می کنند. با حرکت دادن میکروفون در امتداد خط فرضی نشان داده شده در شکل که در فاصله مناسبی از بلندگوها قرار دارد درمی یابیم که بلندی صدا به طور متناوب کم و زیاد می شود. علت این پدیده را به سادگی می توان براساس تداخل های سازنده و ویرانگر امواج صوتی توضیح داد. (چگونه؟)

مولد سیگنال سینوسی



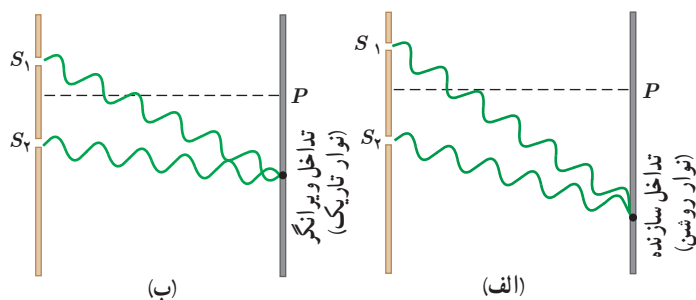
$L = \text{صدای بالا}$
 $S = \text{صدای ضعیف}$



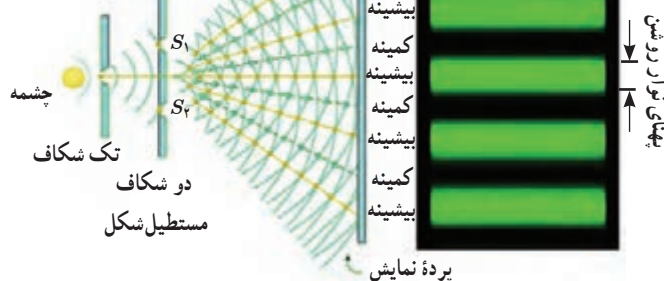
شکل ۴-۳۱ تداخل سازنده و ویرانگر امواج صوتی

تداخل امواج نوری: در سال ۱۸۰۱ میلادی توماس یانگ (۱۸۲۹-۱۷۷۳ م.) دانشمند انگلیسی به طور تجربی ثابت کرد نور یک موج است که این برخلاف نظر بیشتر فیزیک دانان آن زمان بود. در واقع او نشان داد که نور نیز مانند موج های سطحی آب، موج های صوتی و همه انواع موج های دیگر تداخل می کند.

شکل ۴-۳۲، طرحی از چگونگی آزمایش اولیه یانگ برای تحقیق تداخل امواج نوری را نشان می دهد. نور حاصل از یک چشمه تکفام (اینجا سبزرنگ) بر تک شکافی می تابد. سپس نور خروجی بر اثر پراش، گسترده می شود و دو شکاف S_1 و S_2 را روشن می کند. موج های حاصل از پراش نور توسط این دو شکاف با یکدیگر تداخل می کنند و نقش حاصل از این تداخل را می توان روی پرده ای که در ناحیه سمت راست دو شکاف قرار دارد مشاهده کرد. روی پرده، نقطه های با تداخل سازنده، نوارها یا فریزهای روشن را تشکیل می دهند (شکل ۴-۳۳ الف)، و نقطه های با تداخل ویرانگر نوارها یا فریزهای تاریک را تشکیل می دهند (شکل ۴-۳۳ ب) که می توان آنها را بین نوارهای روشن مجاور شکل ۴-۳۲ مشاهده کرد. نقش



شکل ۴-۳۳ الف) دو موج همدیگر را تقویت می کنند و در نتیجه تداخل آنها سازنده است. ب) دو موج همدیگر را تضعیف می کنند و در نتیجه تداخل آنها ویرانگر است.



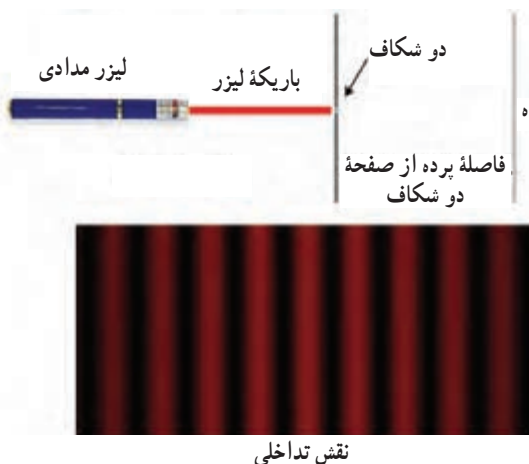
شکل ۴-۳۴ طرحی از آزمایش اولیه یانگ. نور تکفام سبز توسط تک شکافی پراشیده می شود. با پراشیدن این نور از دو شکاف بعدی، امواج نوری تداخل می کنند و نقشی تداخلی (نوارهای روشن و تاریک روی پرده) به وجود می آورند. توجه کنید پهنای نوارهای روشن و تاریک در این نقش یکسان فرض شده است.

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 ۴-۳۲، برای نور تکفام سبز نشان داده شده است. در این نقش پهنای هر نوار تاریک یا روشن (که مساوی فرض می‌شوند) متناسب با طول موج نور به کار رفته در آزمایش است. با استفاده از آزمایش ینگ می‌توان طول موج نور به کار رفته در آزمایش را تعیین کرد که در اینجا به آن نمی‌پردازیم.

فعالیت ۴-۵

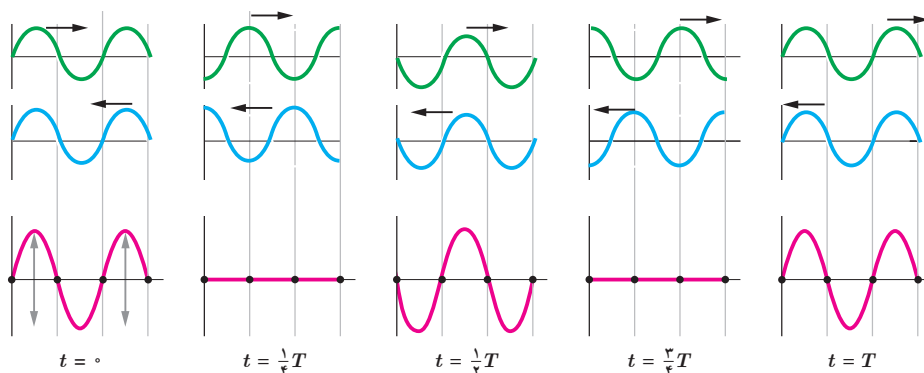
مشاهده نقش تداخلی به کمک نور لیزر: اگر از نور لیزر استفاده

کنیم، دیگر نیازی به استفاده از یک تک‌شکاف در آزمایش ینگ نیست. با استفاده از یک لیزر مدادی، صفحه دو شکاف آزمایش ینگ را مطابق شکل روشن کنید و نقش تداخلی ایجادشده را روی پرده مشاهده کنید. برای تهیه صفحه دو شکاف می‌توانید یک وجه تیغه‌ای شیشه‌ای (مانند لام میکروسکوپ) را با اسپری رنگ کنید، پس از مدتی، با استفاده از دو تیغ چسبیده به هم دو خط خیلی نزدیک به هم (با فاصله چند دهم میلی‌متر از یکدیگر) روی تیغه شیشه‌ای بکشید. اگر فاصله پرده از صفحه دو شکاف به اندازه کافی زیاد باشد (چند متر)، طرح تداخلی ینگ در طرح پراش‌ها دیده می‌شود.



موج ایستاده و تشدید در ریسمان کشیده: ریسمانی را تصور کنید که در یک انتها ثابت شده

است و انتهای دیگر آن به نوسان درمی‌آید. وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت (که در شکل ۴-۳۴ با رنگ آبی مشخص شده است و به سمت چپ حرکت می‌کند) با موج تابیده (که در شکل ۴-۳۴ با رنگ سبز مشخص شده است و به سمت راست حرکت می‌کند) ترکیب شوند موجی برآیند ایجاد می‌کنند که شکل آن از اصل برهم‌نهی حاصل می‌شود (این موج در شکل ۴-۳۴ با رنگ قرمز مشخص شده است). مشخصه بارز این موج برآیند آن است که مکان‌هایی در طول ریسمان، موسوم به **گره**، وجود دارد که در آنها ریسمان هرگز حرکت نمی‌کند. وسط گره‌های مجاور را **شکم** می‌گویند که دامنه موج برآیند در آنجا بیشینه است. نقش موج برآیند را در این حالت، **موج ایستاده** می‌گویند، زیرا نقش‌های این موج به چپ

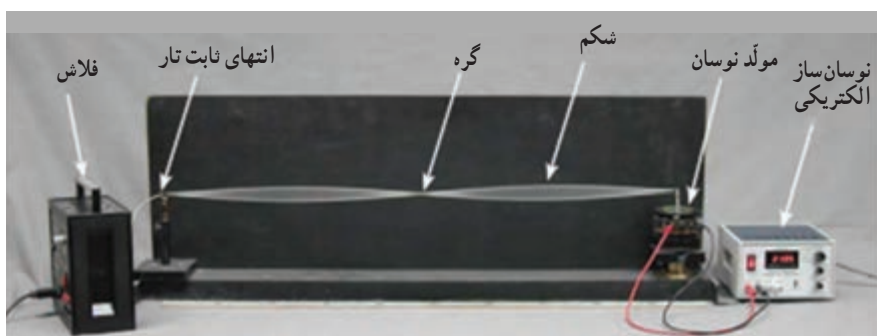


شکل ۴-۳۴ چند عکس لحظه‌ای از تشکیل یک موج ایستاده در یک ریسمان کشیده شده در مدت یک دوره

یا راست حرکت نمی‌کنند و محل شکم‌ها و گره‌ها تغییر نمی‌کند. شکل ۴-۳۴، چند عکس در لحظه‌های مختلف از موج‌های تابیده، بازتابیده، و موج برآیند آنها را نشان می‌دهد. از روی شکل درمی‌یابیم که فاصله گره‌های مجاور از هم برابر با نصف طول موج ($\lambda/2$) و بنابراین فاصله گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر با ربع طول موج ($\lambda/4$) است. شکل ۴-۳۵، طرحی از موج ایستاده در این ریسمان را نشان می‌دهد که در آن حالت‌های مختلف ریسمان در لحظات مختلف شکل ۴-۳۴ دیده می‌شود.

اگر در شکل ۴-۳۴ 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 می‌گوییم این دو موج در این نقطه‌ها (گره‌ها) کاملاً ناهم‌فاز (در فاز مخالف) اند. اما در مکان هر یک از شکم‌ها وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در تمام لحظات به گونه‌ای است که همدیگر را تقویت می‌کنند (تداخل سازنده). در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج در این نقاط هم‌فازند.

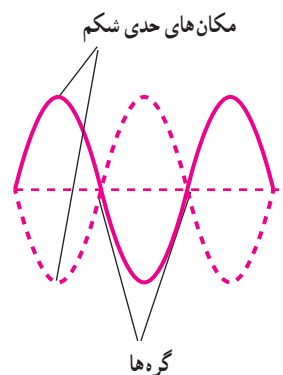
بسامدهای تشدید تار: شکل ۴-۳۶ تصویری واقعی از اسباب آزمایشی را نشان می‌دهد که در آن تار کشیده شده، از یک سر به یک مولد نوسان و از سر دیگر به گیره‌ای متصل است. به ازای بسامدهای معینی از مولد نوسان، تداخل موجب ایجاد موج ایستاده بارزی (یا اصطلاحاً یک مُدِ نوسان) در تار می‌شود. گفته می‌شود تار در این بسامدهای معین که **بسامدهای تشدید** خوانده می‌شوند به تشدید درآمده است. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدید نوسان کند موج ایستاده بارزی ایجاد نمی‌شود.



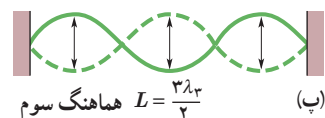
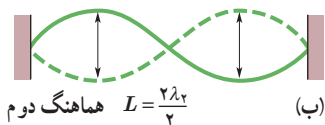
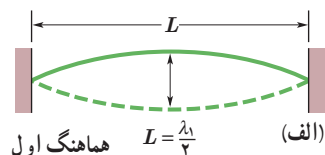
شکل ۴-۳۶ اسباب آزمایشی برای ایجاد موج ایستاده در تار کشیده. توجه کنید سری که به مولد نوسان متصل است، تقریباً در محل گره واقع است.

توجه کنید که اگرچه در این آزمایش از یک نوسان‌ساز الکتریکی برای ایجاد ارتعاش در تار استفاده کردیم، اما در سازهای موسیقی، موج‌های ایستاده را می‌توان با ضربه زدن بر تارها (مانند سنتور، سه تار، پیانو) و پوسته‌ها (مانند طبل، دف، تنبک)، و یا دمیدن در ستون‌های هوا (مانند نی، فلوت، ارگ) ایجاد کرد.

در آزمایش نشان داده شده در شکل ۴-۳۶، و در بسامدهای تشدید تار، ساده‌ترین نقش موج ایستاده فقط یک شکم دارد که در مرکز ریسمان واقع است (شکل ۴-۳۷ الف). نقش ساده بعدی وضعیتی است که سه گره و دو شکم داریم (شکل ۴-۳۷ ب). نقش سوم، چهار گره و سه شکم دارد (شکل ۴-۳۷ پ). در حالت کلی اگر طول این تار را با L نشان دهیم برای نقش موج ایستاده‌ای با



شکل ۴-۳۵ شکل یک موج ایستاده که با گره‌ها و شکم‌ها بر یک ریسمان نشان داده شده است. مرسوم است در رسم موج‌های ایستاده، دو مکان حدی شکم‌ها نشان داده شود.



شکل ۴-۳۷ سه نقش موج ایستاده برای ریسمانی که بین دو گیره کشیده شده است.

n شکم داریم:

$$L = n \left(\frac{\lambda_n}{2} \right)$$

و در نتیجه:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4-4) \quad (\text{طول موج‌های تشدید تار})$$

بنابراین بسامدهای تشدید متناظر با این طول موج‌ها چنین می‌شود:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5-4) \quad (\text{بسامدهای تشدید تار})$$

مدهای نوسان را با بسامدهای تشدید مشخص می‌کنند. پایین‌ترین بسامد را که مربوط به $n = 1$ است، بسامد اصلی و مد مربوط به آن را مد اصلی یا هماهنگ اول می‌گویند. بسامد هماهنگ دوم به ازای $n = 2$ ، بسامد هماهنگ سوم به ازای $n = 3$ و ... به دست می‌آید. به n عدد هماهنگ گفته می‌شود.

● مثال ۳-۴

طول یکی از تارهای پیانویی $1/10 \text{ m}$ و جرم آن $9/00 \text{ g}$ است. اگر بسامد اصلی این تار 131 Hz باشد، الف) تندی انتشار موج عرضی در تار چقدر است؟ ب) این تار تحت چه کششی قرار دارد؟ پ) بسامدهای چهار هماهنگ نخست این تار چقدر است؟ پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۵-۴ داریم:

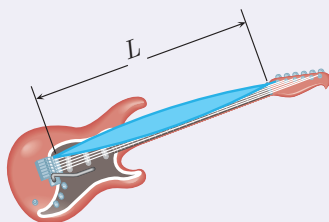
$$f_n = \frac{nv}{2L} \Rightarrow (131 \text{ Hz}) = \frac{(1)v}{(2)(1/10 \text{ m})} \Rightarrow v = 288/2 \text{ m/s} \approx 288 \text{ m/s}$$

$$\text{ب) از رابطه } v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{F}{m/L}} \text{ استفاده می‌کنیم.}$$

$$v = \sqrt{\frac{FL}{m}} \Rightarrow (288/2 \text{ m/s}) = \sqrt{\frac{F(1/10 \text{ m})}{(9/00 \times 10^{-3} \text{ kg})}} \Rightarrow F = 679/6 \text{ N} \approx 680 \text{ N}$$

پ) بدیهی است که بسامد هماهنگ اول همان بسامد اصلی است و بنابراین $f_1 = 131 \text{ Hz}$. بسامد هماهنگ‌های بعدی طبق رابطه ۵-۴، به ازای $n = 2$ ، $n = 3$ و $n = 4$ به دست می‌آید و بنابراین $f_2 = 2f_1 = 262 \text{ Hz}$ ، $f_3 = 3f_1 = 393 \text{ Hz}$ و $f_4 = 4f_1 = 524 \text{ Hz}$.

● تمرین ۵-۴

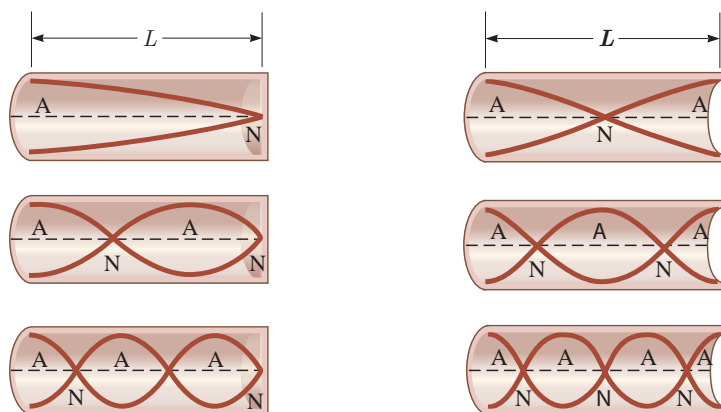


سنگین‌ترین تار یک گیتار الکتریکی دارای چگالی خطی جرمی $5/28 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$ است و تحت کشش 226 N قرار دارد. این تار در هنگام ارتعاش، تُنی با بسامد $164/8 \text{ Hz}$ را ایجاد می‌کند که بسامد اصلی تار است. الف) طول تار را به دست آورید. ب) پس از مدتی که یک نوازنده، این گیتار را می‌نوازد، در نتیجه گرم شدن و شُل شدن تارها، نیروی کشش تار مورد نظر کاهش می‌یابد و به 209 N می‌رسد. در این حالت بسامد اصلی این تار چقدر شده است؟

● پرسش ۵-۴

الف) چرا با سفت کردن سیم گیتار، بسامدی که هنگام نواختن می‌شنوید زیاد می‌شود؟
ب) چرا نوازندگان گیتار پیش از نواختن روی صفحه نمایش، گیتار را به حد کافی می‌نوازند و سپس آن را مجدداً کوک می‌کنند؟

موج ایستاده و تشدید در لوله‌های صوتی: در مورد ریسمان کشیده دیدیم چگونه برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف نقش یک موج ایستاده را ایجاد می‌کند. به همین ترتیب می‌توان موج‌های صوتی ایستاده را در لوله‌ای پرشده از هوا ایجاد کرد. وقتی موج‌های صوتی در هوای درون لوله حرکت می‌کنند، از هر انتها بازمی‌تابند و به درون لوله بازمی‌گردند، حتی اگر آن انتها باز باشد (البته اگر انتهای لوله باز باشد این بازتاب به کاملی بازتابی نیست که از یک انتهای بسته رخ می‌دهد). درست مانند تار کشیده اگر طول لوله مضرب‌های معینی از طول موج صوتی باشد، برهم‌نهی موج‌های پیش‌رونده در جهت‌های مخالف، نقش موج ایستادهٔ بارزی را در لوله ایجاد می‌کند. بسیاری از مشخصه‌های این موج ایستاده مشابه موج‌های ایستاده در ریسمان است: انتهای بستهٔ لوله مانند انتهای ثابت شدهٔ ریسمان است که در آنجا باید یک گره وجود داشته باشد، و در انتهای باز لوله نیز یک شکم وجود دارد^۱. همچنین فاصلهٔ گره‌های مجاور از هم برابر $\lambda/2$ و فاصلهٔ گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر $\lambda/4$ است. در شکل 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^۲.



شکل ۴-۳۹ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند).

شکل ۴-۳۸ سه مد نخستین یک لولهٔ صوتی با دو انتهای باز (شکم‌ها با A و گره‌ها با N مشخص شده‌اند).

پرسش ۴-۶

چرا وقتی آب را به درون ظرفی با دیواره‌های قائم مثل لیوان یا پارچ می‌ریزید، بسامد صدایی که می‌شنوید افزایش می‌یابد، یعنی صدای زیرتر و زیرتری را می‌شنوید؟ (راهنمایی: صدای حاصل از پرشدن ظرف گسترهٔ وسیعی از بسامدها را دارد که در هر لحظه، یکی از آنها با پایین‌ترین بسامد تشدید می‌شود و درون ظرف - بسامد مد اول - منطبق است.)

۱- البته برای انتهای باز یک لولهٔ صوتی که در آن موج ایستاده تشکیل شده است، در حالت‌های تشدید، شکم اندکی بیرون از این انتها قرار دارد که در این کتاب آن را در نظر نمی‌گیریم.

۲- محاسبه‌های مربوط به لوله‌های صوتی خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.



هرمن فون هلمهولتز (۱۸۹۴-۱۸۲۱ م.)

در آلمان به دنیا آمد. او نخست به مطالعه زبان‌شناسی و فلسفه پرداخت و سپس به سمت علوم طبیعی گرایش پیدا کرد. وی در سال ۱۸۴۹ دانشیار فیزیولوژی دانشگاه کونگزبرگ شد. در سال ۱۸۵۵ به استاد تمامی رشته‌های آناتومی و فیزیولوژی دانشگاه بن رسید. سه سال بعد به دانشگاه هایدلبرگ رفت و استاد فیزیولوژی آن دانشگاه شد. آخرین مقام دانشگاهی او، استادی فیزیک در دانشگاه برلین بود که از سال ۱۸۷۱ تا پایان عمر در آنجا خدمت کرد و شاگردان درخشانی چون هاینریش هرتز، ویلهلم وین، آتو لومر، آلبرت مایکلسون، فردریک شنایکی و... تربیت کرد. هلمهولتز نابغه‌ای بزرگ بود که به علوم فیزیولوژی، تشریح، فیزیک و ریاضی تسلط داشت. برخی از اکتشاف‌های وی عبارت‌اند از اندازه‌گیری سرعت سیگنال‌های عصبی، تجزیه و تحلیل حرکت امواج صوتی، نظریه هماهنگی‌های موسیقایی و نظریه دید رنگ‌ها. دستگاه افتالموسکوپ که امروزه در پزشکی از آن برای تشخیص بیماری‌های چشم استفاده می‌شود، از اختراعات اوست.

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز: اگر در دهانه باریک یک بطری بدمید، می‌توانید آن را به صدا درآورید (شکل ۴-۴۰). در واقع یک بطری مانند یک لوله صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدید می‌دهد. وقتی در دهانه یک بطری می‌دمیم گستره وسیعی از بسامدها ایجاد می‌شود. حال اگر یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدید بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می‌شود. البته نوسان‌های بطری دقیقاً مانند نوسان‌هایی نیست که در یک لوله صوتی ساده ایجاد می‌شود، زیرا بطری یک گردن دارد و هوای موجود در این گردن با هوای موجود در بقیه قسمت‌های بطری چیزی موسوم به تشدیدگر هلمهولتز را تشکیل می‌دهد که این موجب نوسانات هوای درون بطری می‌شود. نوع اولیه تشدیدگر هلمهولتز کره‌هایی توخالی با دهانه‌ای باز به شکل یک گردن است که در سال ۱۸۵۰ میلادی توسط دانشمند آلمانی، هرمن فون هلمهولتز، ساخته شد (شکل ۴-۴۱). تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدید می‌دهند. تشدیدگرهای هلمهولتز تشدیدگرهای تشدید می‌دهند. تشدیدگرهای تشدید می‌دهند. تشدیدگرهای تشدید می‌دهند.

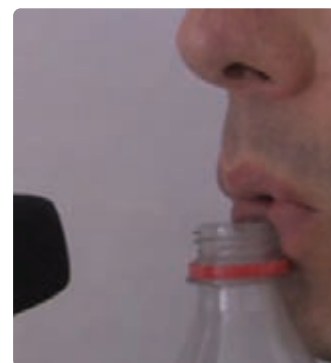


(ب)



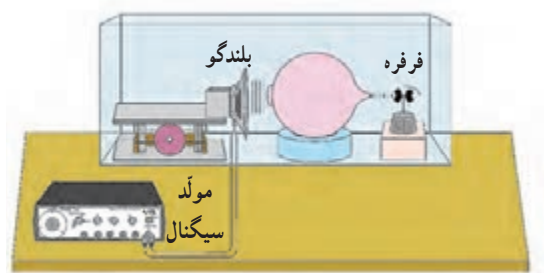
(الف)

شکل ۴-۴۱ الف) طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و ب) تصویری از چند تشدیدگر هلمهولتز کروی با اندازه‌های متفاوت



شکل ۴-۴۰ با دمیدن در دهانه یک بطری، می‌توانید آن را به صدا درآورید.

فعالیت ۴-۶



یک بلندگو را در برابر دهانه یک تشدیدگر هلمهولتز با بسامدهای تشدید می‌نویس قرار دهید و جلوی زائده خروجی آن یک شمع روشن یا یک فرفره کوچک و کم‌اصطکاک بگذارید. بسامد صوت ایجاد شده توسط بلندگو را در نزدیکی بسامد تشدید تشدیدگر آن قدر کم و زیاد کنید تا شعله شمع، منحرف شود و یا فرفره شروع به چرخیدن کند. در صورتی که منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم ندارید می‌توانید از چند دیابازون با بسامدهای معلوم و متفاوت، که بسامد یکی از آنها با یکی از بسامدهای تشدید تشدیدگر برابر باشد، استفاده کنید.^۱ دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

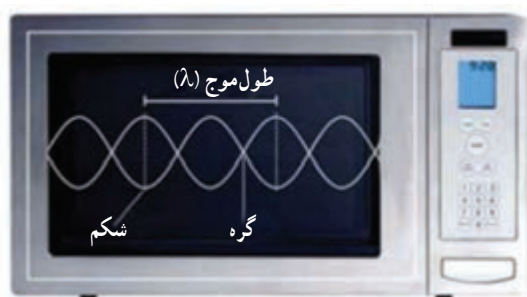
۱- می‌توانید از برنامه‌هایی با نام‌های Signal Generator, Function Generator, Audio Generator و Sound Generator که روی گوشی همراه نصب می‌شوند نیز به عنوان منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم استفاده کنید.

پرسش ۴-۷



با دمیدن در بطری‌های یکسان با سطوح مایع مختلف می‌توان آهنگی با بسامدهای متفاوت ایجاد کرد. دلیل آن چیست؟

فناوری و کاربرد: امواج ایستاده در اجاق‌های میکروموج



تصویری یک بُعدی از ایجاد امواج ایستاده در داخل یک اجاق میکروموج

اجاق‌های میکروموج (مایکروفر) بر اساس تداخل امواج الکترومغناطیسی و تشکیل امواج ایستاده کار می‌کنند. بسامد امواج ایستاده ایجاد شده در این اجاق‌ها 2450 GHz و طول موج آنها حدود 12 cm است. میکروموج‌های بازتابیده از دیواره‌های فلزی اجاق با برهم‌نهی با موج‌های تابیده، موج‌های ایستاده‌ای را در داخل محفظه اجاق ایجاد می‌کنند که از گره‌ها و شکم‌ها تشکیل شده‌اند. در محل شکم‌ها دامنه نوسان میدان الکتریکی بیشینه است. مولکول‌های آب موجود در مواد غذایی در این نقاط به شدت

به ارتعاش درمی‌آیند و بیشترین افزایش دما ایجاد می‌شود. در حالی که در محل گره‌ها، دامنه نوسان میدان الکتریکی صفر است و هیچ نوسان میدان الکتریکی‌ای نداریم که موجب پختن یا گرم شدن مواد غذایی شود و در گره‌ها اصطلاحاً نقاط سرد داریم. بنابراین غذا به‌طور یکنواخت پخته یا گرم نمی‌شود. به همین دلیل اجاق‌های میکروموج صفحه‌های گردانی دارند تا با گرداندن غذا در اجاق، هیچ بخشی از غذا در گره (نقطه سردی) باقی نماند.

فعالیت ۴-۷

تداخل در امواج الکترومغناطیسی (آزمایش هرتز): اگرچه ماکسول پیش از پایان قرن نوزدهم وجود امواج الکترومغناطیسی را پیش‌بینی کرده بود، این هرتز بود که با آزمایش‌های تداخلی خود که به تولید موج‌های الکترومغناطیسی ایستاده انجامید، وجود موج‌های الکترومغناطیسی را در 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.

۴-۱ بازتاب موج

۱. دانش‌آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیک تر 24 m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از $1/5\text{ s}$ و صدای پژواک دوم را $1/0\text{ s}$ بعد از پژواک اول می‌شنود.
الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟
ب) فاصله بین دو صخره را بیابید.

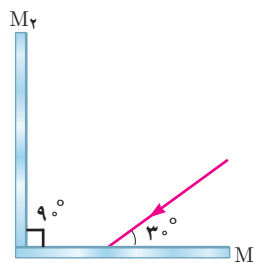
۲. اگر در فاصله مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونه جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان^۱ در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کوکولکان

۳. وقتی یک باریکه لیزر را به دیوار کلاس می‌تابانیم، همه دانش‌آموزان نقطه رنگی ایجاد شده روی دیوار را می‌بینند. دلیل آن چیست؟

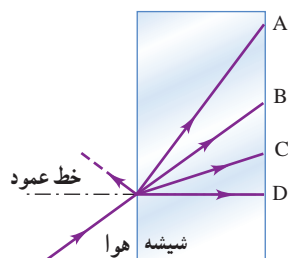
۴. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.



۴-۲ شکست موج

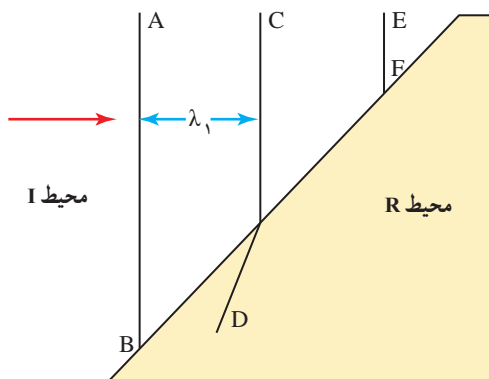
۵. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیب‌دار، تغییر می‌کند.

۶. شکل زیر پرتوی نوری را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟

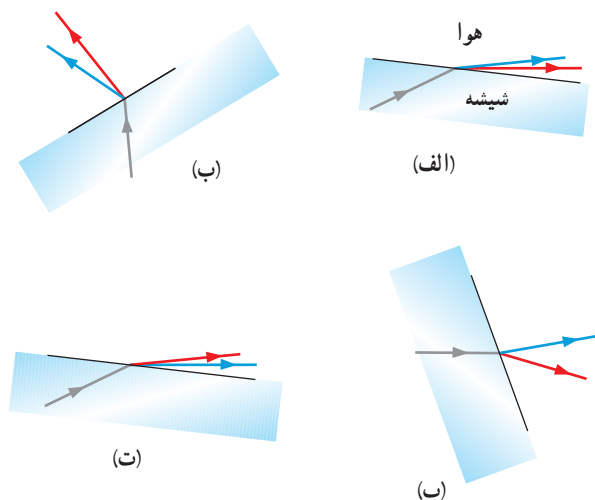


۷. ضریب شکست آب $4/3$ و ضریب شکست شیشه $5/3$ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.
۸. شکل زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده‌اند.

الف) ادامه جبهه موج EF را در محیط R رسم کنید.
ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.
پ) آیا با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟



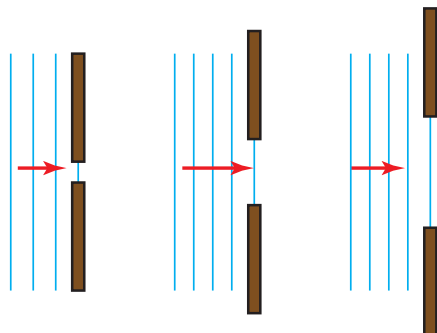
۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴-۳ پراش موج

۱۵. در یک تشت موج، مطابق شکل زیر، موج تختی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.

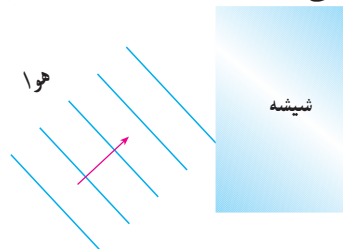


۱۶. گوشی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود ۲GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراشیده می‌شوند و به منطقه سایه مانع می‌رسند.

۹. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط باز می‌تابد 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.

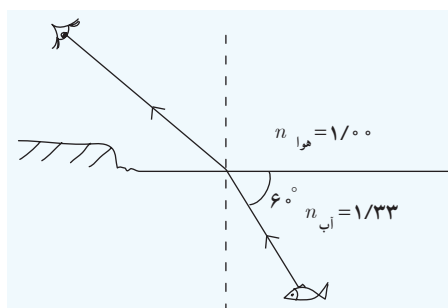


۱۰. طول موج نور قرمز لیزر هلیوم – نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجیه چشم ۴۷۴nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید.

۱۱. سکه‌ای را در گوشه فنجان خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. سپس بی‌آنکه سرتان را حرکت دهید به آرامی در فنجان آب بریزید، به طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرسیدن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.

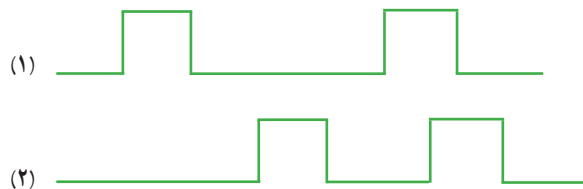


۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویه 6° به مرز آب – هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا چقدر است؟

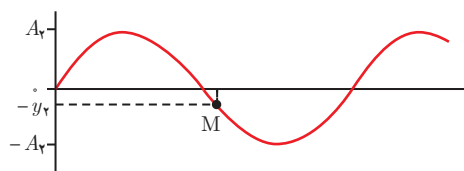
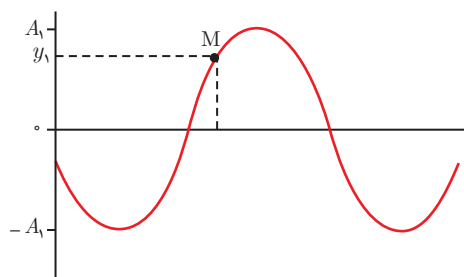


۴-۴ تداخل امواج

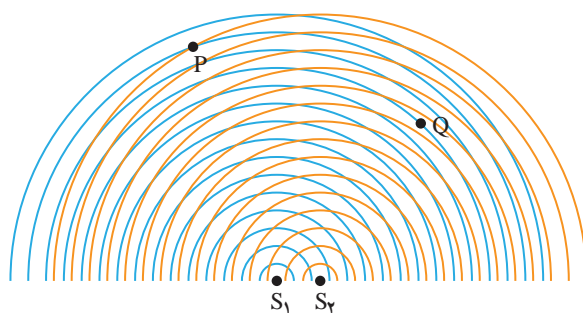
۱۷. در شکل‌های زیر، وقتی موج ۱ بر موج ۲ برهم نهاده شود شکل موج برهم نهاده را رسم کنید.



۱۸. شکل‌های زیر نمودار جابه‌جایی - مکان دو موج را در لحظه معینی نشان می‌دهد. جابه‌جایی برای نقطه M در این لحظه چقدر است؟



۱۹. دو چشمه نقطه‌ای S_1 و S_2 به‌طور هم‌زمان، با بسامد یکسان، و همگام با یکدیگر در یک تشت موج نوسان می‌کنند و جبهه‌های موجی را مطابق شکل زیر به‌وجود می‌آورند. توضیح دهید دامنه موج برای نقطه‌های P و Q چگونه است؟



۲۰. در آزمایش تداخل صوتی (شکل ۴-۳۱ کتاب)، فاصله بین هر نقطه با صدای بالا (L) تا نقطه با صدای ضعیف (S) مجاورش، متناسب با طول موج صوتی به‌کار رفته در این آزمایش است. برای آنکه این آزمایش به‌سادگی انجام پذیر باشد باید فاصله نقطه‌های S و L مجاور نه خیلی زیاد، و نه خیلی کم باشد.

الف) بسامد صوت گسیل شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و L مجاور به هم نزدیک شوند؟

ب) بسامد صوت گسیل شده از بلندگوها را چگونه تغییر دهیم تا نقطه‌های S و L مجاور از هم دور شوند؟

۲۱. در آزمایش یانگ، الف) اگر آزمایش را به‌جای نور تکفام سبز با نور تکفام قرمز انجام دهیم پهنای هر نوار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟

ب) اگر آزمایش را به‌جای آنکه در هوا انجام دهیم، در آب انجام دهیم، پهنای هر نوار تاریک یا روشن چه تغییری می‌کند؟

۲۲. تار که بین دو تکیه‌گاه محکم شده است در هماهنگ اول خود با بسامد f به نوسان درمی‌آید. شکل زیر جابه‌جایی تار در $t=0$ را نشان می‌دهد.



الف) جابه‌جایی تار را در $t = \frac{1}{4f}$ و $t = \frac{1}{2f}$ رسم کنید.

ب) فاصله بین تکیه‌گاه‌ها 1 m است. اگر تندی موج عرضی در تار 24 m/s باشد، بسامد نوسان تار چقدر می‌شود؟

۲۳. تار ویولنی که طول آن 15 cm است و در دو انتها بسته شده است، در مُد $n=1$ خود نوسان می‌کند. تندی موج عرضی در این تار 25 m/s و تندی صوت در هوا 348 m/s است. الف) بسامد و ب) طول موج امواج صوتی گسیل شده از تار چقدر است؟

۲۴. اگر بسامد اصلی یک تار ویولن به جرم 8 mg و طول 22 cm برابر 92 Hz باشد،

الف) تندی موج عرضی در این تار را به دست آورید.

ب) کشش تار چقدر است؟

الف) این بسامد کدام است؟

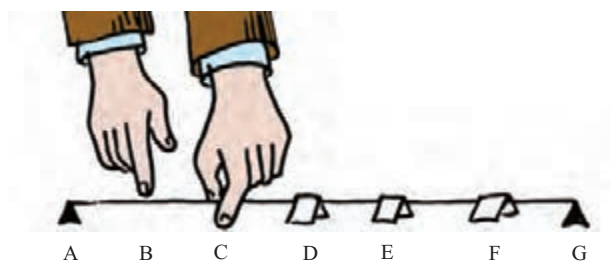
ب) بسامد هماهنگ هفتم چقدر است؟

۲۹. در شکل نشان داده شده، نقاط A، B، C، D، E، F، و G و

در فاصله‌های یکسانی از هم قرار دارند. تار را در نقطه C به آرامی می‌گیریم، طوری که نوسان‌های بخشی از تار که سمت چپ نقطه C است، بتواند به سمت راست این نقطه منتقل شود.

اکنون تار را در نقطه B می‌نوازیم. بدین 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 D، E، و F قرار دارند، چه رخ می‌دهد؟



۳۰. وقتی گالن آبی را خالی می‌کنیم، با

خالی شدن آب صدای گلوپ گلوپی را

می‌شنویم. موقع خالی شدن گالن بسامد

این صدا کمتر می‌شود (صدای بم‌تر) یا

بیشتر (صدای زیرتر)؟ چرا؟

۳۱. در گذشته برای آگاه کردن کشتی‌ها از خطر صخره‌ها، در

صدف‌های حلزونی می‌دمیدند. امروزه بیشتر برای جشن‌ها و

شادی‌ها در آنها می‌دمند. چگونه این صدف‌ها می‌توانند چنین

صدایی ایجاد کنند؟



پ) برای بسامد اصلی، طول موج عرضی در تار و طول موج امواج صوتی گسیل شده توسط تار چقدر است؟ تندی صوت در هوا را 340 m/s بگیرید.

۳۲. تار ویولنی به طول 30 cm و چگالی خطی جرمی 0.65 g/m در نزدیکی بلندگویی قرار داده شده است که توسط یک نوسان‌ساز صوتی با بسامد متغیر به کار می‌افتد. معلوم شده است وقتی بسامد نوسان‌ساز در گستره 150 Hz - 500 Hz تغییر می‌کند تار فقط هنگامی به نوسان در می‌آید که بسامد آن 880 Hz و 1320 Hz باشد.

الف) چه پدیده‌ای سبب به نوسان در آمدن تار شده است؟

ب) بسامد اصلی تار چقدر است؟ پ) کشش تار چقدر است؟

۳۳. ریسمان‌های A و B، طول و چگالی خطی جرمی یکسانی

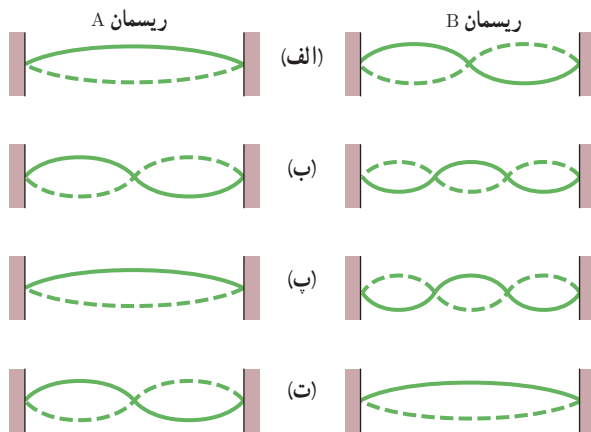
دارند، ولی ریسمان B تحت کشش بیشتری نسبت به ریسمان

A قرار دارد. شکل زیر چهار وضعیت (الف) تا (ت) را نشان

می‌دهد که در آنها نقش‌های موج ایستاده در دو ریسمان وجود

دارند. در کدام وضعیت‌ها، احتمال دارد که ریسمان‌های A و B

در بسامد تشدید ی یکسانی نوسان کنند؟



۳۴. در یک تار دو سر بسته، یکی از بسامدهای تشدید

325 Hz ، و بسامد تشدید بعدی 390 Hz است. بسامد

تشدید پس از 195 Hz این تار چیست؟

۳۵. رشته‌ای از بسامدهای تشدید یک تار با دو انتهای بسته

عبارت‌اند از: 150 Hz ، 225 Hz ، 300 Hz ، و 375 Hz . در

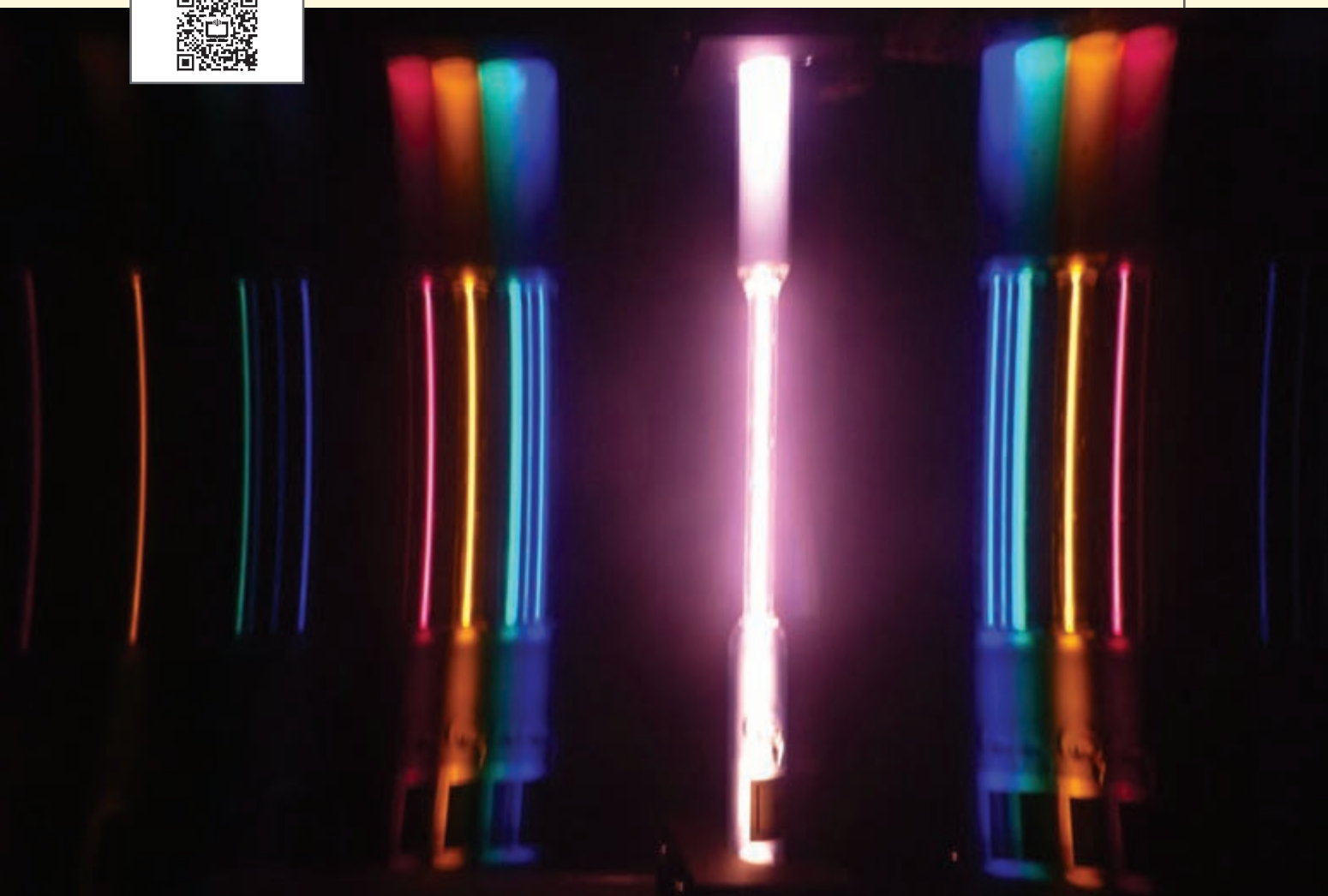
این رشته یک بسامد (کمتر از 400 Hz) جا افتاده است.



فصل



آشنایی با فیزیک اتمی



چرا وقتی به الکترودهای دو سر لامپ‌های حاوی گاز رقیق و کم فشار عناصری مانند هیدروژن، هلیوم، جیوه یا نئون، ولتاژ بالایی را اعمال می‌کنیم شروع به گسیل نور به رنگ‌های مختلف می‌کنند؟

بخش‌ها

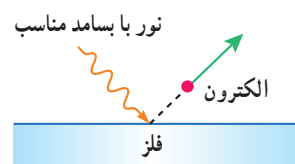
- ۱-۵ اثر فوتوالکتریک و فوتون
- ۲-۵ طیف خطی
- ۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور
- ۴-۵ لیزر

تا دهه‌های پایانی قرن نوزدهم، بیشتر حوزه‌های فیزیک، از جمله مکانیک نیوتونی، ترمودینامیک و نظریه الکترومغناطیس ماکسول که امروزه با نام فیزیک کلاسیک از آنها یاد می‌شود به صورت بندی نهایی خود رسیده بود و به نظر می‌رسید که در توصیف گستره وسیعی از پدیده‌های فیزیکی کاملاً موفق‌اند. با این حال در آن سال‌ها، پدیده‌هایی مشاهده و آزمایش‌هایی انجام شد که تبیین کامل و درست آنها با نظریه‌های فیزیک کلاسیک ممکن نبود و سبب تغییرات بنیادی در دیدگاه فیزیک‌دانان نسبت به توضیح رفتار برخی از پدیده‌های فیزیکی شد. به طوری که در سه دهه آغازین قرن بیستم، نتایج این تلاش‌ها به نظریه نسبیت خاص (مربوط به مطالعه پدیده‌ها در تندی‌های بسیار زیاد و قابل مقایسه با تندی نور)، نظریه نسبیت عام (مربوط به مطالعه هندسه فضا - زمان و گرانش) و نظریه کوانتومی (مربوط به مطالعه پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند اتم‌ها و ذره‌های سازنده آنها) منجر شد که امروزه به آن فیزیک جدید می‌گویند. اندکی پس از ظهور این نظریه‌ها، شاخه‌های دیگری مانند فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات بنیادی و کیهان‌شناسی به تدریج به وجود آمدند.

در این فصل ضمن معرفی و بررسی برخی از پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک و طیف خطی گسیلی و جذبی از گازهای اتمی که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند، به معرفی الگوهای اتمی می‌پردازیم. در پایان نیز با لیزر و مبانی فیزیکی آن آشنا خواهیم شد.

۱-۵ اثر فوتوالکتریک و فوتون

اگر بر کلاهک یک برق‌نما (الکتروسکوپ) با بار منفی، نور فرابنفشی تابیده شود، مشاهده می‌شود که انحراف ورقه‌های آن کاهش می‌یابد (شکل ۱-۵ الف) در حالی که با تابش نور مرئی، تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نما رخ نمی‌دهد (شکل ۱-۵ ب). چرا این پدیده اتفاق می‌افتد؟ آزمایش نشان می‌دهد وقتی نوری با بسامد مناسب مانند نور فرابنفش به سطح فلزی بتابد الکترون‌هایی از آن گسیل می‌شوند (شکل ۱-۵-۲). این پدیده فیزیکی را، **اثر فوتوالکتریک** و الکترون‌های جدا شده از سطح فلز را **فوتوالکتر** می‌نامند.



شکل ۱-۵-۲ الکترون‌ها، انرژی نور فرودی را جذب می‌کنند و از سطح فلز خارج می‌شوند.



شکل ۱-۵-۱ الف) برهم‌کنش نور فرودی فرابنفش با کلاهک برق‌نما سبب می‌شود تا ورقه‌های آن به سرعت به هم نزدیک شوند. ب) در حالی که برهم‌کنش نور مرئی گسیل‌شده از یک لامپ رشته‌ای تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نما به وجود نمی‌آورد.

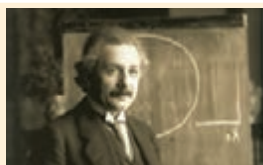
برای بررسی اثر فوتوالکتریک، طرح آزمایش ساده‌ای در شکل ۱-۵-۳ نشان داده شده است. در این دستگاه صفحه فلزی هدف T و جمع‌کننده فلزی C درون یک محفظه شیشه‌ای خلأ قرار دارند که از بیرون به یک گالوانومتر (آمپرسنج حساس) متصل شده‌اند.^۱ نور تکفام (تک بسامد) با بسامد به قدر کافی بالا بر صفحه T فرود می‌آید و تعدادی الکترون را آزاد می‌کند. این فوتوالکترها به جمع‌کننده

۱- نماد T از سرحرف واژه Target به معنای هدف و نماد C از سرحرف واژه Collector به معنای جمع‌کننده گرفته شده است.



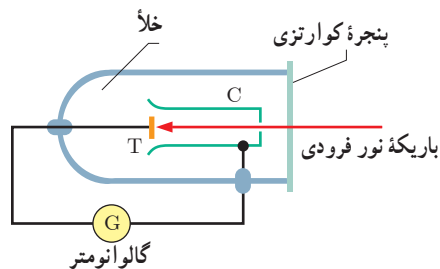
ماکس پلانک (۱۸۵۸-۱۹۴۷ م.)

در سال ۱۸۸۵ دانشیار فیزیک نظری در دانشگاه کیل شد و علاوه بر تدریس، مقاله‌های مهمی دربارهٔ ترمودینامیک منتشر کرد. از کارهای او در زمینه توزیع طیف تابشی، که به نظریه کوانتومی انجامید، با اهدای جایزه نوبل سال ۱۹۱۸ تقدیر شد. در سال‌های بعد، نوشته‌های پلانک بیشتر در زمینه موضوع‌های مذهبی و فلسفی بود. درست در استانه دورانی که پلانک از نظر حرفه‌ای مورد تحسین همگان قرار گرفته بود، متأسفانه زندگی شخصی وی با ترازوی آمیخته شد، به طوری که طی سال‌های ۱۹۰۹ تا ۱۹۱۹ همسر، پسر بزرگ و دخترهای دوقلوش به دلایل متفاوتی از دنیا رفتند. پلانک در سال ۱۹۲۷، پس از حدود چهل سال سابقهٔ دانشگاهی، از دانشگاه برلین بازنشسته شد.



آلبرت اینشتین (۱۸۷۹-۱۹۵۵ م.)

تا ۱۷ سالگی در آلمان تحصیل کرد ولی با ناتمام گذاشتن سال آخر تحصیل خود، آلمان را ترک کرد و به سوئیس رفت. نظام آموزشی انعطاف‌پذیر سوئیس تحولی شگرف در اینشتین ایجاد کرد و توانست پس از پایان دبیرستان، در سال ۱۹۰۲ از پلی تکنیک زوریخ، لیسانس فیزیک خود را دریافت کند. در سال ۱۹۰۵ چندین مقاله مهم منتشر کرد. بعدها یکی از این مقاله‌ها که در آن به توضیح اثر فوتوالکتریک می‌پرداخت، جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۲۱ برای او به ارمغان آورد. یکی دیگر از مقاله‌های او در سال ۱۹۰۵، ارائهٔ نظریه نسبیت خاص بود که دربرگیرندهٔ اندیشه‌ای نو و انقلابی دربارهٔ ماهیت فضا و زمان بود. اینشتین همچنین در سال ۱۹۱۵ مقاله‌ای دربارهٔ نظریه نسبیت عام منتشر کرد. او در این مقاله نظریهٔ جدیدی دربارهٔ گرانش ارائه کرد که نظریه نیوتون را به‌عنوان حالتی خاص دربرمی‌گرفت.



شکل ۵-۳ در اثر فوتوالکتریک، نوری تکفام با بسامدی به قدر کافی بالا، الکترون‌ها را از سطح صفحه فلزی T بیرون می‌آورد. این فوتوالکتریک‌ها، به طرف جمع‌کننده C می‌روند و جریانی را در مدار به وجود می‌آورند.

C می‌رسند و در نتیجه گالوانومتر که در مدار قرار دارد جریانی را آشکار می‌کند. با افزایش شدت این نور، گالوانومتر عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد، حال آنکه آزمایش نشان می‌دهد که اگر بسامد نور فرودی از مقدار معینی کمتر باشد، هر چقدر هم که شدت نور فرودی افزایش یابد این پدیده رخ نمی‌دهد و گالوانومتر عبور جریانی را نشان نمی‌دهد.

همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم، نور موجی الکترومغناطیسی است. بنابراین می‌توان انتظار داشت هنگام برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی (نور فرودی) با سطح فلز، میدان الکتریکی این موج، نیروی $\vec{F} = -e\vec{E}$ به الکترون‌های فلز وارد کند و آنها را به نوسان وادارد. به این ترتیب، وقتی دامنهٔ نوسان برخی از الکترون‌ها به قدر کافی بزرگ شود انرژی جنبشی لازم را برای جدا شدن از سطح فلز پیدا می‌کنند. بنا به این دیدگاه کلاسیکی، این پدیده باید با هر بسامدی رخ دهد در حالی که این نتیجه با تجربه سازگار نیست.

یکی دیگر از پیامدهای نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول این است که شدت نور با مربع دامنهٔ میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($I \propto E^2$). به این ترتیب انتظار می‌رود به‌ازای یک بسامد معین، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی بیشتری از فلز خارج شوند، نتیجه‌ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند.

پس از نزدیک به ۲۰ سال که تلاش بسیاری از دانشمندان برای توجیه اثر فوتوالکتریک به کمک مفاهیم و قانون‌های فیزیک کلاسیک به نتیجه نرسیده بود در سال ۱۹۰۵ اینشتین توضیحی قانع‌کننده در مورد این اثر ارائه داد و جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۲۱ میلادی را به خاطر تبیین آن دریافت کرد. اینشتین در نظریهٔ فوتوالکتریک خود با توجه به کارهای قبلی پلانک در زمینه تابش گرمایی اجسام، فرض کرد که نور با بسامد f را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفت. هر بسته انرژی، که بعدها فوتون^۱ نامیده شد، دارای انرژی‌ای است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = hf \quad (\text{انرژی فوتون}) \quad (۱-۵)$$

در این رابطه h ثابت پلانک نامیده می‌شود و به‌طور تجربی معلوم شده است که مقدار آن $h = ۶.۶۳ \times ۱۰^{-۳۴} \text{ J.s}$ است.

بنا بر نظر اینشتین، وقتی نوری تکفام بر سطح فلزی می‌تابد، هر فوتون صرفاً با یکی از الکترون‌های فلز برهم‌کنش می‌کند. اگر فوتون انرژی کافی داشته باشد تا فرایند خارج کردن الکترون از فلز را انجام دهد، الکترون به طور آنی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون خارج‌شده تبدیل می‌شود.

۱- این نام را شیمی‌دان آمریکایی، گیلبرت لوئیس، در سال ۱۹۲۶ میلادی برای نخستین بار پیشنهاد کرد.

این نظر اینشتین را می‌توان به کمک قانون پایستگی انرژی به صورت زیر نوشت :

$$(2-5) \quad hf = W + K \quad (\text{قانون پایستگی انرژی در اثر فوتوالکتریک})$$

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 فلز کمتر مقیدند، برای خارج کردن آنها از فلز کار کمتری لازم است. بنابراین اگر حداقل کار لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز خاص W باشد، انرژی جنبشی سریع‌ترین فوتوالکترن‌های گسیل‌شده از آن برابر خواهد بود با :

$$(3-5) \quad K_{max} = hf - W_0 \quad (\text{معادله فوتوالکتریک})$$

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 معین است. در جدول ۱-۵ تابع کار چند فلز داده شده است. اگر نمودار K_{max} بر حسب f را 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 ۴-۵). در این بسامد، که معمولاً **بسامد آستانه** نامیده می‌شود، الکترون بدون هیچ انرژی جنبشی‌ای در 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 به دست می‌آید :

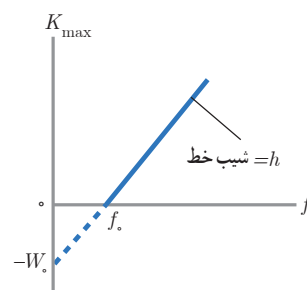
$$(4-5) \quad f_0 = \frac{W_0}{h} \quad (\text{بسامد آستانه فوتوالکترن‌ها})$$

پوشش ۱-۵

تابشی با بسامد معین باعث می‌شود تا فوتوالکترن‌هایی سطح فلز ۱ را ترک کنند، ولی از سطح فلز ۲ خارج نشوند. انرژی فوتون‌های فرودی را با تابع کار فلزها مقایسه کنید.

جدول ۱-۵ تابع کار چند فلز

فلز	W_0 (eV)
طلا	۵/۲۰
کبالت	۵/۰۱
نیکل	۴/۹۰
مس	۴/۷۰
نقره	۴/۶۴
تنگستن	۴/۵۲
آهن	۴/۵۰
روی	۴/۳۱



شکل ۴-۵ نمودار بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکترن‌ها بر حسب بسامد نور فرودی. وقتی بسامد نور فرودی بزرگ‌تر از f_0 یا مساوی با آن باشد فوتون‌ها می‌توانند الکترون‌ها را از فلز خارج کنند.

توجه : در فیزیک اتمی و فیزیک هسته‌ای، یکای ژول برای بیان انرژی فوتون‌ها و ذرات، یکای بسیار بزرگی است. به همین دلیل از یکایی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می‌کنیم. برای آشنایی با این یکای غیر SI، فرض کنید الکترونی با بار $q = -e = -1/60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ، بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل ۱V حرکت کند. در این صورت بنا به رابطه $\Delta U = q\Delta V$ که در فیزیک ۲ با آن آشنا شدید، اندازه تغییر در انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون برابر است با :

$$|\Delta U| = |q\Delta V| = |(-1/60 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V})| = 1/60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

این مقدار انرژی را بنا به تعریف، یک الکترون ولت ($1 \text{ eV} = 1/60 \times 10^{-19} \text{ J}$) می‌نامند. مضرب‌های دیگری از این یکا به صورت keV (کیلو الکترون ولت) و MeV (میگا الکترون ولت) اغلب به کار می‌رود.

به این ترتیب یکای ثابت پلانک را به جای J.s می‌توان بر حسب یکای eV.s نیز بیان کرد :

$$h = (6/63 \times 10^{-34} \text{ J.s}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1/60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 4/14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$$

یک چشمه نور مرئی با توان 100 W ، فوتون‌هایی با طول موج $\lambda = 550\text{ nm}$ گسیل می‌کند.
 الف) انرژی هر فوتون را برحسب الکترون ولت محاسبه کنید.
 ب) چه تعداد فوتون در هر ثانیه از این چشمه نور گسیل می‌شود؟
پاسخ: الف) از رابطه 150 eV انرژی هر فوتون برابر است با:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

ابتدا مقدار hc را حساب می‌کنیم:

$$hc = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}) (3.00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1.99 \times 10^{-25} \text{ J.m}$$

اگر J را برحسب eV و m را برحسب nm بنویسیم، خواهیم داشت:

$$hc = (1.99 \times 10^{-25} \text{ J.m}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) \left(\frac{1 \text{ nm}}{10^{-9} \text{ m}} \right) = 1.24 \times 10^3 \text{ eV.nm}$$

بنابراین در حل مسائل می‌توانیم مقدار hc را برابر 1240 eV.nm اختیار کنیم. خوب است این مقدار و یکای آن را به خاطر بسپارید تا در صورت نیاز از آن استفاده کنید. به این ترتیب داریم:

$$E = \frac{1.24 \times 10^3 \text{ eV.nm}}{550 \text{ nm}} = 2.25 \text{ eV}$$

ب) ابتدا انرژی تابش‌شده توسط لامپ را در هر ثانیه به دست می‌آوریم:

$$E = pt = (100 \text{ W})(1 \text{ s}) = 100 \text{ J} = (100 \text{ J}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 6.25 \times 10^{20} \text{ eV}$$

نسبت این انرژی به انرژی هر فوتون که در قسمت الف پیدا کردیم، شمار فوتون‌های گسیل‌شده از این چشمه را در هر ثانیه به دست می‌دهد. به این ترتیب داریم:

$$n = \frac{6.25 \times 10^{20} \text{ eV}}{2.25 \text{ eV}} = 2.78 \times 10^{20}$$

این شمار زیاد فوتون، که در هر ثانیه از یک چشمه معمولی نور در فضای پیرامون آن گسیل می‌شود حاکی از آن است که در زندگی روزمره آثار ناشی از این شمار بسیار زیاد فوتون برای ما ملموس نیست.

تابع کار طلا برابر 5.2 eV است.

الف) بسامد کمینه نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح این فلز را پیدا کنید.

ب) طول موج آستانه (طول موج متناظر با بسامد آستانه f_0) را به دست آورید.

پاسخ: الف) بسامد کمینه نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا برابر بسامد آستانه است. بنابراین از رابطه 450 nm داریم:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{5.2 \text{ eV}}{4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}} = 1.26 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

فوتون‌های نوری 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.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{ch}{W_0} = \frac{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s})}{5.2 \text{ eV}} = 2.388 \times 10^{-7} \text{ m} \approx 239 \text{ nm} \quad \text{ب)}$$

طول موج متناظر با این بسامد تقریباً 239 nm به دست آمد که در ناحیه فرابنفش طیف الکترومغناطیسی قرار دارد.

مثال ۳-۵

نوری با طول موج 240 nm به سطحی از جنس تنگستن با تابع کار 4.52 eV می‌تابد.
 الف) بسامد نور فرودی و بسامد آستانه را برای تنگستن پیدا کنید.

ب) بیشینه تندی فوتوالکتردهای خارج شده از تنگستن را حساب کنید. (جرم الکترون را $9.11 \times 10^{-31}\text{ kg}$ بگیرید.)

پاسخ: الف) از رابطه $f = c/\lambda$ ، بسامد متناظر با طول موج نور فرودی را به دست می‌آوریم:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{240 \times 10^{-9} \text{ m}} = 1.25 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

همچنین بنا به رابطه ۴-۵، بسامد آستانه برای سطحی از جنس تنگستن برابر است با:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{4.52 \text{ eV}}{4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}} = 1.09 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

چون بسامد نور فرودی بیشتر از بسامد آستانه است ($f > f_0$)، برهم کنش فوتون‌های نور فرودی با الکترون‌های سطح تنگستن، سبب خارج شدن و ترک فوتوالکتردهایی از سطح آن می‌شود.

ب) ابتدا بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکتردهای گسیل شده را از رابطه ۳-۵ محاسبه می‌کنیم. به این ترتیب داریم:

$$K_{\max} = hf - W_0 = \frac{hc}{\lambda} - W_0 = \frac{1.24 \times 10^3 \text{ eV.nm}}{240 \text{ nm}} - 4.52 \text{ eV} = 0.646 \text{ eV}$$

با تبدیل یکای مقدار به دست آمده بر حسب ژول داریم:

$$K_{\max} = (0.646 \text{ eV}) \left(\frac{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 1.03 \times 10^{-19} \text{ J}$$

به این ترتیب از رابطه $K_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$ ، بیشینه تندی فوتوالکتردهای خارج شده برابر است با:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.03 \times 10^{-19} \text{ J}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 4.75 \times 10^5 \text{ m/s}$$

تمرین ۱-۵

طول موج آستانه برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر 254 nm است.

الف) تابع کار این فلز بر حسب الکترون ولت چقدر است؟

ب) توضیح دهید که آیا اثر فوتوالکتریک به ازای طول موج‌های کوچک‌تر، مساوی یا بزرگ‌تر از 254 nm مشاهده خواهد شد.

تمرین ۲-۵

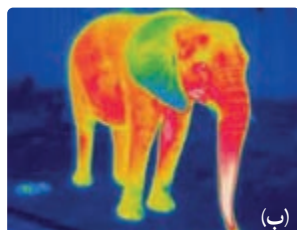
در پدیده فوتوالکتریک برای فلز روی،

الف) بلندترین طول موجی را پیدا کنید که سبب گسیل فوتوالکتردها می‌شود.

ب) وقتی نوری با طول موج 220 nm با سطح این فلز برهم کنش کند، بیشینه تندی فوتوالکتردها چقدر است؟



(الف)



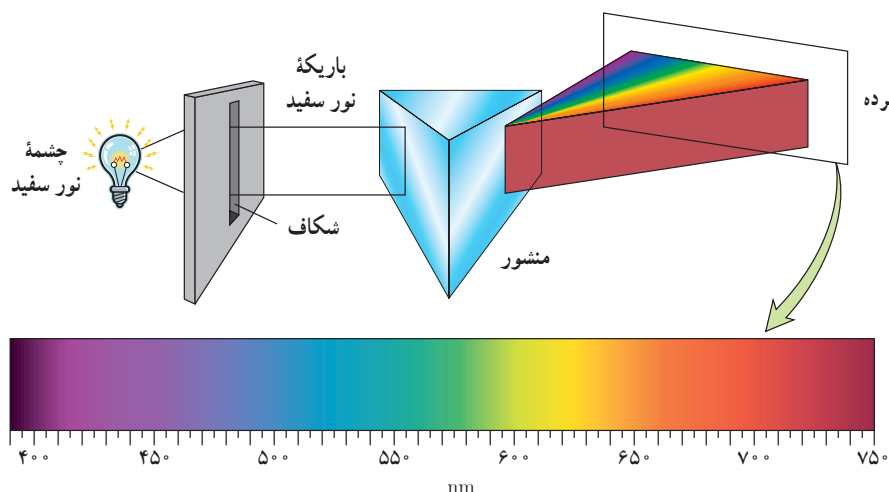
(ب)

شکل ۵-۵ الف) اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. ب) در دماهای معمولی، بیشتر تابش گسیل‌شده از سطح اجسام در ناحیهٔ فروسرخ طیف قرار دارد.

شکست مدل موج الکترومغناطیسی در توضیح برخی پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک به این معنی نیست که مدل موجی نور باید کنار گذاشته شود. ولی، باید متوجه باشیم که مدل موجی، تمام ویژگی‌های نور را دربر ندارد و به همین دلیل قادر نیست توجیه درستی از تمامی پدیده‌های فیزیکی مرتبط با برهم‌کنش نور با ماده را ارائه کند.

۵-۲ طیف خطی

در فیزیک ۱ دیدیم که همهٔ اجسام در هر دمایی که باشند، از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل (نشر) می‌کنند که به آن **تابش گرمایی** گفته می‌شود (شکل ۵-۵). برای یک جسم جامد، نظیر رشتهٔ داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گسترهٔ پیوسته‌ای از طول‌موج‌هاست. به همین دلیل طیف ایجادشده در این شرایط را **طیف گسیلی پیوسته** یا به اختصار **طیف پیوسته** می‌نامند. بخشی از این طیف که در گسترهٔ مرئی طول‌موج‌ها واقع است در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، ناشی از برهم‌کنش قوی بین اتم‌های سازندهٔ آن است. حال آنکه گازهای کم‌فشار و رقیق، که اتم‌های منفرد آنها از برهم‌کنش‌های قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسسته را گسیل می‌کنند که شامل طول‌موج‌های معینی است. این طیف گسسته را، معمولاً **طیف گسیلی خطی** یا به اختصار **طیف خطی** می‌نامند و طول‌موج‌های ایجادشده در آن، برای اتم‌های هر گاز منحصر به فرد هستند و سرنخ‌های مهمی را دربارهٔ نوع و ساختار اتم‌های آن گاز به دست می‌دهند. دو نمونهٔ آشنا از گازهای کم‌فشار و رقیق، در لامپ‌های نئون و لامپ‌های جیوه‌ای وجود دارد. شکل ۵-۷ قسمت‌های مرئی طیف‌های خطی این دو گاز را نشان می‌دهد. طول‌موج‌های مرئی خاصی که اتم‌های این گازها گسیل می‌کنند به تابلوهای نتونی و لامپ‌های جیوه‌ای رنگ‌های مشخصی می‌دهند.



شکل ۵-۶ طیف گسیلی پیوستهٔ نور سفید از رشتهٔ داغ یک لامپ روشن. در این شکل تنها بخش مرئی طیف نشان داده شده است که گسترهٔ طول‌موج آن از حدود ۴۰۰ nm (نور بنفش) تا حدود ۷۵۰ nm (نور قرمز) است.



شکل ۵-۷ طیف‌های گسیلی خطی برای نئون و جیوه

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیوم، جیوه، سدیم و نئون معمولاً از یک لامپ باریک و بلند شیشه‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم فشار است استفاده می‌شود. دو الکترود به نام‌های آند و کاتد در دو طرف این لامپ قرار دارد که به ترتیب به پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. 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 ایجاد شده و همچنین رنگ نور گسیل شده، 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 ۵-۸ نشان داده شده است. در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضی‌دان سوئیسی، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج هر یک از خط‌های شناخته شده مربوط به طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی را به دست می‌داد. این رابطه عبارت است از:

$$\lambda = (364 / 56 \text{ nm}) \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (\text{معادله بالمر}) \quad (5-5)$$

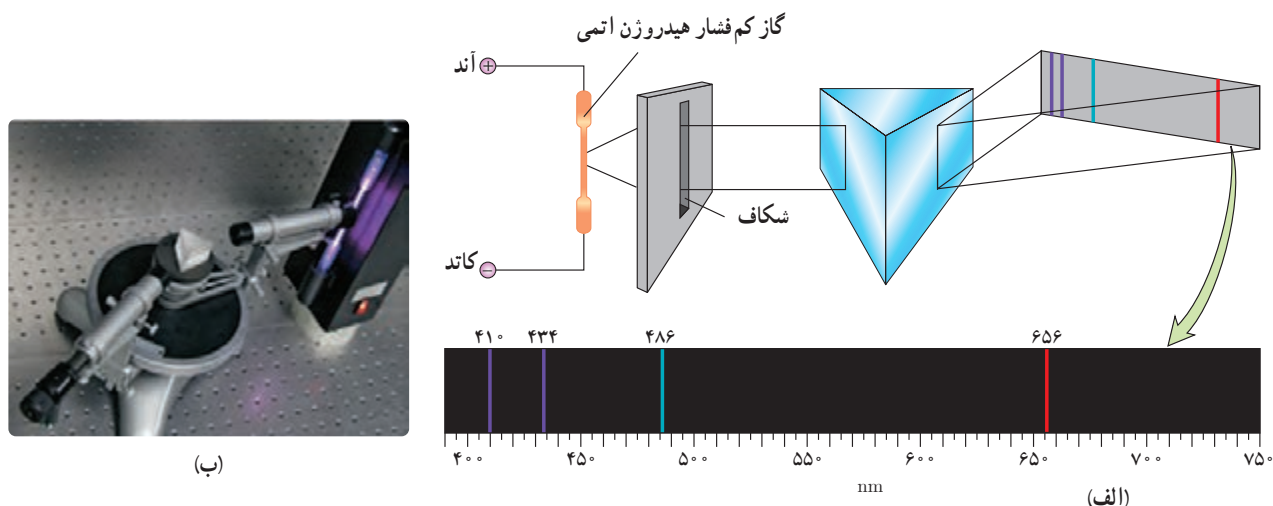
که در آن $n \geq 3$ و همواره عددی صحیح است. با قرار دادن $n = 3, 4, 5, 6$ در معادله بالمر، طول موج خط‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن در ناحیه مرئی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$n = 3 \rightarrow \lambda_1 = 656 / 20 \text{ nm} \quad (\text{خط قرمز})$$

$$n = 4 \rightarrow \lambda_2 = 486 / 08 \text{ nm} \quad (\text{خط آبی})$$

$$n = 5 \rightarrow \lambda_3 = 434 / 00 \text{ nm} \quad (\text{خط بنفش})$$

$$n = 6 \rightarrow \lambda_4 = 410 / 13 \text{ nm} \quad (\text{خط بنفش})$$



شکل ۵-۸ (الف) به کمک منشور، طول موج‌های گسیلی از گاز، از یکدیگر جدا و طیف خطی آن تشکیل شده است. (ب) اسباب آزمایش تشکیل و مشاهده طیف گسیلی گازها

بالمر با تأمل بیشتر روی رابطه ۵-۵، پیشنهاد کرد که ممکن است رشته‌های دیگری از خط‌هایی 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 معادله بالمر را به صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (\text{معادله ریدبرگ}) \quad (۵-۶)$$

که در آن R ثابت ریدبرگ و مقدار آن برابر $(\text{nm})^{-1} 10973731$ است و برای سادگی در محاسبات، مقدار آن را می‌توان $(\text{nm})^{-1} 11$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح مثبتی است که به ازای $n'=2$ رابطه ۵-۵ مربوط به رشته بالمر به دست می‌آید که در ناحیه مرئی طیف قرار دارد. چندین سال پس از درگذشت بالمر و با اصلاح ابزارها و روش‌های طیف‌سنجی، امکان کشف گستره طول‌موج‌های دیگری در طیف گسیلی گاز هیدروژن به وجود آمد و مشخص شد که به جز رشته بالمر رشته‌های دیگری در طیف گاز هیدروژن اتمی وجود دارد.^۱ در جدول ۵-۲ نام این رشته‌ها، که به ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۵-۲ رشته خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطه ریدبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیه طیف
لیمان	۱۹۱۴-۱۹۰۶	۱	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۲, ۳, ۴, ...	فرابنفش
بالمر	۱۸۸۵	۲	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۳, ۴, ۵, ...	فرابنفش و مرئی
پاشن	۱۹۰۸	۳	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۴, ۵, ۶, ...	فروسرخ
براکت	۱۹۲۲	۴	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۵, ۶, ۷, ...	فروسرخ
پفوند	۱۹۲۴	۵	$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	۶, ۷, ۸, ...	فروسرخ

۱- زمانی که مدل اتمی بور در سال ۱۹۱۳ میلادی مطرح شد، خط‌های گسیلی برای گاز هیدروژن اتمی فقط در رشته بالمر، رشته پاشن و تعدادی از خط‌های رشته لیمان به طور قطعی معلوم شده بودند. این مدل که با پیش‌بینی بالمر توافق خوبی داشت منجر به پژوهش‌هایی برای یافتن این رشته‌ها شد، به طوری که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و پفوند و همچنین خط‌های باقی‌مانده رشته لیمان به تدریج کشف شدند.

مثال ۴-۵

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشته براکت ($n'=4$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گستره طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند^۱.

پاسخ: در رشته براکت ($n'=4$) و برای اولین و دومین خط طیفی به ترتیب $n=5$ و $n=6$ است. در این صورت با استفاده از رابطه ۴-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2} \right) = R(2/25 \times 10^{-2}) \Rightarrow \lambda = 4050 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{6^2} \right) = R(3/472 \times 10^{-2}) \Rightarrow \lambda = 2624 \text{ nm}$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۳، مشاهده می‌کنیم که این خط‌های طیفی در ناحیه فروسرخ قرار دارند.

مثال ۵-۵

کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج در رشته پفوند ($n'=5$) هیدروژن اتمی را به دست آورید.

پاسخ: کوتاه‌ترین طول موج، با $n=\infty$ متناظر است. در این صورت با استفاده از رابطه ۴-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{\infty} \right) = \frac{R}{25} \Rightarrow \lambda = 2273 \text{ nm}$$

همچنین بلندترین طول موج این رشته، متناظر با $n=6$ است. در این صورت داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{6^2} \right) = \frac{11R}{900} \Rightarrow \lambda = 7438 \text{ nm}$$

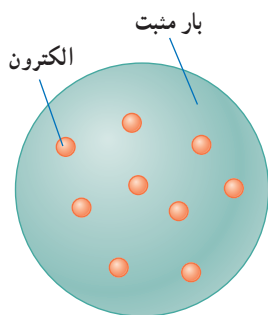
تمرین ۳-۵

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشته پاشن ($n'=3$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گستره طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند.

معادله ریدبرگ که برگرفته از داده‌های تجربی است، طول موج‌هایی را به دست می‌دهد که هیدروژن اتمی در طیف الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. ولی مدل‌های اتمی رایج آن زمان در خصوص اینکه چرا تنها طول موج‌های معینی توسط هیدروژن اتمی تابش می‌شود، پاسخی نداشتند. نیلز بور، فیزیک‌دان دانمارکی (۱۹۶۲-۱۸۸۵ م.) با اصلاح مدل اتمی رادرفورد، برای نخستین بار توانست توضیح مناسبی برای طول موج‌های گسسته تابش شده توسط گاز هیدروژن اتمی ارائه دهد. در واقع مدل بور، آغاز راهی برای درک این موضوع بود که چگونه ساختار اتم، طول موج‌های تابش شده را به مقدارهای معینی محدود می‌کند.

۱- مشابه این مثال و مثال‌های دیگر، باید مقدار n' مربوط به هر رشته هنگام ارزشیابی داده شود و لازم نیست دانش‌آموزان n' مربوط به رشته‌های مختلف را حفظ کنند.

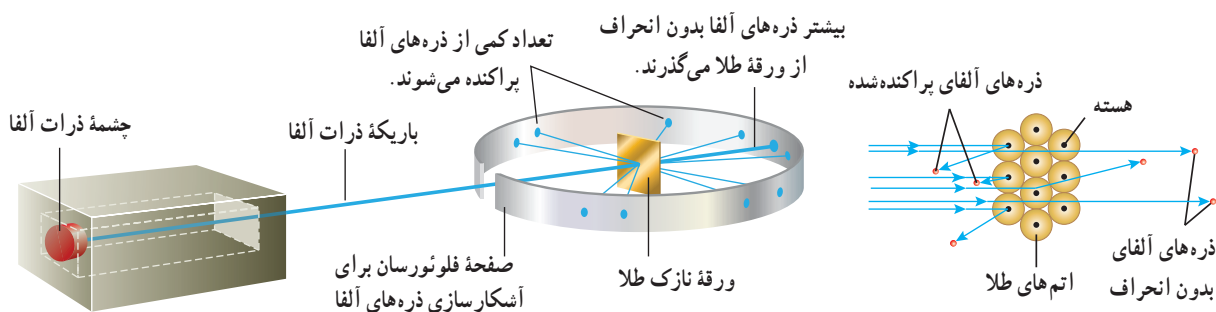
۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور



شکل ۳-۵ در مدل تامسون، بار الکتریکی مثبت به طور همگن در کره‌ای توزیع شده است و الکترون‌ها مانند کشمش‌های کیک در نقاط مختلف آن قرار دارند.

جوزف تامسون فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را ترغیب کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنا بر مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که بار مثبت به طور همگن در سرتاسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک 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 ناکامی‌های مدل تامسون این بود که بسامدهای تابش گسیل شده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود. وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌هایی را انتشار داد که مدل تامسون نمی‌توانست آنها را توضیح دهد، این مدل کنار گذاشته شد. رادرفورد و همکارانش باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت را (از جنس هسته اتم هلیوم که به آن ذره آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا فرو تابانند (شکل ۳-۵). رادرفورد بنابر مدل تامسون انتظار داشت که تمامی ذره‌های آلفا، با انحراف بسیار اندکی از ورقه طلا بگذرند. در عمل نیز بیشترین ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف اندکی از ورقه طلا می‌گذشتند و در برخورد با صفحه فلورسان، در پشت آن، جرقه‌های نورانی تولید می‌کردند. با وجود این، برخی از ذره‌های آلفا در هنگام خروج از ورقه نازک طلا، در زاویه‌های بزرگ منحرف و پراکنده می‌شدند و حتی تعدادی از آنها نیز به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد پس از انجام این آزمایش و بر اساس مدل تامسون و شناختی که از باریکه ذرات آلفا داشت، گفت: «مثل آن بود که گلوله توپی را به ورقه نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله توپ با سطح کاغذ، گلوله بازگردد.» این ذره‌ها باید با چیزی برخورد کرده باشد؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشد، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی 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 به طور آشکار مغایرت داشت.



شکل ۳-۵ آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقه نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله‌ها در یک اتاقک خلأ قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.

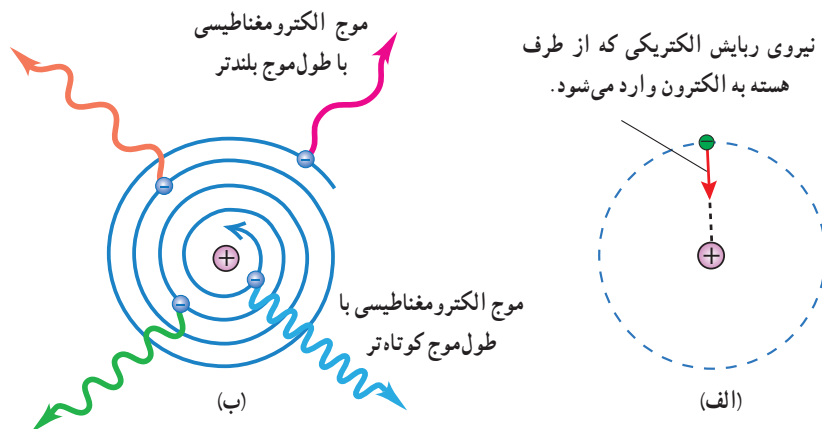


ارنست رادرفورد (۱۸۷۱-۱۹۴۷ م.)

در نیوزلند متولد شد و بیشتر تحصیلات خود را در همان جا به انجام رساند. در ۲۴ سالگی به کمبریج رفت و کار خود را در آزمایشگاه کاوندیش زیر نظر تامسون آغاز کرد. سپس به دانشگاهی در کانادا رفت و پس از بازگشت وارد دانشگاه منچستر شد. رادرفورد در آزمایش‌هایی که به کمک پرتوهای آلفا انجام داد ضمن کشف هسته در مرکز اتم، آرایش کلی الکترون‌ها را در اتم مشخص کرد ولی نتوانست جزئیات حرکت آنها را تبیین کند. رادرفورد همچنین با تبدیل عناصر بر اثر واپاشی پرتوزا، فیزیک هسته‌ای را بنیانگذاری و اولین واکنش هسته‌ای مصنوعی را ایجاد کرد. وی در سال ۱۹۰۸ موفق به دریافت جایزه نوبل شیمی شد. رادرفورد در سال ۱۹۱۱ در آزمایش‌هایی که در آنها نیتروژن با ذرات آلفا بمباران می‌شد با ذرات باردار مثبتی روبه‌رو شد و آن را به عنوان هسته هیدروژن شناسایی کرد. تا سال ۱۹۲۰، او به این نتیجه رسیده بود که این ذره، باید ذره‌ای بنیادی باشد و با توجه به این که واژه proton در زبان یونانی به معنای نخستین است، آن را پروتون نامید تا موقعیت اولیه درخور اهمیت آن را در میان هسته‌های اتمی عناصر نشان دهد.

بنا بر مدل رادرفورد، اتم دارای یک هسته بسیار چگال و کوچک ($m \cdot 10^{-15} \approx$ شعاع) و با 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، درست مساوی مجموع بار منفی الکترون‌هایی است که هسته را دربر گرفته‌اند. مدل اتمی رادرفورد که آن را **مدل اتم هسته‌ای** یا **مدل هسته‌ای اتم** می‌نامند، در مواردی با موفقیت همراه بود، ولی با چالش‌های تازه‌ای نیز مواجه شد. این چالش‌ها برای خود رادرفورد نیز مطرح شده بود، ولی به طور صریح می‌گفت که: «نباید از مدلی که بر اساس بعضی نتایج تجربی ساخته شده است انتظار داشته باشیم که به تمامی چالش‌ها پاسخ دهد».

اگر الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، مطابق شکل ۵-۱۱ الف، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم باید ناپایدار باشد؛ چیزی که با واقعیت جور 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 بسامد آن، با بسامد حرکت مداری الکترون برابر است. با تابش موج الکترومغناطیسی توسط الکترون، از انرژی آن کاسته می‌شود. این کاهش انرژی باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته به تدریج کوچک‌تر و بسامد حرکت آن به تدریج بیشتر شود. این افزایش تدریجی بسامد حرکت مداری الکترون‌ها، سبب می‌شود تا بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به تدریج زیاد شود. به این ترتیب باید طیف امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل بی‌درپی امواج الکترومغناطیسی روی هسته فرو افتد (شکل ۵-۱۱ ب). این نتیجه افزون بر اینکه با واقعیت ناسازگار است با طیف خطی گسیل شده توسط اتم‌ها نیز جور در نمی‌آید.

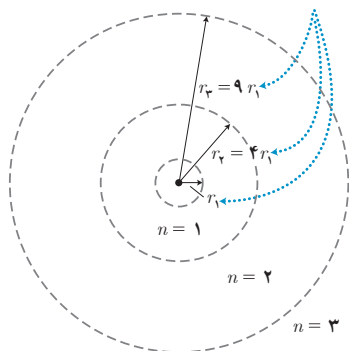


شکل ۵-۱۱ ناتوانی مدل اتم هسته‌ای رادرفورد در تبیین پایداری اتم. الف) اگر الکترون

نسبت به هسته ساکن فرض شود بر اثر نیروی ربایش الکتریکی، روی هسته سقوط می‌کند.

ب) اگر الکترون دور هسته بچرخد، طیفی پیوسته گسیل می‌کند و سرانجام روی هسته فرو می‌افتد.

شعاع مدارها با n^2 متناسب است.



شکل ۵-۱۲ اولین مدار بور در اتم هیدروژن دارای انرژی E_1 است. مدارهای دوم و سوم بور به ترتیب دارای انرژی‌های $E_2=E_1/4$ و $E_3=E_1/9$ هستند.

در سال ۱۹۱۳ میلادی، بور مدلی را برای اتم هیدروژن ارائه کرد. این مدل افزون بر آنکه مسئله ناپایداری اتم را در مدل رادفورد حل می‌کرد معادلهٔ ریدبرگ برای طیف خطی اتم هیدروژن را نیز نتیجه می‌داد. نظریهٔ بور با مدل اتم هسته‌ای رادفورد، شروع می‌شد. بور با این پیشنهاد که «در مقیاس اتمی، قوانین مکانیک کلاسیک و الکترومغناطیس باید توسط قوانین دیگری جایگزین یا تکمیل شود» گامی بزرگ و جسورانه برای رفع مشکلات مدل رادفورد برداشت. در ادامه با برخی از اصول و مفروضات مدل بور آشنا می‌شویم.

۱- مدارها و انرژی‌های الکترون‌ها در هر اتم کوانتیده‌اند؛ یعنی فقط مدارها و انرژی‌های گسسته معینی 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:

$$(5-7) \quad r_n = a_0 n^2 \quad (\text{شعاع مدارهای الکترون برای اتم هیدروژن})$$

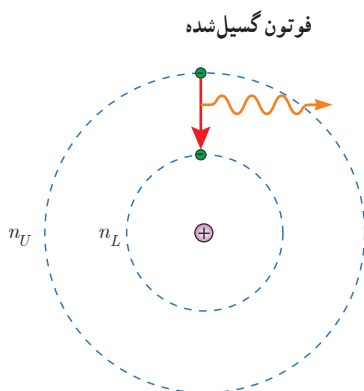
$$(5-8) \quad E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (\text{ترازهای انرژی الکترون در اتم هیدروژن})$$

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می‌شود ($n = 1, 2, 3, \dots$) که مدار الکترون را دور هسته مشخص می‌کند. همچنین شعاع کوچک‌ترین مدار در اتم هیدروژن (به ازای $n = 1$) و مقدار آن برابر $a_0 = r_1 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ است. این مقدار خاص، شعاع بور برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود. همچنین انرژی الکترون در $n = 1$ برابر $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ است که اندازهٔ آن را معمولاً یک ریدبرگ می‌نامند و با نماد E_R نشان می‌دهند ($E_R = 13.6 \text{ eV}$). شکل ۵-۱۲ سه مدار اول 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_U به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_L ، یک فوتون تابش می‌شود^۱ (شکل ۵-۱۳). در این صورت انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین دو مدار اولیه و مدار نهایی است، یعنی:

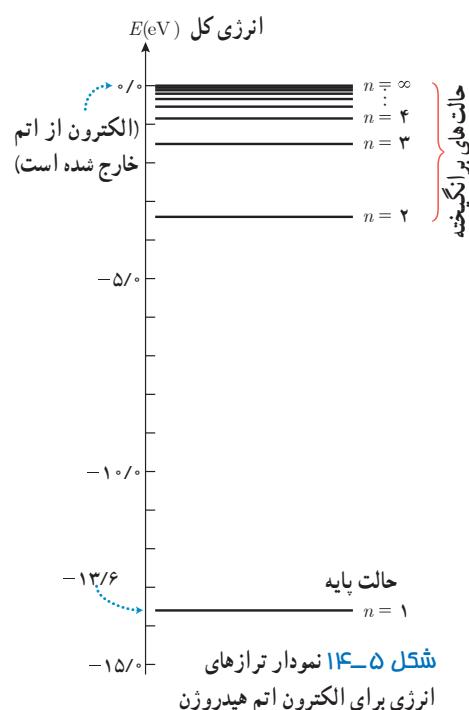
$$(5-9) \quad E_U - E_L = hf \quad (\text{معادله گسیل فوتون از اتم})$$



شکل ۵-۱۳ بنا به مدل بور، وقتی الکترونی از مداری با انرژی بیشتر به مداری با انرژی کمتر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود.

۱- زیر نویس U از سرحرف واژه Up به معنای بالا و زیر نویس L از سرحرف واژه Low به معنای پایین گرفته شده است.

نمودار ترازهای انرژی الکترون برای اتم هیدروژن در مدل بور: مفید است که مقدارهای انرژی داده شده در معادله ۵-۸ را مانند شکل ۵-۱۴ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهیم. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n = \infty$ در معادله ۵-۸ مربوط است و دارای انرژی 0 eV است. برعکس، پایین ترین تراز انرژی مربوط به $n = 1$ است و دارای مقدار -13.6 eV است. پایین ترین تراز انرژی، **حالت پایه** نامیده می شود تا از ترازهای بالاتر که **حالت های برانگیخته** نامیده می شوند متمایز باشد. توجه کنید که با افزایش n چگونه انرژی های حالت های برانگیخته به هم نزدیک و نزدیک تر می شوند.



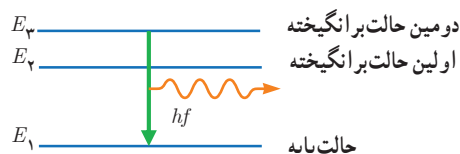
در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالا بردن الکترون از حالت پایه ($n = 1$) به بالاترین حالت برانگیخته ممکن ($n = \infty$) مقدار 13.6 eV انرژی باید صرف شود. صرف اندکی بیش از این مقدار انرژی، الکترون را از اتم خارج می کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می شود. این انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه و رساندن آن به حالت برانگیخته $n = \infty$ ($E_\infty = 0$)، **انرژی یونس الکترون** نامیده می شود. مقدار پیش بینی شده توسط مدل بور برای انرژی یونس 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 جهش می کند نمودار تراز انرژی آن را رسم کنید. پ) طول موج فوتون گسیل شده را حساب کنید.

پاسخ: الف) در دومین حالت برانگیخته، عدد کوانتومی $n = 3$ است. به این ترتیب از رابطه ۵-۸ داریم:

$$E_3 = \frac{-13.6\text{ eV}}{3^2} = -1.51\text{ eV}$$



ب) شکل مقابل نمودار ترازهای انرژی را برای الکترون اتم هیدروژن نشان می دهد که با گسیل فوتون، از دومین حالت برانگیخته به حالت پایه جهش کرده است.

پ) انرژی الکترون در حالت پایه $E_1 = -13.6\text{ eV}$ است. به این ترتیب انرژی فوتون گسیل شده برابر $E_3 - E_1$ است. از رابطه ۵-۹ داریم:

$$E_3 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_3 - E_1} = \frac{1240\text{ eV} \cdot \text{nm}}{-1.51\text{ eV} - (-13.6\text{ eV})} = 1.02\text{ nm}$$

تمرین ۵-۴

0 eV	_____
-1.51 eV	_____
-3.40 eV	_____
-13.6 eV	_____

شکل مقابل تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می دهد.

الف) کمترین طول موج فوتونی را پیدا کنید که با گذار بین این ترازها به دست می آید.

ب) اگر الکترون از تراز انرژی -1.51 eV به تراز پایه جهش کند طول موج فوتون گسیلی را پیدا کنید.

پ) کدام گذار بین دو تراز می تواند به گسیل فوتونی با طول موج 660 nm منجر شود؟ توجه کنید که این طول موج ها در گستره مرئی است.



نیلز بور (۱۸۸۵-۱۹۶۲ م.) در کپنهاگ دانمارک به دنیا آمد و در همان جا به تحصیلات خود ادامه داد. بور در سال ۱۹۱۱ دکترای فیزیک خود را از دانشگاه کپنهاگ دریافت کرد. وی در سال ۱۹۱۲ میلادی پس از مدتی کار با تامسون، از کمبریج به منچستر رفت و در آزمایشگاه رادرفورد که مرکزی پژوهشی دربارهٔ مواد پرتوزا و ساختار اتم بود مشغول به کار شد. در آنجا بود که مدل اتمی خود را در خصوص اتم هیدروژن تدوین و ارائه کرد. پس از آن در توسعهٔ نظریه مکانیک کوانتومی نقش عمده‌ای داشت. بور در سال ۱۹۲۲ جایزهٔ نوبل فیزیک را برای درک ساختار اتمی و نظریهٔ کوانتومی دریافت کرد. مؤسسهٔ فیزیک نظری که وی در سال ۱۹۲۱ میلادی در کپنهاگ بنیان نهاد نزدیک به یک سده است که دانشمندان را از سراسر جهان به سوی خود جذب می‌کند.

به دست آوردن معادلهٔ ریدبرگ از مدل بور : همان طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادلهٔ ریدبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های برانگیخته باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار مانای n_U به مدار مانای n_L می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط ۸-۵ و ۹-۵، بسامد فوتون گسیل شده برابر است با :

$$f = \frac{1}{h}(E_U - E_L) = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right)$$

با استفاده از رابطهٔ $f = c/\lambda$ طول موج فوتون گسیل شده را پیدا می‌کنیم.

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc} \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right)$$

از سوی دیگر داریم :

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{13.6 \text{ eV}}{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}} = 0.0109 (\text{nm})^{-1}$$

که این مقدار، با تقریب بسیار خوبی همان ثابت ریدبرگ R است که پیش از این با آن آشنا شدیم. به این ترتیب داریم :

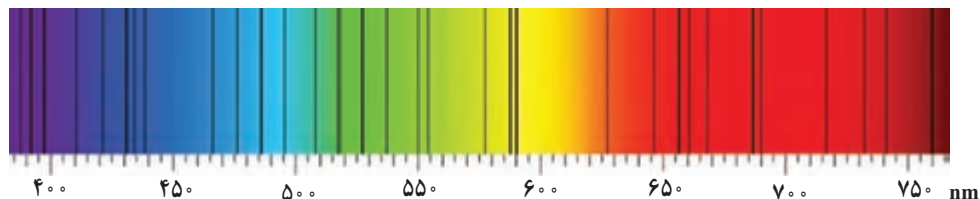
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right)$$

این رابطه همان معادلهٔ ۶-۵ است که با اصلاح و بازنویسی معادلهٔ بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریدبرگ به دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطهٔ تجربی ریدبرگ را به دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_U = 3$ به مدار $n_L = 2$ می‌رود، طول موج فوتون گسیل شده برابر است با :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right) = 0.0109 (\text{nm})^{-1} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \Rightarrow \lambda = 660 \text{ nm}$$

مقدار به دست آمده به نحو چشمگیری به طول موج خط قرمز در رشتهٔ بالمر که از تجربه حاصل شده، نزدیک است.

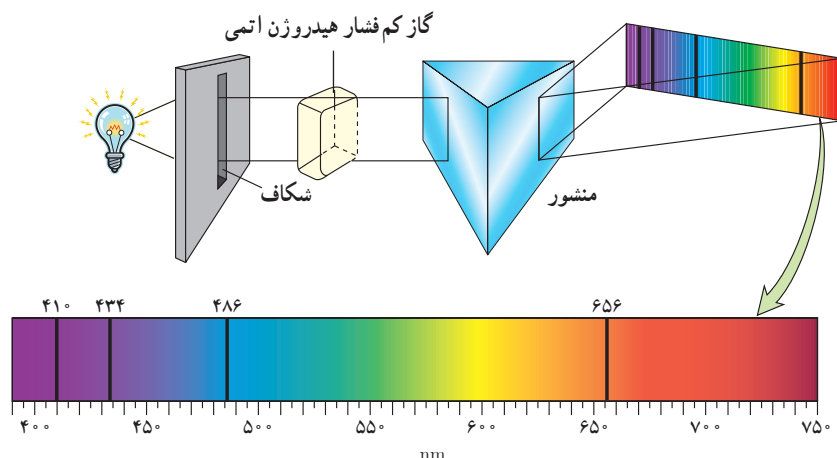
طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و مدل بور : در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانhofer، با مشاهدهٔ دقیق طیف خورشید، خط‌های تاریک نازکی را در آن کشف کرد^۱ (شکل ۵-۱۵). این تجربه نشان می‌داد در تابشی که از خورشید گسیل می‌شود و به زمین می‌رسد بعضی از طول موج‌ها وجود ندارند. امروزه می‌دانیم بسیاری از خط‌های تاریکی که فرانhofer در طیف خورشید کشف کرد، ناشی از جذب طول موج‌های مربوط به این خط‌ها توسط گازهای جو خورشید است. خط‌های دیگر به سبب جذب نور در گازهای جو زمین پدید می‌آیند.



شکل ۵-۱۵ خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، به افتخار کشف‌کنندهٔ آن، خط‌های فرانhofer نامیده می‌شوند.

۱- از ویلیام ولاستون به عنوان نخستین کاشف این خط‌های تاریک نام می‌برند، ولی جوزف فرانhofer بود که این خط‌ها را به تفصیل مورد مطالعه قرار داد.

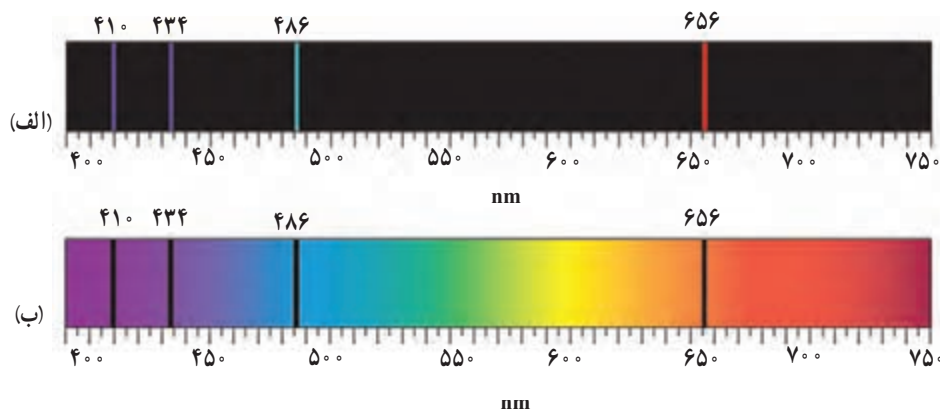
شکل ۱۶-۵ اسباب آزمایشی را به صورت طرح وار نشان می دهد که در آن باریکه نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم فشار هیدروژن می گذرد. با انجام این آزمایش پی می بریم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین کمان) با خط هایی تاریک درون آن مشاهده می شود که در آن بعضی از طول موج ها از نور سفید جذب شده اند.



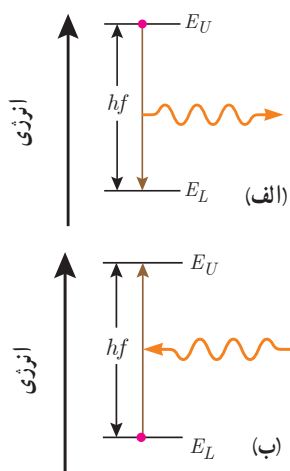
شکل ۱۶-۵ روشی برای مشاهده طیف های جذبی. یک چشمه نور سفید که گستره ای پیوسته از طول موج ها را تولید می کند، از ظرفی حاوی گاز کم فشار هیدروژن اتمی می گذرد و توسط منشور پاشیده می شود و طیف آن روی پرده تشکیل می شود. خط های تاریک روی طیف، به طول موج هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم های گاز جذب شده اند.

در اواسط قرن نوزدهم، آزمایش هایی مشابه آنچه بیان کردیم برای گاز های عناصر مختلف انجام شد. این آزمایش ها نشان می داد که اگر نور سفید از داخل گاز عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط های تاریکی ظاهر می شود. این خط ها (طول موج ها) توسط اتم های گاز عنصر جذب شده اند. شکل ۱۷-۵، طیف گسیلی و طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را در کنار یکدیگر نشان می دهد. مطالعه و مقایسه این دو طیف و همچنین طیف های گسیلی و جذبی عنصر های مختلف نشان می دهد که:

- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم های گاز هر عنصر، طول موج های معینی وجود دارد که از مشخصه های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- اتم های هر گاز دقیقاً همان طول موج هایی را از نور سفید جذب می کنند که اگر دمای آنها به اندازه کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می کنند.



شکل ۱۷-۵ طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. الف) خط های روشن در طیف گسیلی معرف طول موج های گسیل شده و ب) خط های تاریک در زمینه طیف، معرف طول موج های جذب شده توسط اتم های گاز هستند.



شکل ۵-۱۸ الف) فرایند گسیل فوتون
و ب) فرایند جذب فوتون توسط اتم

اینکه چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را که مشخصه آن عنصر است جذب یا گسیل می‌کند چالشی بود که برای چندین دهه فیزیک‌دانان را به خود مشغول کرده بود و تا پیش از ارائه مدل بور، نظریه قابل قبولی برای توضیح آن وجود نداشت. اکنون براساس مدل بور می‌دانیم که خط‌های گوناگون در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی وقتی به وجود می‌آیند که الکترون‌های اتم‌های هیدروژن، که به هر دلیلی برانگیخته شده‌اند، از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش کنند و فوتون‌هایی را گسیل کنند (شکل ۵-۱۸ الف). همچنین الکترون‌ها می‌توانند در جهت عکس گذار کنند، یعنی در فرایندی که **جذب فوتون** خوانده می‌شود از ترازهای انرژی پایین‌تر به ترازهای انرژی بالاتر بروند (شکل ۵-۱۸ ب). در این حالت، اتم، فوتونی را که دقیقاً انرژی لازم برای گذار را دارد جذب می‌کند. به این ترتیب اگر فوتون‌هایی با گستره پیوسته‌ای از طول موج‌ها مطابق آزمایش شکل ۵-۱۶ از گاز بگذرند و سپس طیف آنها تشکیل شود، یک دسته خط‌های جذبی تاریک در طیف پیوسته مشاهده خواهند شد. خط‌های تاریک، طول موج‌هایی را مشخص می‌کنند که با فرایند جذب فوتون برداشته شده‌اند.

پوشش ۵-۲

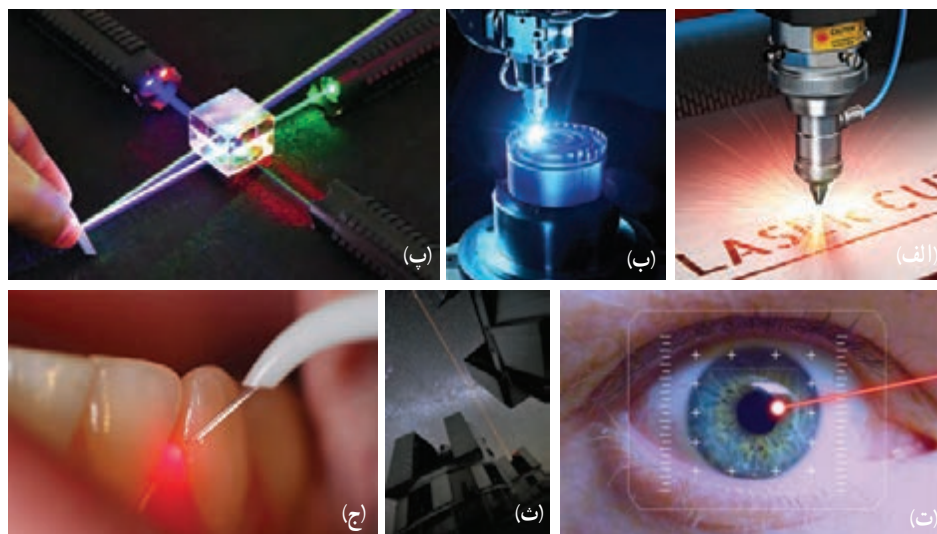
آیا معادله ۵-۹ برای فرایند جذب فوتون نیز برقرار است؟

موفقیت‌ها و نارسایی‌های مدل بور: مدل بور تصویری از چگونگی حرکت الکترون‌ها به دور هسته ارائه می‌کند. این مدل در تبیین پایداری اتم، طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی و محاسبه انرژی یونش اتم هیدروژن با موفقیت همراه است. افزون بر این، مدل بور را برای اتم‌های هیدروژن گونه نیز می‌توان به کار برد. **اتم هیدروژن گونه** به اتم‌هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند. برای مثال، اتم لیتیم که در حالت خنثی سه الکترون دارد اگر دو الکترون خود را از دست داده باشد، یک اتم هیدروژن گونه است. مدل بور می‌تواند انرژی یونش و همچنین طول موج‌های طیف خطی اتم‌های هیدروژن گونه مانند لیتیم دو بار یونیده (Li^{2+}) را پیش‌بینی کند که با تجربه سازگاری خوبی دارد.

مدل بور به‌رغم موفقیت‌هایی که اشاره شد، نارسایی‌هایی نیز دارد که تنها به دو مورد از آنها اشاره می‌کنیم. این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است. همچنین این مدل نمی‌تواند متفاوت بودن شدت خط‌های طیف گسیلی را توضیح دهد. برای مثال مدل بور نمی‌تواند توضیح دهد که چرا شدت خط قرمز با شدت خط آبی در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی با یکدیگر متفاوت است.

۵-۴ لیزر

لیزر یکی از مفیدترین اختراعات قرن بیستم است که کاربرد زیادی در زندگی، فناوری و صنعت دارد. لیزر امروزه در چاپگرها، در نگاشتن اطلاعات روی CD و DVDها و خواندن آنها، شبکه‌های کابل نوری، اندازه‌گیری دقیق طول، دستگاه‌های جوشکاری و برش فلزات، پژوهش‌های علمی، سرگرمی و ... به کار می‌رود. همچنین در حرفه پزشکی برای جراحی، برداشتن لکه‌های پوستی، اصلاح دید چشم و دندانپزشکی و ... از لیزر استفاده می‌شود (شکل ۵-۱۹).



شکل ۵-۱۹ برخی از کاربردهای لیزر: (الف) در برشکاری، (ب) در جوشکاری، (پ) در آزمایش‌های فیزیک و پژوهش‌های علمی، (ت) در چشم پزشکی، (ث) در نجوم، (ج) در دندانپزشکی

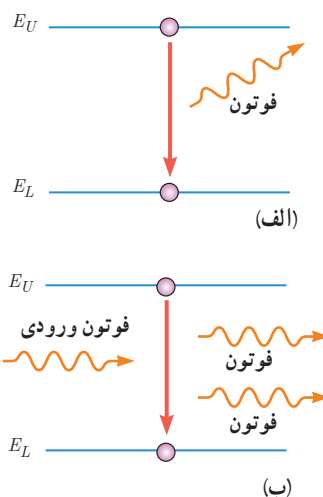
نخستین لیزر، موسوم به لیزر یاقوتی، را تئودور مایمن (۱۹۲۷-۲۰۰۷ م.) در سال ۱۹۶۰ میلادی ساخت. مدتی پس از آن و در همان سال، علی جوان و همکارانش موفق به ساخت نخستین لیزر گازی هلیوم نتون شدند.

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 ۵-۲۰ الف) فوتون در جهتی کاتوره‌ای گسیل می‌شود. در حالی که در گسیل القایی (شکل ۵-۲۰ ب) که برای نخستین بار در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط اینشتین مطرح شد، یک فوتون ورودی، الکترون برانگیخته را تحریک (یا القا) می‌کند تا تراز انرژی خود را تغییر دهد و به تراز پایین‌تر برود. برای گسیل القایی، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی‌های دو تراز یعنی $E_U - E_L$ یکسان باشد.

گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد. اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می‌شود (شکل ۵-۲۰ ب). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت می‌کند.^۳ دوم اینکه فوتون گسیل شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می‌کند. سوم اینکه فوتون گسیل شده



علی جوان (۱۹۲۶-۲۰۱۶ م.) از پدر و مادری تبریزی، در تهران به دنیا آمد. از دبیرستان البرز دیپلم گرفت و پس از آن به مدت یک سال در دانشکده علوم دانشگاه تهران به تحصیل پرداخت. در سال ۱۹۴۸ میلادی به نیویورک رفت و چندین دوره درسی را در دانشگاه کلمبیا گذراند. علی جوان بدون داشتن مدرک لیسانس یا فوق لیسانس، موفق شد در سال ۱۹۵۴ دکترای خود را زیر نظر چارلز تاوتز، فیزیک‌دان و مخترع بزرگ آمریکایی و برنده جایزه نوبل فیزیک ۱۹۶۴، دریافت کند. در سال ۱۹۵۵ دوره پسادکتر را در آزمایشگاه تاش^۱ و با تحقیق روی ساعت اتمی دنبال کرد. در سال ۱۹۵۸ به آزمایشگاه‌های تلفن بل^۲ پیوست و مدتی بعد در همان جا ایده اولیه لیزرهای گازی را ارائه کرد. وی پس از یک سال تلاش و با همکاری دو فیزیک‌دان دیگر به نام‌های ویلیام بنت و دونالد هرپوت، موفق به ساخت اولین نمونه لیزر گازی هلیوم نتون در سال ۱۹۶۰ شد.

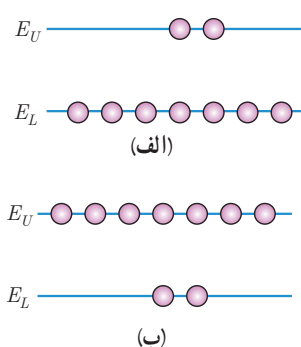


شکل ۵-۲۰ الف) گسیل خودبه‌خود
ب) گسیل القایی

^۱ Radiation Laboratory

^۲ Bell Telephone Laboratories

^۳ واژه laser برگرفته از سرواژه‌های عبارت (light amplification by the stimulated emission of radiation) به معنای تقویت نور توسط گسیل القایی تاش است.



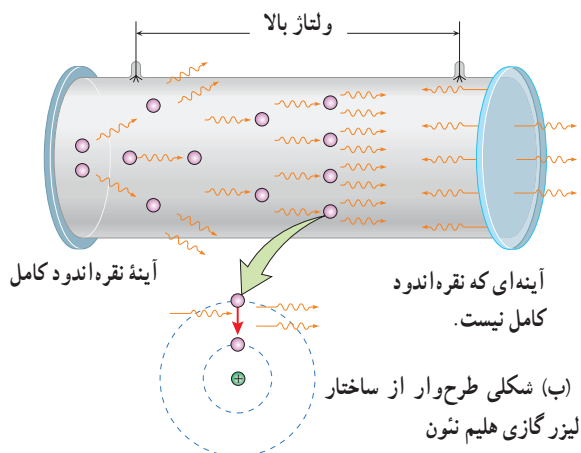
با فوتون ورودی همگام یا دارای همان فاز است. به این ترتیب فوتون‌هایی که باریکه لیزری را ایجاد می‌کنند هم بسامد، هم جهت و هم فاز هستند. در گسیل القایی یک چشمه انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر برانگیخته کند. این انرژی می‌تواند به روش‌های متعددی از جمله درخش‌های شدید نور معمولی و یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم شود. اگر انرژی کافی به اتم‌ها داده شود، الکترون‌های بیشتری به تراز انرژی بالاتر برانگیخته خواهند شد، شرطی که به **وارونی جمعیت** معروف است (شکل ۵-۲۱).

شکل ۵-۲۱ (الف) به طور معمول و در دمای اتاق، بیشتر الکترون‌ها در تراز انرژی پایین‌تر قرار دارند. (ب) در وضعیتی که وارونی جمعیت به وجود آید بیشتر الکترون‌ها در تراز بالاتری قرار دارند. (در مقایسه با تراز پایین‌تر) قرار دارند.

وارونی جمعیت الکترون‌ها در یک محیط لیزری، مربوط به وضعیتی است که تعداد الکترون‌ها در ترازهایی موسوم به **ترازهای شبه پایدار**^۱ نسبت به تراز پایین‌تر 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 گازی هلیم نئون (He — Ne)

شکل الف، یک لیزر هلیم نئون و شکل ب، طرحی ساده از سازوکار ایجاد باریکه لیزر را درون این لیزرها نشان می‌دهد. گاز کم فشاری شامل ۱۵٪ هلیم و ۸۵٪ نئون درون لوله شیشه‌ای قرار دارد. برای ایجاد وارونی جمعیت، از تخلیه الکتریکی با 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 بهمن 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 هلیم 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 هلیم نئون بسیار کم و در حدود ۰/۱٪ تا ۱٪ درصد است، ولی به دلیل کیفیت خوب باریکه لیزر ایجادشده، کاربرد زیادی در صنعت و فعالیت‌های علمی و آزمایشگاهی دارند.



(الف) تصویری از لیزر گازی هلیم نئون

^۱ — Metastable

۵-۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

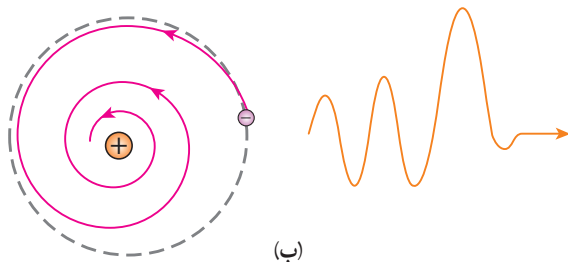
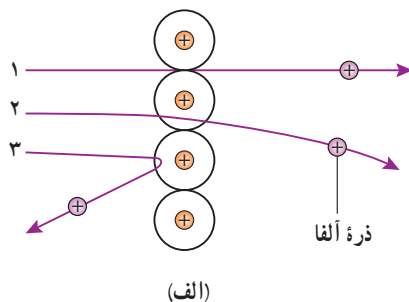
۱. یک لامپ حاوی گاز کم فشار سدیم، فوتون‌هایی با طول موج 589nm گسیل می‌کند.
 - الف) بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون ولت بیان کنید.
 - ب) فرض کنید توان تابشی مفید لامپ 50W است. در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟
 ۲. توان باریکه نور خروجی یک لیزر گازی هلیوم نئون 50mW است. اگر توان ورودی این لیزر 50W باشد، الف) بازده لیزر را حساب کنید.
 - ب) اگر طول موج باریکه نور خروجی 633nm باشد، شمار فوتون‌هایی را پیدا کنید که در هر ثانیه از این لیزر گسیل می‌شود.
 ۳. یک لامپ رشته‌ای با توان 100W از فاصله یک کیلومتری دیده می‌شود. فرض کنید نور لامپ به طور یکنواخت در فضای اطراف آن منتشر می‌شود و بازده لامپ 5% درصد است (یعنی 5W تابش مرئی گسیل می‌کند) و فقط 1% درصد این تابش دارای طول موجی در حدود 550nm است. در هر ثانیه چه تعداد فوتون با این طول موج وارد مردمک‌های چشم ناظری می‌شود که در این فاصله قرار دارد؟ (قطر مردمک را 2mm در نظر بگیرید).
 ۴. شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود 1360W/m^2 است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر 1m^2 ، مقدار انرژی 1360J می‌رسد. وقتی این تابش به سطح زمین می‌رسد مقداری زیادی از شدت آن، به علت جذب در جو و ابرها از دست می‌رود. اگر شدت تابشی متوسط خورشید در سطح زمین به ازای هر متر مربع حدود 300W/m^2 باشد، در هر ثانیه چند فوتون به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد؟ طول موج متوسط فوتون‌ها را 570nm 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؟
 - پ) معادله مربوط به اثر فوتوالکتریک به صورت $K_{\text{max}} = hf - W$ بیان می‌شود. سه بخش این معادله را به طور جداگانه توضیح دهید.

۶. توضیح دهید برای یک فلز معین، تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در 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
 - پ) کاهش شدت نور فرودی در بسامدهای بزرگ‌تر از بسامد آستانه
 ۷. حداقل انرژی لازم برای جدا کردن یک الکترون از سطح فلز سدیم برابر 2.28eV است.
 - الف) طول موج آستانه برای گسیل فوتوالکتریک از سطح فلز سدیم چقدر است و با مراجعه به شکل ۵-۶ معلوم کنید این طول موج مربوط به چه رنگی است؟
 - ب) آیا فوتون‌هایی با طول موج 680nm قادر به جدا کردن الکترون از سطح این فلز هستند؟
 ۸. تابش فرابنفشی با طول موج 200nm بر سطح تیغه‌ای از جنس نیکل با تابع کار 4.9eV تابیده می‌شود. بیشینه تندی فوتوالکتریک‌های جدا شده از سطح نیکل را حساب کنید.
 ۹. هر گاه بر سطح فلزی نوری با طول موج 420nm بتابد بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکتریک‌های گسیل شده حدود 5.0eV است. بسامد آستانه برای گسیل فوتوالکتریک‌ها از سطح این فلز چقدر است؟

۵-۲ و ۵-۳ طیف خطی و مدل اتم رادرفورد - بور

۱. الف) طیف گسیلی یک جسم در چه مواردی پیوسته و در چه مواردی گسسته یا خطی است؟ منشأ فیزیکی این تفاوت را توضیح دهید.
 - ب) توضیح دهید چگونه می‌توان طیف‌های گسیلی پیوسته و خطی را ایجاد کرد.
 ۲. شکل صفحه بعد سه رشته طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را روی نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد که بر اساس مدل اتمی بور رسم شده است.

(ب) تنها تعداد بسیار کمی از ذره‌ها مانند ذره ۳ منحرف می‌شوند. این امر چه نکته‌ای را درباره ساختار اتم طلا نشان می‌دهد؟
 (پ) 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؟



۱۴. با استفاده از رابطه بور برای انرژی الکترون در اتم هیدروژن، (الف) اختلاف انرژی $\Delta E(n_U \rightarrow n_L) = E_U - E_L$ را حساب کنید.

(ب) نشان دهید که:

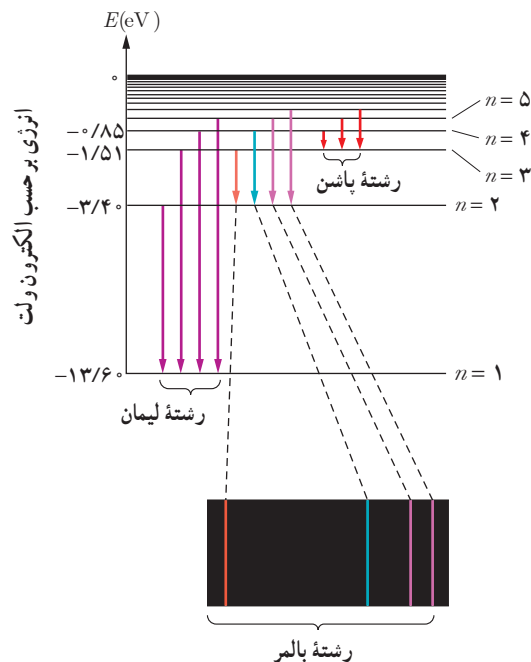
$$\Delta E(4 \rightarrow 2) = \Delta E(4 \rightarrow 3) + \Delta E(3 \rightarrow 2)$$

$$\Delta E(4 \rightarrow 1) = \Delta E(4 \rightarrow 2) + \Delta E(2 \rightarrow 1)$$

۱۵. الکترون اتم هیدروژنی در تراز $n = 5$ قرار دارد.

(الف) با در نظر گرفتن تمام گذارهای ممکن، اگر این اتم به حالت پایه برود، امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

(ب) فرض کنید فقط گذارهای $\Delta n = 1$ مجاز باشند، در این صورت امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟



(الف) منظور از $n = 1$ و انرژی -13.6 eV چیست؟
 (ب) بر اساس مدل اتمی بور دلیل خطی بودن طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را توضیح دهید.
 (پ) اختلاف کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج در هر رشته را، گستره طول موج‌های آن رشته می‌نامند. گستره طول موج‌های رشته لیمان ($n' = 1$) را پیدا کنید.

۱۶. (الف) فرایند جذب فوتون توسط اتم را توضیح دهید.
 (ب) با استفاده از مدل بور، چگونه می‌توانید خط‌های تاریک در طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را توجیه کنید؟
 (پ) وقتی که نور فرابنفش به بسیاری از مواد تابیده شود، تابش مرئی از خود گسیل می‌کنند. این پدیده فیزیکی نمونه‌ای از فلوتورسانی است. آزمایش نشان می‌دهد در پدیده فلوتورسانی طول موج‌های گسیل‌یافته معمولاً برابر همان طول موج نور فرودی یا بزرگ‌تر از آن است. این پدیده را چگونه به کمک مدل بور می‌توانید تبیین کنید؟

۱۷. مبنای مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که از پراکندگی ذره‌های آلفا توسط یک ورقه نازک طلا به دست آمده بود (شکل الف). (الف) توضیح دهید چرا بیشتر ذره‌های آلفا مانند ذره‌های ۱ و ۲ یا اصلاً منحرف نمی‌شوند یا به مقدار کمی منحرف می‌شوند.

۴-۵ لیزر

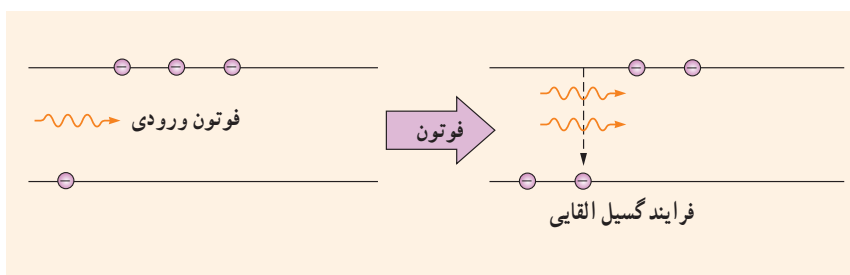
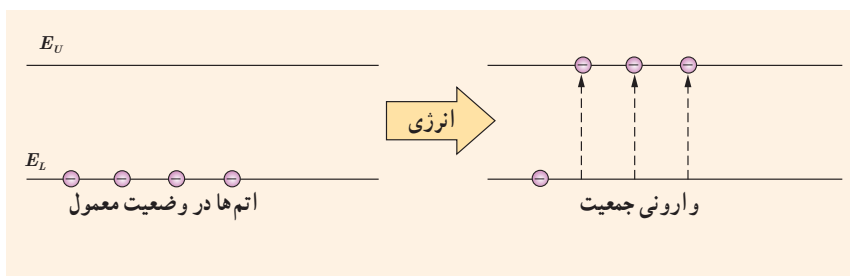
۱۷. شکل زیر فرایند ایجاد باریکه لیزر را به طور طرح وار در ۴ مرحله نشان می دهد.

الف) منظور از عبارت «اتم‌ها در وضعیت معمول» چیست؟

ب) نقش انرژی داده شده چیست و معمولاً این انرژی چگونه تأمین می شود؟

پ) منظور از «وارونی جمعیت» چیست؟
ت) انرژی فوتون ورودی چقدر باید باشد تا فرایند گسیل القایی انجام شود؟

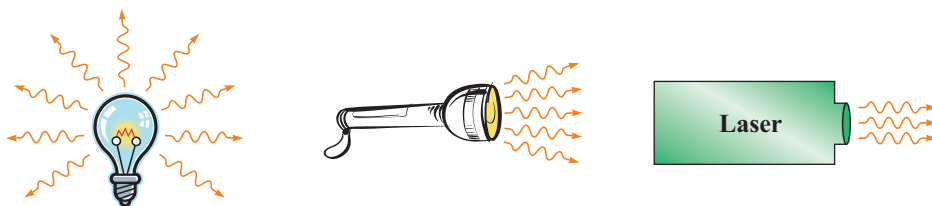
ث) فوتون‌هایی که بر اثر فرایند گسیل القایی و جهش الکترون‌ها به تراز پایین تر ایجاد می شوند چه ویژگی‌های مشترکی دارند؟



۱۷. در شکل زیر نحوه گسیل فوتون‌ها از سه چشمه نور شامل لامپ رشته‌ای، چراغ قوه با لامپ رشته‌ای و لیزر با یکدیگر مقایسه شده است.

الف) با توجه به آنچه در این فصل فراگرفتید تفاوت فوتون‌های

گسیل شده از هر چشمه را با یکدیگر بیان کنید.
ب) چرا توصیه جدی می شود که هیچ گاه به طور مستقیم به باریکه نور ایجاد شده توسط لیزر نگاه نکنید؟





آشنایی با فیزیک هسته‌ای

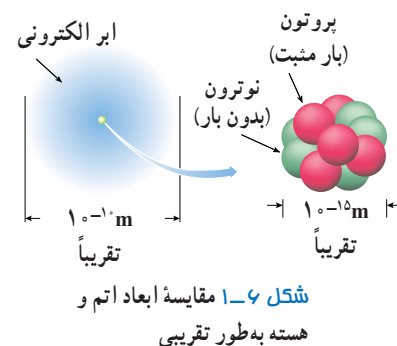


چاقوی گاما (جراحی مغز بدون چاقو) جایگزینی مناسب برای جراحی‌های سنتی و یا روش‌هایی است که در آن کل مغز در معرض تابش قرار می‌گیرد. از این روش در علم روانپزشکی نیز برای درمان وسواس، افسردگی اساسی و اختلالات شدید اضطرابی استفاده می‌شود. این کار چگونه انجام می‌شود؟

بخش‌ها

- ۱-۶ ساختار هسته
- ۲-۶ پرتو زایی طبیعی و نیمه عمر
- ۳-۶ شکافت هسته‌ای
- ۴-۶ گداخت (همجوشی) هسته‌ای

فیزیک هسته‌ای، شاخه‌ای از فیزیک است که در آن با ساختار، برهم‌کنش‌ها و واپاشی هسته‌های اتمی سروکار داریم. بخش عمده‌ای از پیشرفت فیزیک هسته‌ای، مدیون تحلیل نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌هایی است که طی قرن گذشته توسط دانشمندانی از حوزه‌های فیزیک و شیمی انجام شده است. آنچه بیش از همه منجر به گسترش فیزیک هسته‌ای شد، به تحولاتی مربوط است که با ساخت شتاب‌دهنده‌های ذرات در سال ۱۹۳۲ میلادی آغاز شد. در این فصل پس از آشنایی مقدماتی با ساختار هسته و پرتوهای طبیعی، با شکافت و هم‌جوشی هسته‌ای نیز آشنا می‌شوید.



۱-۶ ساختار هسته

کشف پرتوهای طبیعی در سال ۱۸۹۶ میلادی توسط فیزیک‌دان فرانسوی، هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هسته اتم بود. با کاوش درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که شعاع آن تقریباً $\frac{1}{100000}$ شعاع اتم است (شکل ۱-۶). هسته اتم از نوترون‌ها و پروتون‌ها تشکیل شده است که به‌طور کلی **نوکلئون** نامیده می‌شوند. نوترون، در سال ۱۹۳۲ میلادی توسط فیزیک‌دان انگلیسی، جیمز چادویک، کشف شد. نوترون بار الکتریکی ندارد، و جرمش اندکی بیشتر از پروتون است (جدول ۱-۶). جرم اتم‌ها و همچنین اجزای تشکیل‌دهنده اتم را، افزون بر یکای کیلوگرم با یکای جرم اتمی نیز بیان می‌کنند.

* در شبی ۱ دیدید $\frac{1}{12}$ جرم اتم کربن ۱۲ را یکای جرم اتمی (atomic mass unit) می‌نامند و آن را به اختصار با amu یا u نشان می‌دهند. بنا به این تعریف، جرم اتم کربن ۱۲، دقیقاً برابر ۱۲/۰۰۰۰۰۰ u است.

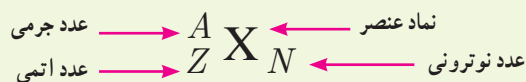
جدول ۱-۶ برخی از ویژگی‌های فیزیکی ذرات تشکیل‌دهنده اتم

ذره	بار الکتریکی (C)	جرم	
		یکای جرم اتمی (u)*	کیلوگرم (kg)
الکترون	$-1/6 \times 10^{-19}$	$5/4858 \times 10^{-4}$	$9/109389 \times 10^{-31}$
پروتون	$+1/6 \times 10^{-19}$	۱/۰۰۷۲۷۶	$1/672622 \times 10^{-27}$
نوترون	۰	۱/۰۰۸۶۶۴	$1/674929 \times 10^{-27}$

تعداد پروتون‌های هسته را عدد اتمی (Z) می‌نامند و در عنصرهای مختلف متفاوت است. در یک اتم خنثی، تعداد پروتون‌های هسته با تعداد الکترون‌های دور هسته برابر است. تعداد نوترون‌های هسته، عدد نوترونی (N) نامیده می‌شود. همچنین مجموع تعداد کل پروتون‌ها و نوترون‌ها را عدد جرمی (A) می‌نامند.

$$\underbrace{A}_{\text{تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها (عدد جرمی)}} = \underbrace{Z}_{\text{تعداد پروتون‌ها (عدد اتمی)}} + \underbrace{N}_{\text{تعداد نوترون‌ها (عدد نوترونی)}} \quad (۱-۶)$$

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X ، نماد هسته به صورت زیر نشان داده می‌شود^۱:



جیمز چادویک (۱۸۹۱-۱۹۷۴ م.)

فیزیک‌دان انگلیسی، پس از طی دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد در دانشگاه منچستر، تحقیقاتش را زیر نظر رادرفورد ادامه داد. در سال ۱۹۱۴ برای نخستین بار، طیف پیوسته پرتوهای بتا را که از بعضی عناصر پرتوزا تشکیل می‌شد کشف کرد. اما مهم‌ترین دستاورد چادویک، کشف نوترون در سال ۱۹۳۲ بود که حاصل مدت طولانی همکاری با رادرفورد بود. چادویک جایزه نوبل فیزیک ۱۹۳۵ میلادی را به این منظور دریافت کرد.

مشخص کردن N در نمادنویسی بالا ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از رابطه $A-Z$ به دست آورد. 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 ${}^{27}\text{Al}$ 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 مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته‌ها در جدول تناوبی عناصر هم‌مکان هستند و بنابراین ایزوتوپ (هم‌مکان) نامیده می‌شوند. به طور مثال، کربن به دو صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می‌شود که یکی از ۶ پروتون و ۶ نوترون (${}^{12}_6\text{C}$)، 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 ۶-۲).

جدول ۶-۲ ایزوتوپ‌های مختلف چند عنصر و درصد فراوانی آنها در طبیعت

نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت	نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت
هیدروژن ۱	H	۱	۰	۹۹/۹۸۸۵	کربن ۱۳	${}^{13}\text{C}$	۶	۷	۱/۰۷
دوتریم (هیدروژن ۲، ${}^2\text{H}$)	D	۱	۱	۰/۰۱۱۵	کربن ۱۴	${}^{14}\text{C}$	۶	۸	یافت نمی‌شود
تریتیم (هیدروژن ۳، ${}^3\text{H}$)	T	۱	۲	بسیار نادر	اورانیم ۲۳۵	${}^{235}\text{U}$	۹۲	۱۴۳	۰/۷۱۶
کربن ۱۲	${}^{12}\text{C}$	۶	۶	۹۸/۹۳	اورانیم ۲۳۸	${}^{238}\text{U}$	۹۲	۱۴۶	۹۹/۲۸۴

تمرین ۱-۶

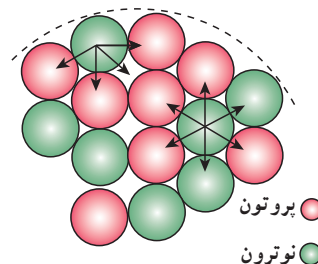
با توجه به آنچه تاکنون دیدید و همچنین با استفاده از جدول تناوبی عناصر، که در پیوست کتاب آمده است، نماد هسته را در هر یک از موارد زیر تعیین کنید.

الف) ایزوتوپ فلور (F) با عدد نوترونی ۱۰

ب) ایزوتوپ قلع (Sn) با عدد نوترونی ۶۶

۱- در کتاب‌های تخصصی فیزیک هسته‌ای، این نماد را نماد نوکلئید (nuclide) می‌نامند.

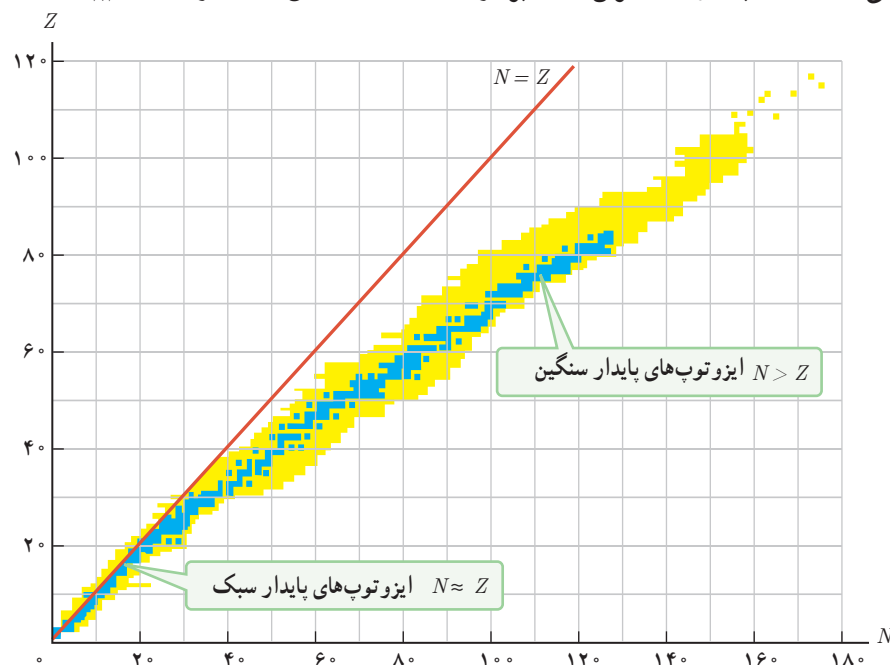
پایداری هسته: همان طور که در شکل ۶-۱ نشان داده شده است ابعاد هسته در مقایسه با ابعاد اتم بسیار کوچک تر است. با وجود این، بیشتر جرم اتم (بیش از ۹۹/۹ درصد آن) در هسته متمرکز شده است. محاسبه نشان می دهد مرتبه بزرگی چگالی هسته 10^{14} g/cm^3 است که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (برای مقایسه توجه کنید که چگالی آب 1 g/cm^3 است). موضوع وقتی شگفت انگیزتر می شود که به اندازه نیروی الکتروستاتیکی رانشی خیلی قوی بین پروتون های درون هسته، که بسیار به یکدیگر نزدیک اند، توجه کنیم. در این صورت چه چیزی مانع از هم پاشیدن هسته می شود؟ با توجه به پایداری بسیاری از هسته های که در طبیعت وجود دارند روشن است که نوعی نیروی جاذبه باید اجزای هسته را کنار هم نگه دارد. از طرفی، جاذبه حاصل از نیروی گرانشی بین نوکلئون ها، چنان ضعیف است که نمی تواند با نیروی الکتروستاتیکی رانشی مقابله کند. این موضوع وجود نیروی جدیدی بین نوکلئون ها را مطرح کرد که به آن **نیروی هسته ای** گفته می شود.



نیروی هسته ای، کوتاه برد است و تنها در فاصله ای کوچک تر از ابعاد هسته اثر می کند (شکل ۶-۲). افزون بر این، نیروی هسته ای مستقل از بار الکتریکی است، یعنی نیروی ربایشی هسته ای یکسانی بین دو پروتون، دو نوترون، یا یک پروتون و یک نوترون وجود دارد. به همین دلیل از منظر نیروی هسته ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد و دلیل نام گذاری آنها با نام عام نوکلئون نیز همین است.

شکل ۶-۲ قسمتی از هسته و نوکلئون های آن که به صورت طرح وار نشان داده شده است. هر نوکلئون، فقط به نزدیک ترین نوکلئون های مجاورش نیروی هسته ای وارد می کند.

برای پایداری هسته، باید نیروی دافعه الکتروستاتیکی بین پروتون ها با نیروی جاذبه بین نوکلئون ها، که ناشی از نیروی هسته ای است، موازنه شده باشد. ولی به دلیل بلند برد بودن نیروی الکتروستاتیکی، یک پروتون تمام پروتون های دیگر درون هسته را دفع می کند، در حالی که یک پروتون یا یک نوترون، فقط نزدیک ترین نوکلئون های مجاور خود را با نیروی هسته ای جذب می کند. به همین دلیل وقتی تعداد پروتون های درون هسته افزایش یابد، اگر هسته بخواهد پایدار باقی بماند، باید تعداد نوترون های درون هسته نیز افزایش یابد. شکل ۶-۳ نموداری از Z برحسب N را برای عنصرهای مختلف نشان می دهد. هسته پایدار با بیشترین تعداد پروتون ($Z = 83$)، متعلق به بیسموت (${}^{209}_{83}\text{Bi}$) است.



شکل ۶-۳ نمودار تغییرات Z برحسب N برای هسته های پایدار و پرتوزا. هر نقطه آبی رنگ نشان دهنده یک هسته پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته های پرتوزای شناخته شده را نشان می دهند.

در میان عناصر ناپایدار با عدد اتمی $Z > 83$ ، توریم ($Z = 90$) و اورانیم ($Z = 92$) تنها عنصرهایی‌اند که واپاشی آنها چنان کند است که از هنگام تشکیل منظومه شمسی در چندین میلیارد سال پیش، فقط مقدار کمی از آنها بر اثر واپاشی، به عنصرهای سبک‌تر تبدیل شده‌اند.

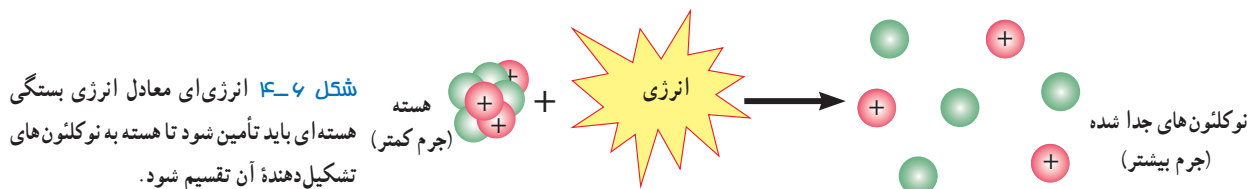
پرسش ۱-۶

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 پایدار مختلف ثابت است یا متفاوت؟ توضیح دهید.
ب) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از این نمودار تشخیص داد؟

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته: برای جدا کردن نوکلئون‌های یک هسته، انرژی لازم است. انرژی لازم برای این منظور، **انرژی بستگی هسته‌ای** نامیده می‌شود. شکل ۴-۶ این موضوع را به طور طرح‌وار نشان می‌دهد.
اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن **کاستی جرم هسته** گفته می‌شود، مطابق رابطه معروف اینشتین ($E = mc^2$)، در مربع تبدی نور (c^2) ضرب کنیم **انرژی بستگی هسته‌ای** به دست می‌آید. توجه کنید که هرچند اختلاف جرم هسته با مجموع جرم نوکلئون‌های تشکیل‌دهنده آن بسیار ناچیز است، چون در c^2 که عدد بسیار بزرگی است ضرب می‌شود، این کاستی جرم اندک، معادل انرژی قابل ملاحظه‌ای است^۱.



توجه: انرژی بستگی هسته‌ای، انرژی‌ای نیست که در هسته وجود داشته باشد، بلکه این انرژی معادل با اختلاف انرژی جرمی میان هسته و نوکلئون‌های مجزای آن است. اگر در عمل می‌توانستیم یک هسته را به نوکلئون‌های آن جدا کنیم، در این فرایند جداسازی، باید این انرژی به نوکلئون‌های سازنده هسته انتقال می‌یافت.



انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کوانتیده‌اند و نوکلئون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین، همان‌طور که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از تراز پایه به تراز برانگیخته بروند، نوکلئون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و در نتیجه هسته برانگیخته شود. هسته برانگیخته با گسیل فوتون به تراز پایه برمی‌گردد. انرژی فوتون گسیل شده، با اختلاف انرژی بین تراز برانگیخته و تراز پایه برابر است. هسته برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد A_ZX به صورت ${}^A_ZX^*$ مشخص می‌کنند. نکته قابل توجه آن است که اختلاف بین ترازهای انرژی نوکلئون‌ها در هسته از مرتبه keV تا مرتبه MeV است، در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبه eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۱- محاسبه انرژی بستگی هسته خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

۲-۶ پرتوزایی طبیعی و نیمه عمر

همان طور که در مقدمه فصل نیز اشاره کردیم کشف پرتوزایی طبیعی توسط هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هسته اتم بود. وقتی یک هسته ناپایدار یا پرتوزا به طور طبیعی (یا اصطلاحاً خودبه خود) واپاشی می کند، نوع معینی از ذرات یا فوتون های پراثری آزاد می شوند. این فرایند واپاشی، **پرتوزایی طبیعی** نامیده می شود.

در پرتوزایی طبیعی سه نوع پرتو ایجاد می شود: پرتوهای آلفا (α)، پرتوهای بتا (β) و پرتوهای گاما (γ). پرتوهای α کمترین نفوذ را دارند و با ورقه نازک سربی با ضخامت ناچیز ($\approx 1\text{mm}/^\circ$) متوقف می شوند، در حالی که پرتوهای β مسافت خیلی بیشتری را ($\approx 1\text{mm}/^\circ$) در سرب نفوذ می کنند. پرتوهای γ بیشترین نفوذ را دارند و می توانند از ورقه ای سربی به ضخامت قابل ملاحظه ای ($\approx 100\text{mm}$) بگذرند. در تمام فرایندهای واپاشی پرتوزا مشاهده شده است که تعداد نوکلئون ها در طی فرایند واپاشی هسته ای پایسته است؛ یعنی تعداد نوکلئون ها، پیش از فرایند با تعداد نوکلئون ها پس از فرایند مساوی است.



عکسی تاریخی از خانواده ای که همه آنها نوبل گرفتند.

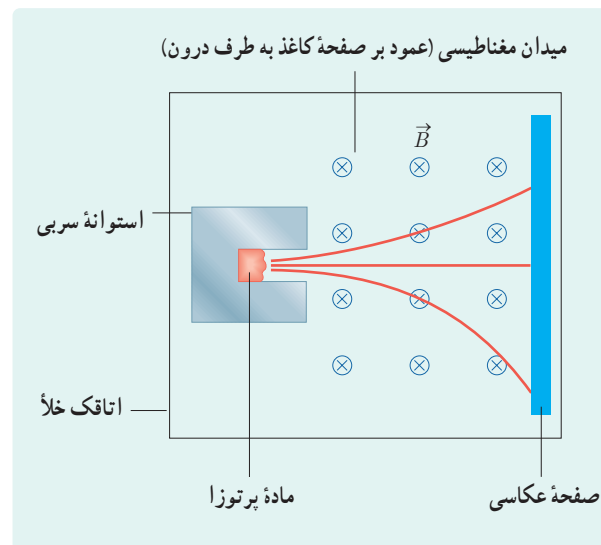
ماری کوری (۱۸۶۷-۱۹۳۴ م.)

پیر کوری (۱۸۵۴-۱۹۰۶ م.)

ایرن کوری (۱۸۹۷-۱۹۵۶ م.)

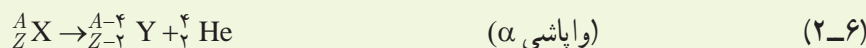
ماری کوری فیزیک دان و شیمی دان لهستانی-فرانسوی است که مطالعات پیشگام وی در زمینه پرتوزایی طبیعی رادیم و سایر عناصرها، دو جایزه نوبل برای وی به همراه داشت: جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۳ به خاطر کشف پرتوزایی طبیعی (به طور مشترک با شوهرش پیر کوری و هانری بکرل) و جایزه نوبل شیمی در سال ۱۹۱۱ به خاطر جدا کردن رادیم خالص. وی پژوهشگر رادیم را در دانشگاه پاریس تأسیس کرد و در آنجا به پژوهش در زمینه کاربردهای پزشکی مواد پرتوزا پرداخت. دخترش ایرن، جایزه نوبل شیمی سال ۱۹۳۵ را به خاطر کشف پرتوزایی مصنوعی، یک سال پس از درگذشت مادرش دریافت کرد.

پرسش ۲-۶

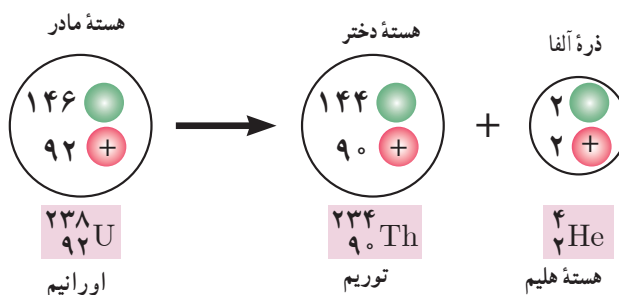


شکل روبه رو طرح آزمایش ساده ای را نشان می دهد که به کمک آن می توان سه نوع پرتوزایی طبیعی را مشاهده کرد و به تفاوت بار و جرم پرتوها از یکدیگر پی برد. قطعه ای از ماده پرتوزا را در ته حفره باریکی در یک استوانه سربی قرار می دهند. استوانه را درون اتاقکی می گذارند و هوای درون آن را تخلیه می کنند. سپس یک صفحه عکاسی مقابل حفره قرار می دهند و میدان مغناطیسی یکنواختی درون اتاقک برقرار می کنند. خطوط قرمز رنگ، مسیر حرکت پرتوها را نشان می دهد. نوع بار پرتوها را با هم مقایسه کنید.

واپاشی α : در این نوع واپاشی که در هسته های سنگین صورت می گیرد، هسته ${}^A_Z X$ با گسیل ذره آلفا و امی پاشد. شواهد تجربی نشان می دهند که پرتوهای α ، ذرات باردار مثبت از جنس هسته اتم هلیم (${}^4_2\text{He}$) هستند و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده اند. واپاشی α با رابطه زیر بیان می شود:



در این رابطه X هسته مادر و Y هسته دختر نامیده می‌شود. شکل ۶-۵، مثالی از واپاشی آلفا، برای اورانیوم ۲۳۸ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.

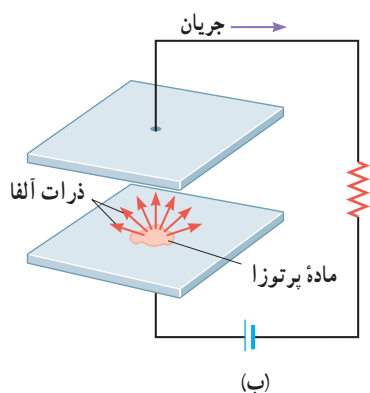


شکل ۶-۵ در واپاشی α یک هسته مادر ناپایدار، ذره α گسیل می‌کند و هسته متفاوتی (هسته دختر) به وجود می‌آید.

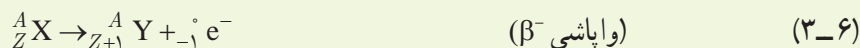
ذره‌های آلفا، سنگین‌اند و بار مثبت دارند. بُرد این ذره‌ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۱ تا ۲ سانتی‌متر) و یا با عبور از لایه‌ای نازک از مواد جذب می‌شوند. اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند. بنابراین، باید مراقب بود که مواد آلفاها هرگز وارد بدن نشوند.

فناوری و کاربرد: واپاشی آلفا و آشکارسازهای دود

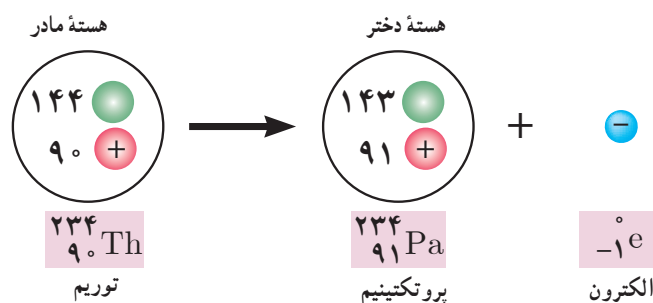
یکی از کاربردهای گسترده واپاشی α در آشکارسازهای دود است (شکل الف). شکل ب، مدار و بخش اصلی یک آشکارساز دود را نشان می‌دهد. دو صفحه کوچک و موازی فلزی در فاصله حدود یک سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. مقدار اندکی ماده پرتوزا را که ذرات α گسیل می‌کند در وسط یکی از صفحه‌ها می‌گذارند. ذرات α با مولکول‌های هوای بین دو صفحه برخورد می‌کنند، مولکول‌های هوا یونیده می‌شوند و یون‌های مثبت و منفی به وجود می‌آیند. ولتاژ باتری 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 جریانی به وجود می‌آید. وجود ذرات دود میان صفحه‌ها جریان را کاهش می‌دهد؛ زیرا یون‌هایی که به ذرات دود برخورد می‌کنند معمولاً خنثی می‌شوند. اُفت جریان که ذرات دود باعث آن می‌شود هشداردهنده‌ای را به کار می‌اندازد.



واپاشی β^- : واپاشی بتا، نخستین مورد پرتوزایی بود که در سال‌های پایانی قرن نوزدهم، توسط هانری بکرل مشاهده شد. این واپاشی، متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست و ذرات گسیل‌شده در این واپاشی را ذرات بتا می‌نامند. بررسی‌های بعدی نشان داد که این ذرات الکترون‌اند و به همین دلیل، این واپاشی را واپاشی β^- نامیدند. الکترون گسیل‌شده در این واپاشی، در هسته مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون‌های مداری اتم نیست؛ این الکترون وقتی به وجود می‌آید که نوترونی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود. فرایند واپاشی β^- را با رابطه زیر بیان می‌کنند:



شکل ۶-۶ مثالی از واپاشی β^- ، برای توریم ${}^{234}_{90}\text{Th}$ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۶-۶ واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هسته مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذره β^- گسیل می‌شود.

تمرین ۶-۲

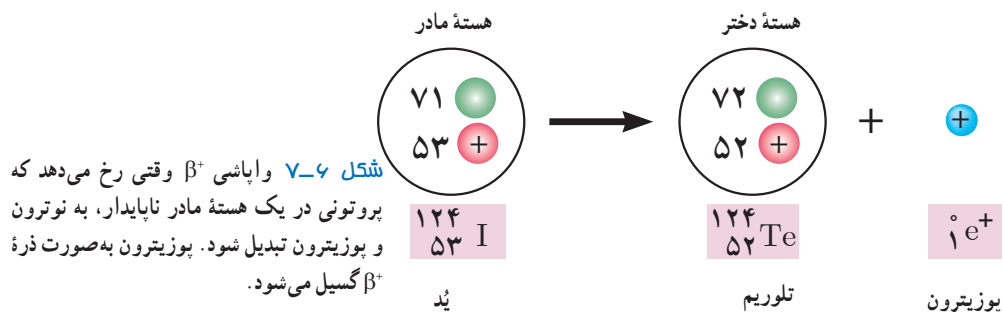
لوتیم (${}^{176}_{71}\text{Lu}$) عنصر پرتوزایی است که با گسیل بتای منفی، واپاشی می‌کند. معادله این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عناصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذره گسیل‌شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار e^- حامل بار e^+ است. به این الکترون مثبت، پوزیترون می‌گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می‌شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می‌دهد این است که یکی از پروتون‌های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می‌شود. فرایند واپاشی β^+ با رابطه زیر بیان می‌شود^۱.



^۱ - در واپاشی β^+ ، ذره‌ای دیگر به نام نوترینو را نیز باید در نظر بگیریم (${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e^+ + \nu$). همچنین در واپاشی β^- ، ذره‌ای دیگر به نام آنتی‌نوترینو را نیز باید در نظر بگیریم (${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e^- + \bar{\nu}$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

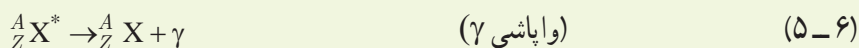
شکل ۷-۶ مثالی از واپاشی β^+ ، برای $^{124}_{53}\text{I}$ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



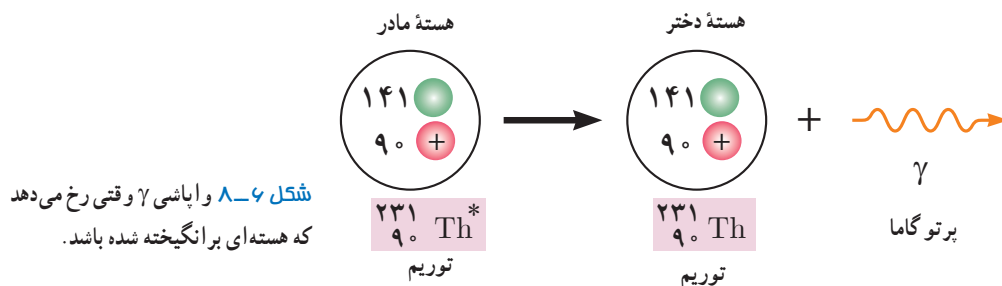
تمرین ۳-۶

ایزوتوپ ($^{15}_8\text{O}$) با گسیل پوزیترون، واپاشی می‌کند. معادله این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عناصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

واپاشی γ : اغلب هسته‌ها پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته قرار می‌گیرند و با گسیل فوتون‌های پر انرژی (پرتو گاما) به حالت پایه می‌رسند. در این فرایند، Z و A تغییر نمی‌کنند؛ بلکه هسته برانگیخته که با علامت * مشخص شده است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد. واپاشی γ با رابطه زیر بیان می‌شود.



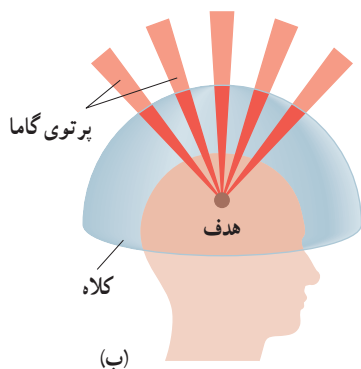
شکل ۸-۶ مثالی از واپاشی γ ، برای توریم $^{231}_{90}\text{Th}^*$ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



جراحی با پرتوهای گاما

جراحی با پرتوهای گاما، روش پزشکی نویدبخشی است که در سال‌های اخیر برای درمان مشکلات خاصی در مغز، از جمله تخریب غده‌های خوش خیم و سرطانی و نیز رفع نقص‌ها در رگ‌های خونی استفاده می‌شود. در این روش که از هیچ چاقویی استفاده نمی‌شود، از باریک‌های بسیار متمرکز و توانمندی از پرتوهای گاما که متوجه غده و نقص در رگ‌ها می‌شود بهره می‌گیرند. پرتوهای γ توسط چشمه کبالت ^{60}Co گسیل می‌شوند. همان‌طور که شکل الف نشان می‌دهد، بیمار یک کلاه ایمنی فلزی بر سر می‌گذارد که سوراخ‌های بسیار کوچکی روی آن ایجاد شده است. پرتوهای عبوری از این سوراخ‌ها، روی هدف مورد نظر درون مغز متمرکز می‌شوند. از این‌رو بافت هدف، مقدار بسیار زیادی تابش را دریافت می‌کند و تخریب می‌شود، در حالی که بافت سالم مجاور آسیبی نمی‌بیند. جراحی با پرتوهای گاما، روشی بدون درد و

خونریزی است که اغلب با بی‌حسی موضعی صورت می‌گیرد. مدت زمان بستری شدن در بیمارستان، خیلی کوتاه‌تر از جراحی به روش معمول است و بیمار پس از چند روز، به روال زندگی عادی خود باز می‌گردد.



(ب)

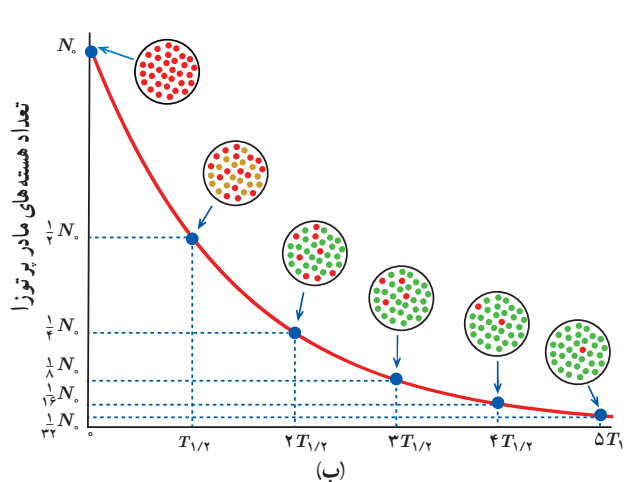


(الف)

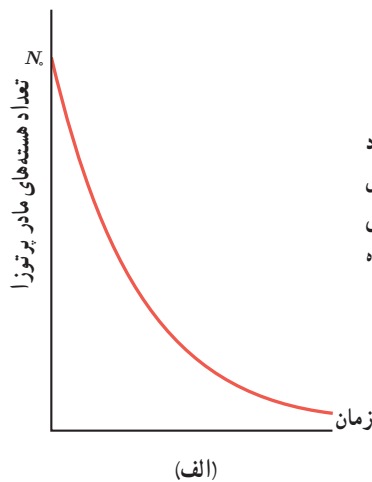
(الف) در جراحی با پرتو گاما، کلاه ایمنی فلزی‌ای که سوراخ‌های کوچکی دارد روی سر بیمار قرار داده می‌شود. (ب) پرتوهای گاما پس از عبور از این سوراخ‌ها، روی هدف تعیین‌شده در مغز، متمرکز می‌شوند.

نیمه‌عمر: ایزوتوپ‌های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند. برای یک نمونه از یک ماده پرتوزا، بر اساس داده‌های تجربی می‌توان بیان کرد که در پایان زمان معینی، چه کسری از ماده پرتوزا و امی باشد. برای مثال در مورد هسته‌های توریم ^{232}Th پس از زمان معینی می‌توان گفت که چه کسری از آنها به رادیم ^{228}Ra تبدیل شده است.

برای بررسی بیشتر این موضوع، یک نمونه پرتوزا را در نظر بگیرید. فرض کنید در لحظه $t=0$ تعداد هسته‌های مادر پرتوزای موجود در این نمونه، برابر N_0 باشد. اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه را بر حسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۶-۹ الف به دست می‌آید. همان‌طور که روی نمودار نیز دیده می‌شود، پس از گذشت زمان کافی، تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه، به صفر میل می‌کند. برای درک بهتر این نمودار، کمیتی به نام نیمه‌عمر را معرفی می‌کنیم و آن را با نماد $T_{1/2}$ نشان می‌دهیم. بنا به تعریف، نیمه‌عمر، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های مادر موجود در یک نمونه، به نصف برسند (شکل ۶-۹ ب). برخی از ایزوتوپ‌ها مانند اورانیم ^{238}U ، دارای نیمه‌عمری در حدود سن زمین (4.5 میلیارد سال) هستند. این عناصر منشأ پرتوزایی طبیعی در محیط پیرامون ما هستند.



(ب)



(الف)

شکل ۶-۹ الف) با گذشت زمان، تعداد هسته‌های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می‌یابد. ب) با گذشت هر نیمه‌عمر، نیمی از هسته‌های مادر پرتوزای باقی‌مانده (دایره‌های قرمز) واپاشی می‌کنند.

مثال ۶-۱

در حادثه انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، $^{131}_{53}\text{I}$ ، یکی از ایزوتوپ‌هایی بود که وارد محیط‌زیست شد. این ایزوتوپ، فزار است و همراه با جریان‌های جوی، تا کشورهای دوردست از محل نیروگاه حرکت کرد و با نشستن روی برگ گیاهان، سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه‌عمر این ایزوتوپ پرتوزا تقریباً ۸ روز است. پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه چرنوبیل، چه کسری از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی مانده بود؟

پاسخ: نیمه‌عمر ایزوتوپ $^{131}_{53}\text{I}$ برابر ۸ روز است و ۴۰ روز را معادل ۵ نیمه‌عمر $^{131}_{53}\text{I}$ در نظر می‌گیریم. اگر N_0 تعداد هسته‌های مادر اولیه باشد، پس از گذشت ۴۰ روز جدول زیر را می‌توان تنظیم کرد.

تعداد نیمه‌عمرهای سپری شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های مادر باقی مانده	N_0	$\frac{1}{2} \times N_0 = \frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{16} = \frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه چرنوبیل، تنها $\frac{1}{32}$ از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی ماندند.

اگر تعداد هسته‌های مادر اولیه در یک نمونه پرتوزا N_0 باشد، پس از گذشت زمان t ، تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (\text{تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده}) \quad (6-6)$$

که در آن n از رابطه $\frac{t}{T_{1/2}}$ به دست می‌آید^۱.

تمرین ۴-۶

پس از گذشت ۹ روز، تعداد هسته‌های پرتوزای یک نمونه، به $\frac{1}{8}$ تعداد موجود در آغاز کاهش یافته است. نیمه‌عمر (برحسب روز) ماده چقدر است؟

گاز رادون پرتوزا در خانه‌ها



رادون ($^{222}_{86}\text{Rn}$)، گازی پرتوزاست که به طور طبیعی به وجود می‌آید و محصول واپاشی رادیم ($^{226}_{88}\text{Ra}$) است. رادون درون خاک به شکل گاز است و می‌تواند از محل‌هایی مانند شکاف‌های روی دیوارها و کف ساختمان، حفره‌های دور لوله‌ها، منبع آب یا لوله‌های آب وارد خانه‌ها شود (نقاط سبز رنگ روی

شکل). اینکه میزان جمع شدن رادون درون خانه بتواند به طور چشمگیری بالا رود، به نوع احداث ساختمان و غلظت رادون در خاک اطراف ساختمان بستگی دارد. گاز رادون با نیمه‌عمر ۳/۸۳ روز، به هسته‌های دختری که آنها نیز پرتوزا هستند واپاشی می‌کند. این هسته‌های پرتوزا، می‌توانند به ذرات غبار و دود بچسبند و با تنفس وارد ریه‌ها شوند و پس از واپاشی، به بافت‌های بدن آسیب بزنند. اگر شخصی برای مدتی طولانی در معرض گاز رادون باشد، ممکن است به سرطان ریه مبتلا شود. از آنجا که میزان تجمع گاز رادون را می‌توان با دستگاه‌هایی اندازه‌گیری کرد توصیه می‌شود که خانه‌ها برای سنجش رادون مورد آزمایش قرار گیرند.

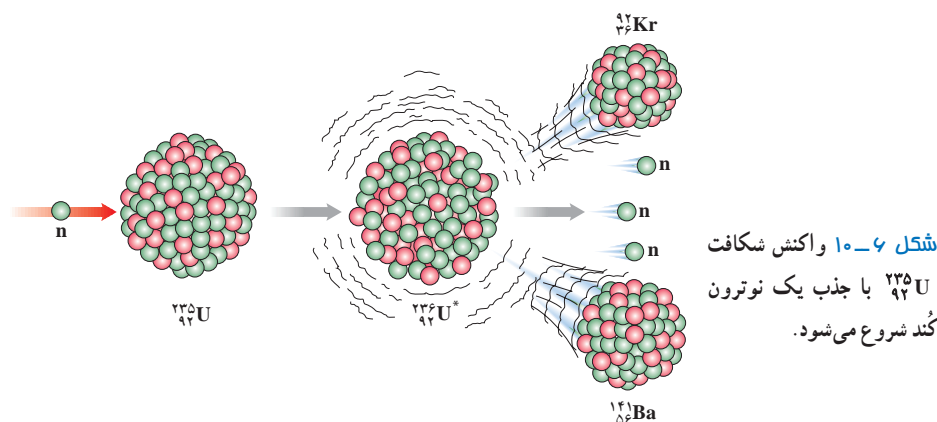
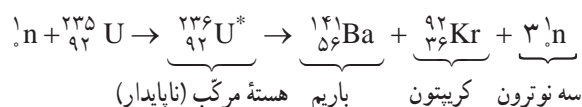
۱- در این کتاب صرفاً حل مسئله‌هایی مورد نظر است که در آنها n عددی صحیح باشد و سایر حالت‌های دیگر نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

۳-۶ شکافت هسته‌ای



اتوهان (۱۸۷۹-۱۹۶۸ م.)، فیزیک‌دان آلمانی به خاطر فعالیت‌هایش در زمینه شکافت هسته‌ای، جایزه نوبل شیمی را در سال ۱۹۴۴ دریافت کرد. وی پس از جنگ جهانی دوم تا سال ۱۹۶۰ ریاست مؤسسه تازه تأسیس ماکس پلانک را به عهده داشت که یکی از معتبرترین مراکز پژوهشی در پیشبرد علوم است.

در سال ۱۹۳۹ میلادی گروهی از دانشمندان آلمانی، کشف کردند که هسته اورانیم ($^{235}_{92}\text{U}$) پس از جذب نوترون، به دو تکه تقسیم می‌شود و هر تکه، جرم کمتری از هسته اولیه دارد. فرایند تقسیم شدن یک هسته سنگین به دو هسته با جرم کمتر، **شکافت هسته‌ای** نامیده می‌شود. در فرایند شکافت اورانیم، ترکیب‌های متفاوتی از هسته‌های کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون (بین ۲ تا ۵) به وجود می‌آید. شکل ۶-۱، یکی از این واکنش‌های ممکن شکافت را نشان می‌دهد که در آن هسته اورانیم $^{235}_{92}\text{U}$ پس از جذب نوترون و تبدیل به ایزوتوپ ناپایدار $^{236}_{92}\text{U}^*$ ، به هسته‌های باریوم $^{141}_{54}\text{Ba}$ و کریپتون $^{92}_{36}\text{Kr}$ تقسیم شده است. واکنش وقتی شروع می‌شود که نوترونی گُند (با انرژی جنبشی در حدود 4eV) توسط هسته $^{235}_{92}\text{U}$ جذب و هسته مرکب $^{236}_{92}\text{U}^*$ ایجاد شود. این هسته مرکب در کمتر از 10^{-12}s و مطابق واکنش زیر واپاشیده می‌شود:

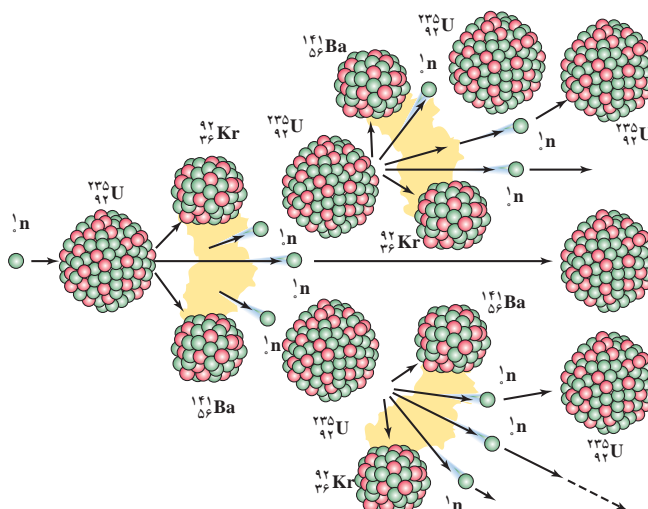


وقتی نوترونی با هسته اورانیم $^{235}_{92}\text{U}$ برخورد کند و جذب شود، هسته اورانیم شروع به ارتعاش می‌کند و تغییر شکل می‌دهد. ارتعاش تا وقتی ادامه می‌یابد که تغییر شکل چنان جدی شود که نیروی جاذبه هسته‌ای دیگر نتواند با نیروی دافعه الکتروستاتیکی بین پروتون‌های هسته متوازن شود. در این هنگام، هسته به پاره‌هایی وامی‌باشد که حامل انرژی (به‌طور عمده انرژی جنبشی) هستند. واکنش زنجیری: همان‌طور که دیدیم فرایند شکافت $^{235}_{92}\text{U}$ با جذب یک نوترون گُند آغاز می‌شود. اگر محصولات شکافت، باریوم $^{141}_{54}\text{Ba}$ و کریپتون $^{92}_{36}\text{Kr}$ باشند، در این فرایند ۳ نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند، هسته‌های دیگر آنها را دفع نمی‌کنند. نوترون‌ها پس از گُند شدن، توسط هسته‌های دیگر جذب می‌شوند و باعث شکافت در ۳ هسته اورانیم دیگر می‌شوند و ۹ نوترون آزاد می‌کنند. اگر هر یک از این نوترون‌ها نیز موفق به شکافت یک هسته اورانیم شود، ۲۷ نوترون آزاد می‌شود و به همین ترتیب تا آخر. این رشته واکنش را، واکنش زنجیری می‌نامند (شکل ۶-۱۱).

۱- به‌طور میانگین ۲/۷ نوترون در هر واکنش شکافت آزاد می‌شود.



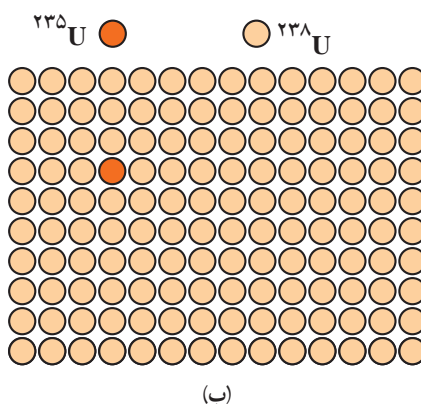
فریتز اشتراسمن (۱۹۸۰-۱۹۰۲ م.)
 فیزیک‌دان آلمانی یکی از دستیاران اتوهان در پروژه شکافت اورانیم در سال ۱۹۳۸ بود. وی توانست باره‌های حاصل از شکافت را که توسط نوترون‌های گُند بمباران شده بودند شناسایی کند. اشتراسمن برای سال‌ها پس از جنگ جهانی دوم، مدیر بخش شیمی مؤسسه ماکس پلانک بود.



شکل ۱۱-۴ مدل ساده‌ای از واکنش زنجیری. یک نوترون وارد هسته اورانیم ۲۳۵ می‌شود و فرایند شکافت رخ می‌دهد. برای سادگی، به‌جز باریوم و کریپتون، محصولات دیگر شکافت را در این شکل نشان نداده‌ایم.

در واکنش‌های شکافت هسته‌ای، جرم محصولات شکافت، کمتر از جرم هسته مرکب است. این اختلاف جرم بنا به رابطه $E = mc^2$ ، سبب آزاد شدن انرژی گرمایی زیادی می‌شود. انرژی‌ای که توسط محصولات شکافت حمل می‌شود عمدتاً به شکل انرژی جنبشی است. در هر واکنش شکافت حدود 200 MeV انرژی آزاد می‌شود. این انرژی، 10^8 برابر انرژی آزادشده به‌ازای هر مولکول در یک واکنش شیمیایی معمولی، نظیر سوختن بنزین یا زغال سنگ است. حتی در انفجار تری نیتروتولوئن (TNT)، انرژی آزادشده به‌ازای هر مولکول، در حدود 30 eV است.

شکل ۱۲-۶ الف، تصویری از ورودی مجتمع معدنی اورانیم ساغند (واقع در حوالی شهر اردکان یزد) را نشان می‌دهد. ممکن است این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیری به‌طور طبیعی در این معدن و دیگر معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟ پاسخ این است که در سنگ معدن اورانیم، دو ایزوتوپ 235U و 238U وجود دارد، به‌طوری که فراوانی ایزوتوپ 235U حدود 0.72% درصد است. به عبارت دیگر از هر 140 اتم اورانیم موجود در سنگ معدن اورانیم، تنها یکی از آنها ایزوتوپ 235U و مابقی ایزوتوپ 238U است (شکل ۱۲-۶ ب). اگرچه 238U فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیم است، احتمال اینکه نوترونی را گیر بیندازد و شکافته شود، بسیار کم است و در نتیجه واکنش زنجیری را ناممکن می‌سازد.



(الف)

شکل ۱۲-۶ الف معدن اورانیم ساغند با بیشترین ظرفیت تولید در ایران در حوالی شهر اردکان یزد واقع است. (ب) در سنگ معدن اورانیم از هر 140 اتم اورانیم، تنها یکی ایزوتوپ 235U است.

غنی‌سازی اورانیم: همان‌طور که اشاره کردیم، واکنش زنجیری در سنگ معدن اورانیم رخ نمی‌دهد. برای استفاده از اورانیم به‌عنوان سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای یا استفاده در انفجارهای هسته‌ای، باید فراوانی ایزوتوپ ^{235}U را در یک نمونه اورانیم، افزایش دهیم. به فرایند افزایش درصد یا غلظت ایزوتوپ ^{235}U در یک نمونه، **غنی‌سازی** گفته می‌شود. بیشتر راکتورهای تجاری تولید برق، مانند راکتور نیروگاه هسته‌ای بوشهر، از اورانیمی استفاده می‌کنند که در آنها ایزوتوپ ^{235}U تا ۳ درصد غنی‌سازی شده است. همچنین در بیشتر راکتورهای پژوهشی، مانند راکتور پژوهشی دانشگاه تهران، از سوختی استفاده می‌شود که ایزوتوپ ^{235}U تا ۲۰ درصد غنی‌سازی شده است.

شیوه‌های مرسوم غنی‌سازی اورانیم

جداسازی ایزوتوپ کمیاب ^{235}U از ایزوتوپ فراوان ^{238}U بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان‌اند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی برای جداسازی آنها استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ بر اساس اختلاف جرم آنها صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های انجام این کار، استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلوئور به‌صورت گاز هگزا فلورید اورانیم (UF_6) درمی‌آید؛ در این گاز، تندی متوسط ایزوتوپ ^{235}U کمی بیشتر از ایزوتوپ سنگین‌تر ^{238}U است. به همین دلیل ایزوتوپ ^{235}U از غشاهای نازکی که در این روش جداسازی به کار می‌رود، راحت‌تر می‌گذرد. پدیده پخش پس از طی هزاران مرحله، سرانجام منجر به تولید اورانیم با غنای مناسب می‌شود. غنی‌سازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی، نیز رایج است. در این روش، گاز هگزا فلورید اورانیم در یک استوانه چرخان فوق سریع (معمولاً ۵۰ هزار دور در دقیقه) به حرکت درمی‌آید. مولکول‌های گاز که حاوی ^{238}U هستند، سنگین‌ترند و به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های سبک‌تر حاوی ^{235}U ، از مرکز دستگاه استخراج می‌شوند.

راکتورهای شکافت هسته‌ای: نوترون‌های آزادشده در فرایند شکافت ایزوتوپ ^{235}U ، انرژی جنبشی زیادی دارند (به‌طور متوسط حدود 2MeV) و به نوترون‌های تند معروف‌اند. این نوترون‌ها، با احتمال بسیار بیشتری جذب ایزوتوپ ^{238}U می‌شوند. تجربه نشان می‌دهد اگر بتوان نوترون‌های تند را به نحوی کند ساخت که انرژی جنبشی آنها به حدود 0.4eV یا کمتر از آن برسد، احتمال جذب آنها توسط ایزوتوپ‌های ^{235}U افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای ایجاد واکنش زنجیری شکافت، کافی باشد. آب معمولی (H_2O)، آب سنگین (D_2O) و گرافیت (اتم‌های کربن) از جمله موادی هستند که به‌عنوان **کندساز** نوترون‌ها در واکنش‌های شکافت هسته‌ای استفاده می‌شوند.

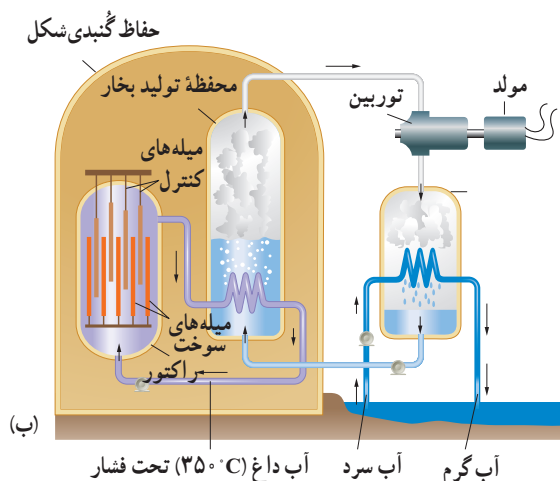
راکتور هسته‌ای، جایی است که در آن واکنش زنجیری شکافت به‌شکل کنترل شده رخ می‌دهد. اولین راکتور هسته‌ای به‌منظور شکافت ^{235}U ، در سال ۱۹۴۲ میلادی توسط ارنستو فرمی و همکارانش در دانشگاه شیکاگو ساخته شد. امروزه راکتورهایی با انواع و اندازه‌های مختلف ساخته شده‌اند که بیشتر به منظور تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های هسته‌ای به کار می‌روند (شکل ۱۳-۶ الف).



ارنستو فرمی (۱۹۵۴-۱۹۰۱ م.)

فیزیک‌دان ایتالیایی-آمریکایی در بیشتر حوزه‌های فیزیک جدید، هم به لحاظ نظری و هم در حوزه فعالیت‌های آزمایشگاهی و تجربی سهم به‌سزایی داشت. وی در سال ۱۹۳۰ نظریه‌ای برای واپاشی بتا را پیشنهاد کرد که هنوز به کار می‌رود. فرمی نخستین دانشمندی بود که تبدیل عناصر را بر اثر بمباران نوترونی نشان داد و برای این کار جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۳۸ را دریافت کرد. وی همچنین روند ساخت اولین راکتور هسته‌ای را در دانشگاه شیکاگو هدایت کرد.

راکتورهای هسته‌ای افزون بر سوخت هسته‌ای و ماده کُندساز (که پیش از این شرح داده شد) دارای، میله‌های کنترل و شاره‌ای (معمولاً آب) هستند که گرما را به خارج راکتور انتقال می‌دهد (شکل ۹-۱۳ ب).



(الف)

شکل ۹-۱۳ الف نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی شکافت هسته‌ای بوشهر. راکتور آب تحت فشار (PWR) این نیروگاه، در زیر قسمت گنبدی شکل قرار دارد. (ب) طرح‌واره‌ای از یک راکتور PWR و قسمت‌های اصلی یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

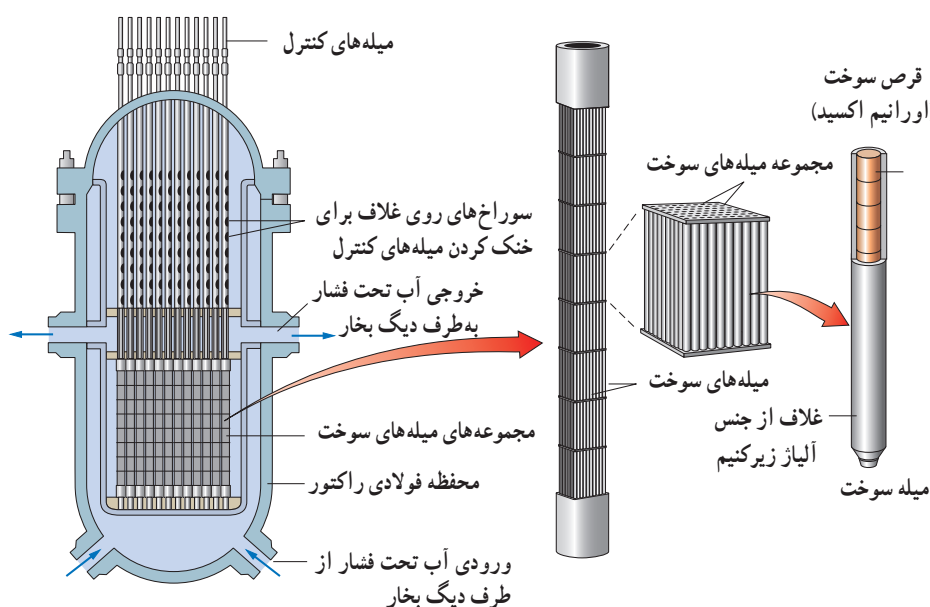
سوخت هسته‌ای (معمولاً با حدود ۳ درصد ایزوتوپ ^{235}U) به صورت میله‌هایی با قطر حدود ۱ cm است و هزاران عدد از این میله‌ها در قلب راکتور قرار دارد.

با وارد کردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش شکافت، یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای به وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب‌کننده نوترون، مانند کادمیم یا بور (Boron)، ساخته می‌شوند. در نوعی از راکتورها، که به راکتورهای آب تحت فشار (PWR) معروف‌اند، آبی که سوخت هسته‌ای را احاطه کرده است، تحت فشار زیاد (حدود ۱۵۰ اتمسفر) قرار دارد تا بدون آنکه بجوشد به دماهای بالا برسد. این آب داغ، به سامانه بسته دیگری که محتوی آب با فشار کمتر است، پمپ می‌شود تا این آب را گرم کند. گرمای انتقال یافته به سامانه دوم، سبب تولید بخار می‌شود که توربین و مولد الکتریسیته را به کار می‌اندازد.

کنترل واکنش زنجیری در راکتور شکافت

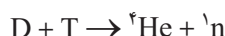
شکل صفحه بعد طرحی با جزئیات بیشتر از قلب یک راکتور را نشان می‌دهد. وقتی نوترون پر انرژی عنصر سوخت را ترک می‌کند، وارد آب تحت فشار پیرامون می‌شود. تندی این نوترون توسط کُندساز (مثلاً آب معمولی)، در کمتر از یک میلی ثانیه کاهش می‌یابد و نوترون کُندشده می‌تواند با ورود مجدد به عنصر سوخت، سبب شکافت دیگری شود. برای آنکه توان خروجی راکتور ثابت بماند، باید تنها یکی از نوترون‌های آزادشده در هر شکافت، سبب شکافت بعدی شود. وقتی به طور میانگین هر شکافت به شکافت دیگری منجر شود، گفته می‌شود که راکتور در حالت عادی یا اصطلاحاً در حالت بحرانی است.

(توجه کنید که اصطلاح حالت بحرانی در اینجا، به معنی حالت خطرناک نیست). در این حالت، راکتور با توان خروجی ثابت کار می‌کند. وقتی راکتور زیر بحرانی باشد به‌طور میانگین، نوترون‌های آزاد شده از هر شکافت، کمتر از یک شکافت بعدی را انجام می‌دهند. در راکتور زیر بحرانی، واکنش زنجیری خودنگهدار نیست و سرانجام خاموش می‌شود. وقتی به‌طور میانگین، نوترون‌های هر شکافت بیشتر از یک شکافت بعدی را انجام دهند، 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 پخش مواد پرتوزای خطرناک به محیط زیست همراه باشد. واضح است که برای نگه‌داشتن راکتور در حالت بحرانی، سازوکاری برای کنترل آن لازم است. این عمل با تعدادی میله‌های کنترل (مواد جذب‌کننده نوترون که ترکیبی از عناصری مانند بور (Boron)، ایندیم، کادمیم و نقره هستند) صورت می‌گیرد که می‌توانند به داخل یا خارج قلب راکتور حرکت داده شوند.

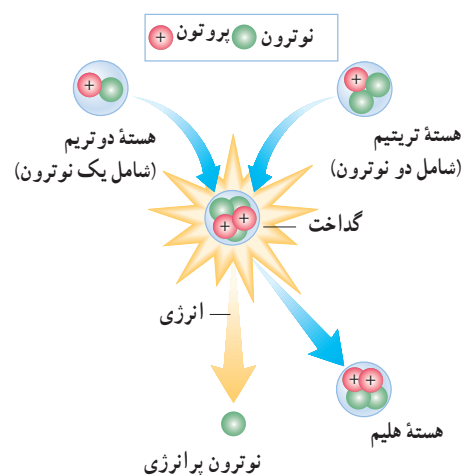


۴-۶ گداخت (همجوشی) هسته‌ای

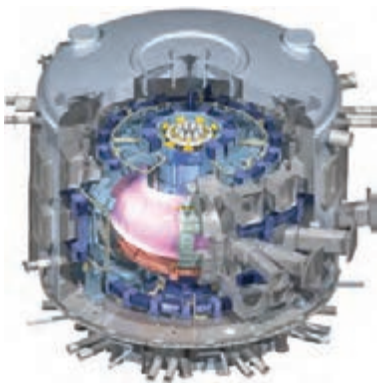
یک نوع دیگر واکنش هسته‌ای که منشأ تولید انرژی در ستارگان و از جمله خورشید است، گداخت یا همجوشی هسته‌ای نام دارد. در فرایند گداخت هسته‌ای، دو هسته سبک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هسته سنگین‌تری به وجود می‌آورند. برای مثال، واکنش گداخت زیر را در نظر بگیرید:



در این واکنش با همجوشی هسته‌های دو ایزوتوپ هیدروژن یعنی دوتریم و تریتم، هسته هلیوم و یک نوترون پرنرژی تولید می‌شود (شکل ۴-۶). در واکنش گداخت، 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 هم گداخته می‌شوند تا هسته هلیوم تشکیل شود. در این واکنش، مقدار زیادی انرژی (حدود ۱۷/۶ MeV) آزاد می‌شود که بخش عمده‌ای از آن به‌صورت انرژی جنبشی نوترون است.



شکل ۱۵-۶ طرحی از راکتور آزمایشی گرما هسته‌ای بین‌المللی (ITER). ساخت این راکتور با مشارکت چندین کشور جهان، از سال ۲۰۰۷ در فرانسه شروع شده است و قرار است از سال ۲۰۳۵ با توان خروجی ۵۰۰ مگاوات شروع به کار کند.

از آنجا که در واکنش‌های گداخت، مقدار بسیار زیادی انرژی آزاد می‌شود، ساخت راکتورهای گداخت مورد توجه زیادی است (شکل ۶-۱۵)؛ اگرچه تاکنون نوع تجاری آن ساخته نشده است. مشکلات در ساخت راکتور گداخت به این علت پیش می‌آید که دو هسته کم جرم باید به قدر کافی به هم نزدیک شوند تا نیروی کوتاه‌برد هسته‌ای بتواند آنها را کنار هم نگه دارد و واکنش گداخت انجام شود. ولی، هر هسته، بار مثبت دارد و هسته دیگر را دفع می‌کند، برای آنکه هسته‌ها با وجود این نیروی رانشی بسیار قوی، بتوانند به هم گداخته شوند، باید دما بسیار بالا باشد تا هسته‌ها با انرژی جنبشی زیادی به یکدیگر برخورد کنند. به همین دلیل، برای انجام این واکنش باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد. به طور مثال، برای شروع واکنش دوتریم-تریتیم، به دمایی حدود ده‌ها میلیون درجه سلسیوس نیاز است. دمایی از این مرتبه در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً خورشید، که در آن از گداخت هسته‌های هیدروژن انرژی آزاد می‌شود، دمای درونی آن فراتر از ۲۰ میلیون درجه سلسیوس برآورد شده است. در نتیجه واکنش گداخت هسته‌ای، در مرکز خورشید و ستارگان که دما و فشار بسیار بالاست صورت می‌گیرد.

آشنایی مختصر با ذرات بنیادی

تا سال ۱۹۳۲ سه ذره سازنده اتم‌ها شامل الکترون، پروتون، و نوترون کشف شده بودند و به عنوان سه ذره بنیادی تصور می‌شدند؛ ولی شواهد تجربی به دست آمده پس از آن، نشان داد که نه تنها پروتون و نوترون ذرات بنیادی نیستند؛ بلکه صدها ذره زیر اتمی دیگر نیز وجود دارد. به طور کلی ذرات زیر اتمی شناخته شده در عالم، یا مانند الکترون، پوزیترون، نوترینوها و میون‌ها بنیادی‌اند، یا مانند پروتون، نوترون و پیون‌ها غیر بنیادی‌اند و از ذرات بنیادی‌ای به نام کوارک‌ها ساخته شده‌اند. در شتاب‌دهنده‌ها بیشتر ذرات زیر اتمی را با برخورد پروتون‌ها یا نوترون‌های پر انرژی با یک هسته هدف به وجود می‌آورند. در ادامه به معرفی چند ذره بنیادی پرداخته و به طبقه‌بندی ذرات زیر اتمی نیز اشاره می‌شود.

پوزیترون: در سال ۱۹۳۲ ذره‌ای با همان جرم الکترون، ولی با بار مخالف (+e) توسط کارل اندرسون، فیزیک‌دان آمریکایی، کشف شد و جایزه نوبل فیزیک ۱۹۳۶ را برای وی به همراه داشت. این الکترون مثبت، پوزیترون نامیده شد^۲ که پادذره الکترون است! پوزیترون پایدار است و خود به خود واپاشیده نمی‌شود.

نوترینوها: در واپاشی β با این ذره آشنا شدید که در سال ۱۹۳۰ میلادی توسط ولفگانگ پاولی معرفی شد و به طور تجربی در سال ۱۹۵۶ مورد تأیید قرار گرفت. نوترینوها (شامل سه ذره و سه پادذره) ذراتی بنیادی، بدون بار و دارای جرم بسیار اندکی هستند. همچنین آشکارسازی آنها بسیار دشوار است، زیرا با ماده برهم کنش بسیار ضعیفی دارند. برای مثال، در هر ثانیه از مرتبه هزار میلیارد نوترینو از بدن ما می‌گذرد و اثر شناخته شده‌ای بر ما ندارد!

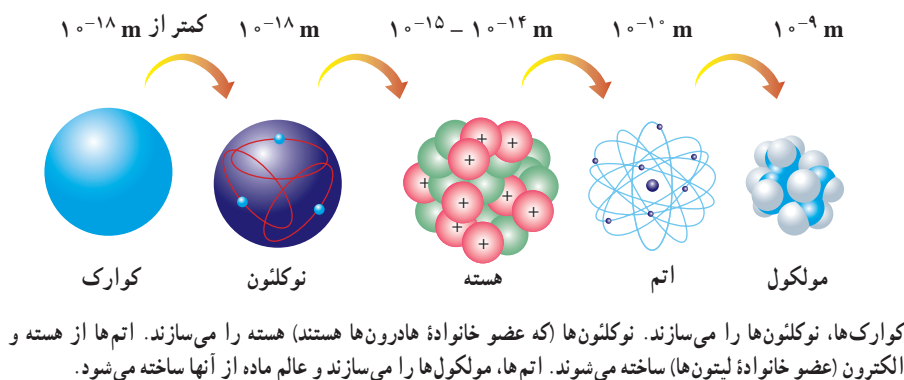
میون‌ها: در سال ۱۹۳۷ دو فیزیک‌دان آمریکایی، ذرات باردار جدیدی را کشف کردند که جرم آنها کمی بیش از ۲۰۰ برابر جرم الکترون و اندازه بار آنها برابر بار الکترون بود. این دو ذره را که جرمی یکسان، ولی بار مخالف دارند میون می‌نامند و با نمادهای

^۱ - International Thermonuclear Experimental Reactor

^۲ - نام پوزیترون (positron)، صورت کوتاه‌شده الکترون مثبت (positive electron) است.

μ^+ و μ^- نشان می‌دهند. میون‌ها ذراتی بنیادی و دارای طول عمری از مرتبه میکروثانیه هستند^۱.
 طبقه‌بندی ذرات: تمامی ذرات زیر اتمی را در سه خانواده حامل‌های نیرو، لپتون‌ها و هادرون‌ها می‌توان طبقه‌بندی کرد.
 ■ خانواده حامل‌های نیرو از ذراتی تشکیل شده‌اند که نقشی اساسی در برهم‌کنش‌ها بازی می‌کنند. برای مثال، فوتون که یکی از ذرات عضو این خانواده است عامل برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی است.
 ■ خانواده لپتون‌ها شامل ذراتی هستند که تمامی آنها بنیادی‌اند. الکترون، پوزیترون، نوترینوها و میون‌ها از جمله ذرات عضو خانواده لپتون‌ها هستند.
 ■ خانواده هادرون‌ها، شامل ذراتی غیر بنیادی هستند که از ذرات ریزتری به نام کوارک‌ها ساخته شده‌اند. پروتون، نوترون و پیون‌ها^۲ 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 گلن و جورج تسوايگ 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 متناظر با آنها پیشنهاد شده است. به این ترتیب، می‌توان گفت ذرات بنیادی یا همان بُن‌سازه‌های ماده، کوارک‌ها و لپتون‌ها هستند و همه عالم از آنها ساخته شده است. شکل زیر طرحی ساده از چگونگی تشکیل ماده از واحدهای اصلی را نشان می‌دهد.



موری گلن (۱۹۲۹) فیزیک‌دان آمریکایی، درحالی‌که فقط ۲۲ سال داشت دکترایش را در سال ۱۹۵۱ از دانشگاه MIT گرفت و دورهٔ پسادکترای خود را در دانشگاه پرینستون گذراند. وی از سال ۱۹۵۵ تا زمان بازنشستگی خود در سال ۱۹۹۳، استاد دانشگاه کلتیک بود. مجموعه کارهای گلن در دهه‌های ۵۰ تا ۷۰ میلادی به تحولات عظیمی در فیزیک ذرات بنیادی انجامید، چنان‌که برخی از وی به نام پدر فیزیک ذرات بنیادی یاد می‌کنند. موری گلن و جورج تسوايگ (۱۹۳۷) هر کدام به‌طور جداگانه مدلی برای ذرات سازنده هادرون‌ها پیشنهاد کردند ولی گلن بود که این ذرات بنیادی را کوارک نامید. گلن در سال ۱۹۶۹ برای سهم مهمی که در کشف و دسته‌بندی ذرات بنیادی و برهم‌کنش‌های آنها داشت برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک شد.

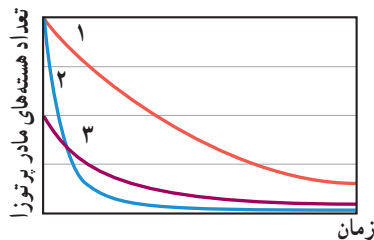


۱- در یک روش برای تولید میون، باریکهٔ پراثری پروتون (بزرگ‌تر از 5.0 MeV) به هدف ثابتی از جنس کربن برخورد می‌کند و یک نوترون و یک π^+ تولید می‌شود. پس از 2.6 ns ، π^+ به μ^+ تبدیل می‌شود.
 ۲- پیون‌ها در سال ۱۹۴۷ کشف شدند و به سه صورت مثبت، منفی و خنثی وجود دارند که به ترتیب با π^+ ، π^- و π^0 نشان داده می‌شوند. جرم هر سه پیون با یکدیگر برابر است. پیون‌های π^+ و π^- پادذرهٔ یکدیگرند و دارای طول عمری از مرتبه 10^{-8} ثانیه هستند.

۶-۱ ساختار هسته

۷. سرب $^{208}_{82}\text{Pb}$ هسته دختر پایداری است که می‌تواند از واپاشی α یا واپاشی β^- حاصل شود. فرایندهای مربوط به هر یک از این واپاشی‌ها را بنویسید. در هر مورد هسته مادر را به صورت ^A_ZX مشخص کنید.

۸. نپتونیم $^{237}_{93}\text{Np}$ ایزوتوبی است که در راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. این ایزوتوپ ناپایدار است و واپاشی آن از طریق گسیل ذرات α ، β^- و α صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هسته نهایی چقدر است؟
۹. شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزای سه نمونه را برحسب زمان نشان می‌دهد. نیمه‌عمر این سه نمونه را با هم مقایسه کنید.



۱۰. هنگامی که نیتروژن جو زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن $^{14}_6\text{C}$ با آهنگ ثابتی در لایه‌های فوقانی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن $^{12}_6\text{C}$ که به طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به ازای هر 10000 میلیارد اتم پایدار کربن $^{12}_6\text{C}$ ، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن $^{14}_6\text{C}$ از این طریق وارد جو می‌شود.
اتم‌های کربن جوّی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فتوسنتز و تنفس، به نحو کاتوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به طوری که اتم‌های کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزای کربن $^{14}_6\text{C}$ است.

وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر 5730 سال رو به کاهش می‌گذارد. کربن $^{14}_6\text{C}$ موجود در یک نمونه زغال قدیمی، $1/56$ درصد (معادل $1/64$) مقدار عادی کربن $^{14}_6\text{C}$ موجود در زغالی است که تازه تولید

۱. تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان در کنار هم (تنگ‌چین) در یک توپ تنیس به شعاع $3/2\text{ cm}$ جای داد، حساب کنید. در این صورت جرم این توپ چقدر است؟

(شعاع و جرم نوترون را به ترتیب $1/4 \times 10^{-16}\text{ m}$ و $1/7 \times 10^{-27}\text{ kg}$ در نظر بگیرید.)

۲. برای $^{208}_{82}\text{Pb}$ مطلوب است:

(الف) تعداد نوکلئون‌ها (ب) تعداد نوترون‌ها
(پ) بار الکتریکی خالص هسته

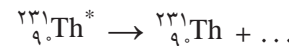
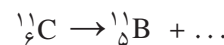
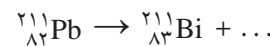
۳. در هر یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد و در هسته هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.

(الف) $^{195}_{78}\text{X}$ (ب) $^{32}_{16}\text{X}$ (پ) $^{61}_{29}\text{X}$

۴. آیا می‌توان ایزوتوپ $^{61}_{29}\text{X}$ را با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{59}_{29}\text{X}$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{61}_{29}\text{Y}$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

۶-۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

۵. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان‌دهنده یک یا چند ذره α ، β^+ یا β^- است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.



۶. هسته دختر به دست آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به صورت ^A_ZX مشخص کنید.

(الف) $^{242}_{94}\text{Pu}$ واپاشی α انجام دهد.

(ب) سدیم $^{24}_{11}\text{Na}$ واپاشی β^- انجام دهد.

(پ) نیتروژن $^{13}_7\text{N}$ واپاشی β^- انجام دهد.

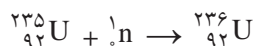
(ت) $^{15}_8\text{O}$ واپاشی β^+ انجام دهد.

شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

۱۱. نیمه عمر بیسموت ۲۱۲ حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه، در نمونه‌ای از این بیسموت، باقی می‌ماند؟

۳-۶ شکافت هسته‌ای

۱۲. معادله زیر بخشی از واکنشی را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.



الف) اهمیت عددهای ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.

ب) اتم‌های ${}^{235}_{92}\text{U}$ ناپایدارند و خود به خود به قطعه‌هایی کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی انرژی واپاشیده می‌شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟

پ) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون‌های با تندی کم را جذب می‌کند تا نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه تندی نوترون‌ها را در قلب راکتور کم می‌کنند.

ت) چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟

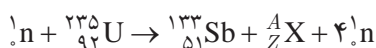
ث) واکنش زنجیری را توضیح دهید.

ج) انرژی به صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟
چ) هنگامی که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می‌شوند، آنها «پرتوزا» و «ایزوتوپ»هایی با «نیمه عمر» طولانی هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.

۱۳. الف) حدود ۰/۷۲ درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود 200 MeV انرژی آزاد می‌شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در 1000 kg از این اورانیم بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی بر حسب مگاالکترون ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟

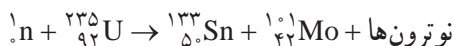
ب) با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود 30 MJ انرژی

گرمایی آزاد می‌شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در قسمت الف، انرژی تولید شود؟
۱۴. یکی از واکنش‌های ممکن در شکافت ${}^{235}_{92}\text{U}$ ، داده شده است. در این واکنش عدد اتمی Z ، عدد جرمی A و عنصر X را در ${}^A_Z\text{X}$ تعیین کنید.



در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

۱۵. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟



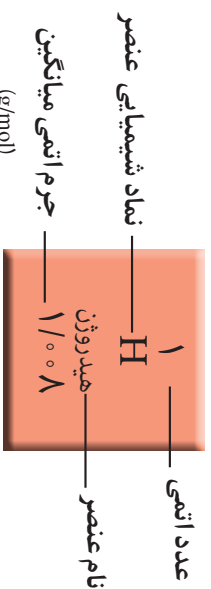
۱۶. بازده نیروگاه هسته‌ای بوشهر حدود ۳۵ درصد است. یعنی ۶۵ درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵، به صورت گرما تلف و حدود ۳۵ درصد آن، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود 200 MeV انرژی آزاد می‌شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت پیدا می‌کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان پایدار 1000 مگاوات کار می‌کند.)

۴-۶ گداخت هسته‌ای

۱۷. انرژی آزاد شده در هر واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ با یک نوترون کند حدود 200 MeV و در هر واکنش گداخت دوتریم با تریتم حدود 17 MeV است.
الف) تعداد نوکلئون‌های شرکت کننده در هر واکنش شکافت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید.
ب) تعداد نوکلئون‌های شرکت کننده در هر واکنش گداخت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

پ) نتیجه‌های قسمت (الف) و (ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی، و با توجه به اینکه مواد قابل شکافت مانند ${}^{235}\text{U}$ 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 کم هزینه است، اهمیت این مقایسه را توضیح دهید.

جدول دوره‌ای عناصر



^۱ H هیدروژن ۱/۰۰۸	^۴ Be برلیوم ۹/۰۰۱	^{۱۶} S گوگرد ۳۲/۰۷	^{۱۷} Cl کلر ۳۵/۴۵	^{۱۸} Ar آرگون ۳۹/۹۵	^۲ ^۰ He هلیوم ۴/۰۰۳
---------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------	---

^۳ Li لیتیم ۶/۹۴	^{۱۲} Mg منیزیم ۲۴/۳۱	^{۳۲} Ge ژرمانیم ۷۲/۶۴	^{۳۳} As آرستیک ۷۴/۹۲	^{۳۴} Se سلنیم ۷۸/۹۶	^{۳۵} Br برم ۷۹/۹۰	^{۳۶} Kr کریپتون ۸۳/۸۰
-------------------------------------	--	---	--	---------------------------------------	-------------------------------------	---

^{۱۹} K پتاسیم ۳۹/۱۰	^{۲۰} Ca کلسیم ۴۰/۰۸	^{۴۰} Zr زئیرکونیم ۹۱/۲۳	^{۴۱} Nb نیوبیم ۹۲/۹۰	^{۴۲} Mo مولیبدنیم ۹۵/۹۴	^{۴۳} Tc تکنسیم _	^{۴۴} Ru روثنیم ۱۰۱/۱۱	^{۴۵} Rh روادیم ۱۰۱/۰۷	^{۴۶} Pd پالادیم ۱۰۶/۴۰	^{۴۷} Ag نقره ۱۰۷/۹۰	^{۴۸} Cd کادمیم ۱۱۲/۴۰	^{۴۹} In ایندیم ۱۱۴/۸۰	^{۵۰} Sn قلع ۱۱۸/۷۰	^{۵۱} Sb آنتیمون ۱۲۱/۸۰	^{۵۲} Te تلوریم ۱۲۷/۶۰	^{۵۳} I یُد ۱۲۶/۹۰	^{۵۴} Xe زئنون ۱۳۱/۳۰
---------------------------------------	---------------------------------------	---	--	---	------------------------------------	---	---	--	---------------------------------------	---	---	--------------------------------------	--	---	-------------------------------------	--

^{۲۷} Rb روبیدیم ۸۵/۴۷	^{۳۸} Sr استرونسیم ۸۷/۶۲	^{۷۱} Lu لوئیسیم ۱۷۵/۰۰	^{۷۲} Hf هافنیم ۱۷۸/۵۰	^{۷۳} Ta تانتال ۱۸۰/۹۰	^{۷۴} W تنگستن ۱۸۳/۸۰	^{۷۵} Re رئنیوم ۱۸۶/۲۰	^{۷۶} Os اوسمیم ۱۹۰/۲۰	^{۷۷} Ir ایریدیم ۱۹۲/۲۰	^{۷۸} Pt پلاتین ۱۹۵/۰۱	^{۷۹} Au طلا ۱۹۷/۰۰	^{۸۰} Hg جیوه ۲۰۰/۶۰	^{۸۱} Tl تالیم ۲۰۴/۳۰	^{۸۲} Pb سرب ۲۰۷/۲۰	^{۸۳} Bi بیسموث ۲۰۹/۰۰	^{۸۴} Po پولونیم [۲۰۹]	^{۸۵} At استاتین [۲۱۰]	^{۸۶} Rn رادون [۲۲۲]	^{۸۷} Fr فرانسیم [۲۲۳]
---	---	--	---	---	--	---	---	--	---	--------------------------------------	---------------------------------------	--	--------------------------------------	---	---	---	---------------------------------------	---

^{۵۷} La لانتان ۱۳۸/۹۰	^{۵۸} Ce سریتم ۱۴۰/۱۰	^{۵۹} Pr پراسئودیم ۱۴۰/۹۰	^{۶۰} Nd نئودیم ۱۴۴/۲۰	^{۶۱} Pm پرومتیم [۱۴۵]	^{۶۲} Sm ساماریوم ۱۵۰/۰۰	^{۶۳} Eu اولویم ۱۵۲/۰۰	^{۶۴} Gd گادولیم ۱۵۷/۰۰	^{۶۵} Tb تربیم ۱۵۸/۹۰	^{۶۶} Dy دیسپروزیوم ۱۶۲/۵۰	^{۶۷} Ho هولم ۱۶۴/۹۰	^{۶۸} Er ارتم ۱۶۷/۳۰	^{۶۹} Tm تولیم ۱۶۸/۹۰	^{۷۰} Yb ایتربیم ۱۷۳/۰۰
^{۸۹} Ac آکتینیم [۲۲۷]	^{۹۰} Th توریم ۲۳۲/۰۰	^{۹۱} Pa پرواکتینیم ۲۳۱/۰۰	^{۹۲} U اورانیوم ۲۳۸/۰۰	^{۹۳} Np نپتونیوم [۲۳۷]	^{۹۴} Pu پلوتونیوم [۲۴۴]	^{۹۵} Am آمریسیم [۲۴۳]	^{۹۶} Cm کوریوم [۲۴۷]	^{۹۷} Bk برکلیم [۲۴۷]	^{۹۸} Cf کالیفرنیم [۲۵۱]	^{۹۹} Es ایسپانیم [۲۵۲]	^{۱۰۰} Fm فرمنیم [۲۵۷]	^{۱۰۱} Md مندیلیوم [۲۵۸]	^{۱۰۲} No نوبلیوم [۲۵۹]

جدول مثلثاتی

زاویه بر حسب درجه	زاویه بر حسب رادیان	سینوس	کسینوس	تانژانت	زاویه بر حسب درجه	زاویه بر حسب رادیان	سینوس	کسینوس	تانژانت
0°	0.000	0.000	1.000	0.000					
1°	0.017	0.017	1.000	0.017	46°	0.803	0.719	0.695	1.036
2°	0.035	0.035	0.999	0.035	47°	0.820	0.731	0.682	1.072
3°	0.052	0.052	0.999	0.052	48°	0.838	0.743	0.669	1.111
4°	0.070	0.070	0.998	0.070	49°	0.855	0.755	0.656	1.150
5°	0.087	0.087	0.996	0.087	50°	0.873	0.766	0.643	1.192
6°	0.105	0.105	0.995	0.105	51°	0.890	0.777	0.629	1.235
7°	0.122	0.122	0.993	0.123	52°	0.908	0.788	0.616	1.280
8°	0.140	0.139	0.990	0.141	53°	0.925	0.799	0.602	1.327
9°	0.157	0.156	0.988	0.158	54°	0.942	0.809	0.588	1.376
10°	0.175	0.174	0.985	0.176	55°	0.960	0.819	0.574	1.428
11°	0.192	0.191	0.982	0.194	56°	0.977	0.829	0.559	1.483
12°	0.209	0.208	0.978	0.213	57°	0.995	0.839	0.545	1.540
13°	0.227	0.225	0.974	0.231	58°	1.012	0.848	0.530	1.600
14°	0.244	0.242	0.970	0.249	59°	1.030	0.857	0.515	1.664
15°	0.262	0.259	0.966	0.268	60°	1.047	0.866	0.500	1.732
16°	0.279	0.276	0.961	0.287	61°	1.065	0.875	0.485	1.804
17°	0.297	0.292	0.956	0.306	62°	1.082	0.883	0.469	1.881
18°	0.314	0.309	0.951	0.325	63°	1.100	0.891	0.454	1.963
19°	0.332	0.326	0.946	0.344	64°	1.117	0.899	0.438	2.050
20°	0.349	0.342	0.940	0.364	65°	1.134	0.906	0.423	2.145
21°	0.367	0.358	0.934	0.384	66°	1.152	0.914	0.407	2.246
22°	0.384	0.375	0.927	0.404	67°	1.169	0.921	0.391	2.356
23°	0.401	0.391	0.921	0.424	68°	1.187	0.927	0.375	2.475
24°	0.419	0.407	0.914	0.445	69°	1.204	0.934	0.358	2.605
25°	0.436	0.423	0.906	0.466	70°	1.222	0.940	0.342	2.747
26°	0.454	0.438	0.899	0.488	71°	1.239	0.946	0.326	2.904
27°	0.471	0.454	0.891	0.510	72°	1.257	0.951	0.309	3.078
28°	0.489	0.469	0.883	0.532	73°	1.274	0.956	0.292	3.271
29°	0.506	0.485	0.875	0.554	74°	1.292	0.961	0.276	3.487
30°	0.524	0.500	0.866	0.577	75°	1.309	0.966	0.259	3.732
31°	0.541	0.515	0.857	0.601	76°	1.326	0.970	0.242	4.011
32°	0.559	0.530	0.848	0.625	77°	1.344	0.974	0.225	4.331
33°	0.576	0.545	0.839	0.649	78°	1.361	0.978	0.208	4.705
34°	0.593	0.559	0.829	0.675	79°	1.379	0.982	0.191	5.145
35°	0.611	0.574	0.819	0.700	80°	1.396	0.985	0.174	5.671
36°	0.628	0.588	0.809	0.727	81°	1.414	0.988	0.156	6.314
37°	0.646	0.602	0.799	0.754	82°	1.431	0.990	0.139	7.115
38°	0.663	0.616	0.788	0.781	83°	1.449	0.993	0.122	8.144
39°	0.681	0.629	0.777	0.810	84°	1.466	0.995	0.105	9.514
40°	0.698	0.643	0.766	0.839	85°	1.484	0.996	0.087	11.43
41°	0.716	0.656	0.755	0.869	86°	1.501	0.998	0.070	14.301
42°	0.733	0.669	0.743	0.900	87°	1.518	0.999	0.052	19.081
43°	0.750	0.682	0.731	0.933	88°	1.536	0.999	0.035	28.636
44°	0.768	0.695	0.719	0.966	89°	1.553	1.000	0.017	57.290
45°	0.785	0.707	0.707	1.000	90°	1.571	1.000	0.000	∞

واژه‌نامه فارسی – انگلیسی

Excitation	برانگیختگی	الف	
Resultant vector	بردار برآیند	Threshold of pain	آستانه دردناکی
Position vector	بردار مکان	Threshold of hearing	آستانه شنوایی
Interaction	برهم‌کنش	Disturbance	آشفته‌گی
Frequency	بسامد (فرکانس)	Detection	آشکارسازی
Threshold frequency	بسامد آستانه	Pendulum	آونگ
Resonance frequency	بسامد تشدید	Simple pendulum	آونگ ساده
Angular frequency	بسامد زاویه‌ای	Plane mirror	آینه تخت
Extremely low frequency (ELF)	بسامدهای فوق پایین	Doppler effect	اثر دوپلر
Loudspeaker	بلندگو	Photoelectric effect	اثر فوتوالکتریک
Loudness	بلندی صوت	Microwave oven	اجاق میکروموج
		Vibration	ارتعاش
		Pitch	ارتفاع صوت
		Friction	اصطکاک
		Superposition principle	اصل برهم‌نهی
		Electromagnetic waves	امواج الکترومغناطیسی
		Propagation	انتشار
		Blue shift	انتقال به آبی
		Red shift	انتقال به سرخ
		Released energy	انرژی آزادشده
		Binding energy	انرژی بستگی
		Potential energy	انرژی پتانسیل
		Elastic potential energy	انرژی پتانسیل کشسانی
		Gravitational potential energy	انرژی پتانسیل گرانشی
		Kinetic energy	انرژی جنبشی
		Isotope	ایزوتوپ (هم‌مکان)
		ب	
		Reflection	بازتاب
		Specular reflection	بازتاب آینه‌ای (منظم)
		Diffuse reflection	بازتاب پخشنده (نامنظم)
		Total internal reflection	بازتاب داخلی کلی
		Critical	بحرانی
		پ	
		Trough	پاستیغ موج
		Collor dispersion	پاشندگی رنگی
		Stable	پایدار
		Atom stability	پایداری اتم
		Diffraction	پراش
		Radioactivity	پرتو زایی
		Refracted ray	پرتوی شکسته
		Incident ray	پرتوی فرودی (تابیده)
		Gamma ray	پرتوی گاما
		Echo	پژواک
		Pion	پیون
		ت	
		Thermal radiation	تابش گرمایی
		Sinusoidal function	تابع سینوسی
		Fiber optic	تار نوری
		Mass – energy conversion	تبدیل جرم – انرژی
		Pulse	تپ
		Interference	تداخل
		Constructive interference	تداخل سازنده
		Destructive interference	تداخل ویرانگر

Circular motion	حرکت دایره‌ای	Energy level	تراز انرژی
Uniform circular motion	حرکت دایره‌ای یکنواخت	Intensity level	تراز شدت صوت
Periodic motion	حرکت دوره‌ای	Ripple tank	تشت موج
Decelerating motion	حرکت کندشونده	Resonance	تشدید
Simple Harmonic Motion	حرکت هماهنگ ساده	Helmholtz resonator	تشدیدگر هلمهولتز
Uniform motion	حرکت یکنواخت	Momentom	تکانه
		Monochromatic	تکفام
	خ	Speed	تندی
Lepton family	خانوادهٔ لپتون	Speed of propagation	تندی انتشار
Hadron family	خانوادهٔ هادرون	Terminal speed	تندی حدی
Normal	خط عمود	Instantaneous speed	تندی لحظه‌ای
		Average speed	تندی متوسط
	د		
Amplitude	دامنه		ث
Valley	درهٔ موج	Planck constant	ثابت پلانک
Period	دورهٔ تناوب	Rydberg constant	ثابت ریدبرگ
Tuning fork	دیاپازون	Spring constant	ثابت فنر
Dynamics	دینامیک		ج
		Displacement	جاب‌جایی
	ذ	Wavefront	جبههٔ موج
Beta particle	ذرهٔ بتا	Atomic mass	جرم اتمی
		Direction	جهت
	ر		چ
Series of lines	رشتهٔ خطوط	Source	چشمه
Lyman series	رشتهٔ لیمان	Linear mass density	چگالی خطی جرم
	ز		
Subcritical	زیر بحرانی		ح
	س		
Crest	ستیع موج	Motion with constant acceleration	حرکت باشتاب ثابت
Oasis mirage	سراب (سراب آبگیر)	Motion along a straight line	حرکت بر خط راست
Velocity	سرعت	Accelerating motion	حرکت تندشونده

Emission spectrum	طیف گسیلی (نثری)	Initial velocity	سرعت اولیه
Spectroscope	طیف نما	Instantaneous velocity	سرعت لحظه‌ای
Spectroscopy	طیف نمایی	Average velocity	سرعت متوسط
		Free falling	سقوط آزاد

ع

Transmission	عبور
Atomic number	عدد اتمی
Quantum number	عدد کوانتومی
Harmonic number	عدد هماهنگ
Snapshot	عکس (تصویر) لحظه‌ای

غ

Enrichment	غنی سازی
------------	----------

ف

Supercritical	فرا بحرانی
Ultraviolet	فرابنفش
Ultrasound	فراصوت
Infrared	فروسرخ
Subsonic	فروصوت
Fringe	فریز (نوار)
Spring	فنر
Atomic physics	فیزیک اتمی
Nuclear physics	فیزیک هسته‌ای

ق

Snell's Law	قانون اسنل
General law of reflection	قانون بازتاب عمومی
General law of refraction	قانون شکست عمومی
Wave train	قطار موج
Reactor core	قلب راکتور
Peak	قله موج
Newton's laws	قوانین نیوتون

ش

Metastable	شبه پایدار
Acceleration	شتاب
Gravity acceleration	شتاب گرانشی
Instantaneous acceleration	شتاب لحظه‌ای
Average acceleration	شتاب متوسط
Centripetal acceleration	شتاب مرکزگرا
Intensity	شدت
Nuclear fission	شکافت هسته‌ای
Refraction	شکست
Antinode	شکم موج
Slope	شیب خط

ص

Sound	صوت
-------	-----

ض

Coefficient of static friction	ضریب اصطکاک ایستایی
Coefficient of kinetic friction	ضریب اصطکاک جنبشی
Refraction index	ضریب شکست

ط

Classification of particles	طبقه‌بندی ذرات
Wavelength	طول موج
Spectrum	طیف
Atomic spectrum	طیف اتمی
Absorption spectrum	طیف جذبی
Line spectrum	طیف خطی

Standing wave	موج ایستاده
Travelling wave	موج پیشرونده
Plane wave	موج تخت
Sinusoidal wave	موج سینوسی
Sound wave	موج صوتی
Longitudinal wave	موج طولی
Transverse wave	موج عرضی
Spherical wave	موج کروی
Seismic wave	موج لرزه‌ای
Mechanical wave	موج مکانیکی
Controls road	میله‌های کنترل
Muon	میون

ن

Discrete	ناپیوسته
Ground wave coverage	ناحیه پوشش زمینی موج
Sky wave coverage	ناحیه پوشش هوایی موج
Observer	ناظر
Out of Phase	ناهمفاز
Relativity	نسبیت
Wave pattern	نقش موج
Turning point	نقطه بازگشتی
Energy level diagram	نمودار تراز انرژی
Dark fringe	نوار (فریز) تاریک
Interference fringe	نوار (فریز) تداخلی
Light fringe	نوار (فریز) روشن
Neutrino	نوترینو
Visible light	نور مرئی
Oscillation	نوسان
Periodic oscillation	نوسان دوره‌ای
Vibration generator	نوسان‌ساز
Oscillator	نوسانگر

ک

Mass defect	کاستی جرم
Focal point	کانون (نقطه کانونی)
Focus	کانونی شدن (کردن)
Quark	کوارک

گ

Fusion	گداخت (همجوشی)
Nuclear fusion	گداخت (همجوشی) هسته‌ای
Transition	گذار
Node	گره موج
Emission	گسیل
Stimulated emission	گسیل القایی
Spontaneous emission	گسیل خودبه‌خود

ل

Inertia	لختی
Two open ends pipe	لوله صوتی با دو انتهای باز
One open end pipe	لوله صوتی با یک انتهای باز

م

Satellite	ماهواره
Medium	محیط
Fundamental mode	مد اصلی
Nuclear atom model	مدل اتم هسته‌ای
The Bohr model	مدل بور
The Thomson model	مدل تامسون
The Rutherford model	مدل رادرفورد
Maxwell equations	معادله‌های ماکسول
Air resistance	مقاومت هوا
Echolocation	مکان‌یابی پژواکی
Skip zone	منطقه ردشوندگی

Population inversion	وارونی جمعیت	Damped oscillation	نوسان میرا
Reaction	واکش	Oscillograph	نوسان نگار
Deuterium – Tritium reaction	واکش دوتریم - تریتم	Driven oscillation	نوسان واداشته
Chain reaction	واکش زنجیری	Nucleon	نوکلئون
Weight	وزن	Force	نیرو
Equilibrium state	وضع تعادل	Friction force	نیروی اصطکاک
High voltage	ولتاژ بالا	Net force	نیروی خالص

ه

Nucleus	هسته	String force	نیروی کشش طناب
Stable nucleus	هسته پایدار	Gravitational force	نیروی گرانشی
Unstable nucleus	هسته ناپایدار	Centripetal force	نیروی مرکزگرا
Harmonic	هماهنگ	Drag force	نیروی مقاومت شاره (پس کشی)
In – Phase	همفاز	Nuclear force	نیروی هسته‌ای
Homogeneous	همگن	Half life	نیمه عمر

و

Decay	واپاشی
-------	--------

منابع انگلیسی

- 1– McGraw – Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms, Sybil p. Parker, 4th edition, 1989, Mc Graw – Hill.
2. Physics, James S. Walker, 5th Edition, 2017, Pearson.
3. University Physics, Bauer and Westfall, 2011, McGraw – Hill.
4. Physics, Douglas C. Giancoli, 7th Edition, 2014, Prentice – Hall International.
5. Physics, Allen Giambattista , Betty Richardson and Robert Richardson, 2nd Edition, 2008, McGraw– Hill.
6. Physics for Scientists and Engineers, Randall D. Knight, 3rd Edition, 2013, Pearson.
7. Cambridge International AS and A Level Physics, Mike Crundell, 2nd Edition, 2014, Hodder Education.
8. University Physics, Sears & Zemansky and Hugh D. Young, 14th edition 2016, Addison–Wesley.
9. Introduction to Physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 10th Edition, 2016, John Wiley & Sons, Inc.
10. College Physics, Eugenia Etkina, 2014, Pearson
11. Oxford Physics IB Diploma, David Homer and Michael Bowen – Jones, 2014, Oxford University Press.
12. Pearson IB Diploma, Chris Hamper, 2009, Pearson.
13. IB Physics, Gregg Kerr and Paul Ruth, 3rd edition, 2007, IBID Press.
14. College Physics, Hugh D. Young, 9th edition, 2012, Addison – Wesley.
15. College Physics, Raymond Serway and Chris Vuille, 9th edition, 2012, Cengage Learning
16. Physics, David Young and Shane Stadler , 10th edition , 2015 , John wiley.
17. Inquiry into Physics, Vern J. Ostdieck and Donald J. Bord, 8th edition, 2018, Cengage Learning.
18. College Physics, Nicholas J. Giardano, 2010, Cengage Learning.
19. Physics, Eugen Hecht, 2nd edition, 1998, Brooks.

منابع فارسی

- ۱- فیزیک دانشگاهی (جلد اول)، ویراست دوازدهم، سیرز، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاضی، روح‌اله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحتی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۲- مبانی فیزیک، جلد‌های اول تا سوم ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیکی و یرل واکر، ترجمه محمد رضا خوش بین خوش نظر، چاپ ۱۳۹۶، انتشارات نیاز دانش.
- ۳- دوره درسی فیزیک (جلد سوم) زیر نظر: گ. س. لند سیرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و همکاران، انتشارات فاطمی، ۱۳۷۶.
- ۴- آشنایی با فیزیک هسته‌ای کنت. کرین، ترجمه منیژه رهبر و بهرام معلمی، نشر دانشگاهی، ۱۳۸۶.
- ۵- نمایش هیجان‌انگیز فیزیک، ویراست دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش بین خوش نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱، انتشارات آراکس.
- ۶- مجموعه سه جلدی دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ویراسته محمد ابراهیم ابوکاظمی، ۱۳۸۷-۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.
- ۷- مجموعه ۵ جلدی فیزیک جدید، جان کاتنل و کنت جانسون، ترجمه روح‌اله خلیلی بروجنی و ناصر مقبلی، انتشارات مدرسه، ۱۳۹۶-۱۳۹۳.
- ۸- مبانی فیزیک ریموند سروی، جلد‌های اول و دوم، ترجمه منیژه رهبر، انتشارات فاطمی، ۱۳۹۴.



سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی جهت ایفای نقش خطیر خود در اجرای سند تحول بنیادین در آموزش و پرورش و برنامه درسی ملی جمهوری اسلامی ایران، مشارکت معلمان را به عنوان یک سیاست اجرایی مهم دنبال می‌کند. برای تحقق این امر در اقدامی نوآورانه سامانه تعاملی بر خط اعتبارسنجی کتاب‌های درسی راه‌اندازی شد تا با دریافت نظرات معلمان درباره کتاب‌های درسی نونگاشت، کتاب‌های درسی را در اولین سال چاپ، با کمترین اشکال به دانش‌آموزان و معلمان ارجمند تقدیم نماید. در انجام مطلوب این فرایند، همکاران گروه تحلیل محتوای آموزشی و پرورشی استان‌ها، گروه‌های آموزشی و دبیرخانه راهبری دروس و مدیریت محترم پروژه آقای محسن باهو نقش سازنده‌ای را بر عهده داشتند. ضمن ارج نهادن به تلاش تمامی این همکاران، اسامی دبیران و هنرآموزانی که تلاش مضاعفی را در این زمینه داشته و با ارائه نظرات خود سازمان را در بهبود محتوای این کتاب یاری کرده‌اند به شرح زیر اعلام می‌شود.

اسامی دبیران و هنرآموزان شرکت‌کننده در اعتبارسنجی کتاب فیزیک ۳ با کد ۹۱۲۲۰۹

ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت	ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت
۱	عادلہ ترک عوض زاده	آذربایجان شرقی	۳۱	شراره فخاری	همدان
۲	سیده آریتا صادق موسوی	گیلان	۳۲	سعیده طاهری‌فر	ایلام
۳	ساسان غفوری	کردستان	۳۳	عبدالواحد خالدی	کردستان
۴	علیرضا ظاهری	قزوین	۳۴	اسدالله رفیعی	آذربایجان شرقی
۵	لیلا لطفی	مرکزی	۳۵	رضا عابدی منش	شهر تهران
۶	زهرا عزتی	آذربایجان غربی	۳۶	فرزاد ایدی	ایلام
۷	غفار الفتی	کرمانشاه	۳۷	هدیه منوچهری	شهر تهران
۸	معصومه ضیا بری	سمنان	۳۸	سیمین فتحی	شهرستان‌های تهران
۹	حسن رستم نژاد	خراسان رضوی	۳۹	توحید گنج	اردبیل
۱۰	امید علی خلیل مقدم	چهارمحال و بختیاری	۴۰	خدابخش مقصودی	مرکزی
۱۱	سید جواد شاکری	خراسان شمالی	۴۱	طیبه شفیع	بوشهر
۱۲	محبوبه آیت الهی	یزد	۴۲	جمشید پیری	همدان
۱۳	هایده فرهی	سمنان	۴۳	علی اکبر خلیلی	آذربایجان غربی
۱۴	طوبی صفری همت آبادی	مازندران	۴۴	محمد رضا عباسی	کرمانشاه
۱۵	فاطمه اوصالو	زنجان	۴۵	الهام حیدری	خوزستان
۱۶	مهسا جلیلی	شهرستان‌های تهران	۴۶	ملیحه مذنبی	هرمزگان
۱۷	زهرا واحدی پناه	خراسان جنوبی	۴۷	مهدی مجیری	اصفهان
۱۸	حسین هادوی	یزد	۴۸	محمد رضا فرخ‌نیا	البرز
۱۹	لیلا روحی	شهرستان‌های تهران	۴۹	کریم امیری	هرمزگان
۲۰	عدالت قلی‌پور	فارس	۵۰	فرشته شاهوردی	چهارمحال و بختیاری
۲۱	راحله شفیع سروستانی	فارس	۵۱	خشایار بازیاری	بوشهر
۲۲	وهب محقق	خوزستان	۵۲	جاوید عزیزی	اردبیل
۲۳	ملیحه گریوانی	خراسان شمالی	۵۳	حمید رضا نوری	خراسان جنوبی
۲۴	مجید راسخ	گیلان	۵۴	عمید عقیلی نژاد	گلستان
۲۵	مجید عتیقی	خراسان رضوی	۵۵	رحمان لایق نژاد	کهگیلویه و بویراحمد
۲۶	فاطمه سادات کریمی دیوکلائی	قم	۵۶	محمد رضا شفیع	کرمان
۲۷	پروین یزدی زاده	خوزستان	۵۷	زریر زمانی	کهگیلویه و بویراحمد
۲۸	عبدالله لطفی	قزوین	۵۸	حمیده هزاره مقدم	سیستان و بلوچستان
۲۹	مریم ذاقلی	اصفهان	۵۹	رحیم بخشنده	اردبیل
۳۰	مریم حیدری	البرز			