

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

اللّٰهُمَّ صَلِّ عَلٰی مُحَمَّدٍ وَّآلِ مُحَمَّدٍ وَّعَجِّلْ فَرَجَهُمْ

فیزیک (۳)

رشته علوم تجربی

پایه دوازدهم

دوره دوم متوسطه





وزارت آموزش و پرورش سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

فیزیک (۳) - پایه دوازدهم دوره دوم متوسطه - ۱۱۲۲۴۴	نام کتاب:
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی	پدیدآورنده:
دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری	مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف:
احمد احمدی، روح‌الله خلیلی بروجنی، محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، سید هدایت سجادی، مجید عتیقی، سیروان مردوخی و علیرضا نیکنام (اعضای شورای برنامه‌ریزی و گروه تألیف) - سعید فرمانی (ویراستار ادبی)	شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف:
اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی	مدیریت آماده‌سازی هنری:
احمدرضا امینی (مدیر امور فنی و چاپ) - جواد صفری (مدیر هنری) - محمد مهدی ذبیحی فرد (طراح جلد) - راحله زاهدفتح‌اله (صفحه‌آرا) - فاطمه رئیسیان فیروزآباد (رسام) - سیده فاطمه طباطبایی، سیف‌الله بیگ محمددلیوند، حسین چراغی، سپیده ملک‌ایزدی، ناهید خیام‌باشی (امور آماده‌سازی)	شناسه افزوده آماده‌سازی:
تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)	نشانی سازمان:
تلفن: ۸۸۸۳۱۱۶۱-۹، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹	
وبگاه: www.irtextbook.ir و www.chap.sch.ir	
شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)	ناشر:
تلفن: ۴۴۹۸۵۱۶۱-۵، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۳۷۵۱۵-۱۳۹	
شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»	چاپخانه:
چاپ ششم ۱۴۰۲	سال انتشار و نوبت چاپ:

شابک ۹۷۸-۹۶۴-۰۵-۳۱۳۹-۶

ISBN: 978-964-05-3139-6



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

حرکت بر خط راست

۱

- ۱-۱ شناخت حرکت ۲
- ۲-۱ حرکت با سرعت ثابت ۱۳
- ۳-۱ حرکت با شتاب ثابت ۱۵
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۱ ۲۲



دینامیک

۲۷

- ۱-۲ قوانین حرکت نیوتون ۲۸
- ۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص ۳۳
- ۳-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون ۴۴
- ۴-۲ نیروی گرانشی ۴۶
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ۵۰



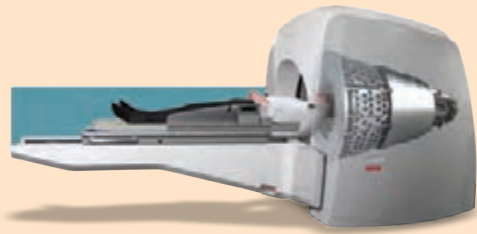
نوسان و امواج

۵۳

- ۱-۳ نوسان دوره‌ای ۵۴
- ۲-۳ حرکت هماهنگ ساده ۵۵
- ۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده ۵۸
- ۴-۳ تشدید ۶۰
- ۵-۳ موج و انواع آن ۶۱
- ۶-۳ مشخصه‌های موج ۶۲
- ۷-۳ بازتاب موج ۷۶
- ۸-۳ شکست موج ۸۱
- پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ۸۹



- ۹۶ ۱-۴ اثر فوتوالکتریک و فوتون
- ۹۹ ۲-۴ طیف خطی
- ۱۰۳ ۳-۴ مدل اتم رادرفورد - بور
- ۱۱۰ ۴-۴ لیزر
- ۱۱۲ ۵-۴ ساختار هسته
- ۱۱۵ ۶-۴ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر
- ۱۲۲ پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۴



- ۱۲۶ جدول دوره‌ای عناصر
- ۱۲۷ جدول مثلثاتی
- ۱۲۸ واژه‌نامه فارسی - انگلیسی
- ۱۳۲ منابع

سخنی با دانش‌آموزان عزیز و همکاران محترم

کتاب فیزیک ۳ که برای پایه دوازدهم دوره نظری و برای رشته علوم تجربی 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 و دینامیک 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 فتر، صوتی و...) و امواج الکترومغناطیسی و نیز برهم‌کنش‌های امواج (شامل بازتاب و شکست) 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 و فوتون، طیف خطی، مدل‌های اتمی و لیزر) و فیزیک هسته‌ای (شامل ساختار هسته و پرتوزایی طبیعی) 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 پی‌موندن 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	انتظارات 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 به‌کارگیری 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 پیش از تدریس توجه فرمایند.

- محتوای حذف‌شده 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 رمزینہ 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.

<http://physics-dept.talif.sch.ir>

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؟

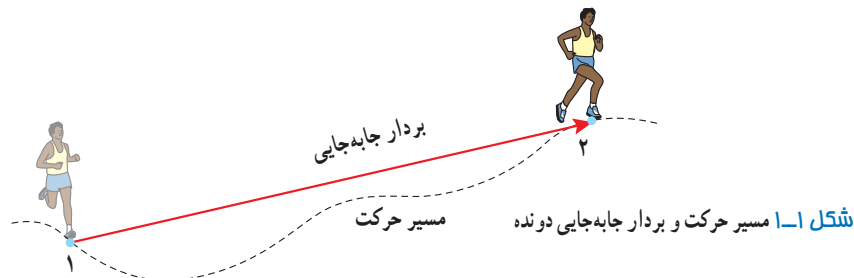
بخش‌ها

- ۱-۱ شناخت حرکت
- ۲-۱ حرکت با سرعت ثابت
- ۳-۱ حرکت با شتاب ثابت

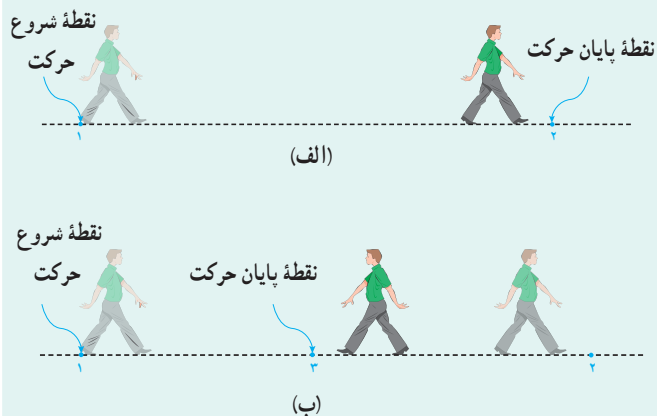
بررسی حرکت اجسام، همواره مورد توجه بشر بوده است. در فیزیک نیز، شناخت و توصیف حرکت اجسام، یکی از مباحث مهمی است که در هر کتاب درسی به آن پرداخته می‌شود و زمینه‌ساز درک بهتر مباحث دیگر فیزیک است. آشنایی با حرکت اجسام، که به آن حرکت‌شناسی یا سینماتیک نیز گفته می‌شود، در بیشتر شاخه‌های مهندسی اهمیت زیادی 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 با سرعت ثابت، خواهیم پرداخت. پس از آن حرکت با شتاب ثابت بر خط راست را 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 دونه‌ای 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 دونه در این تغییر مکان نامیده می‌شود.



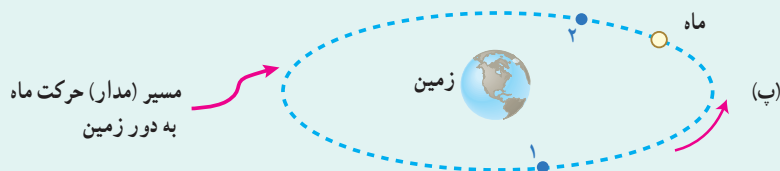
پرسش ۱-۱



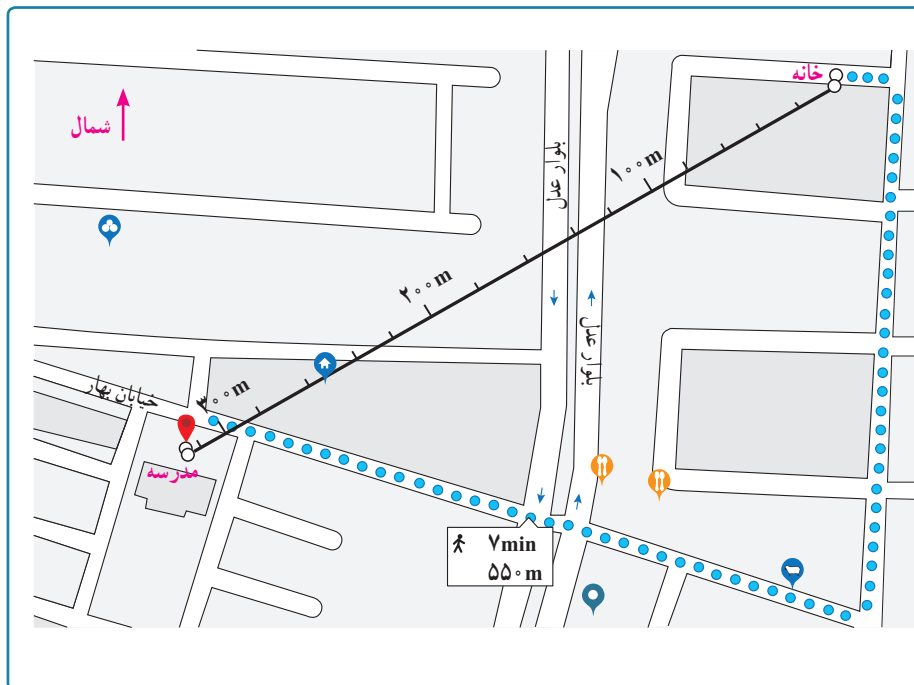
۱- شکل الف شخصی را در حال پیاده‌روی در راستای خط راست و بدون تغییر جهت، از مکان ۱ به مکان ۲ نشان می‌دهد. مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی شخص را روی شکل مشخص و اندازه بردار جابه‌جایی را با مسافت مقایسه کنید.

۲- شخص پس از رسیدن به مکان ۲، برمی‌گردد و روی همان مسیر به مکان ۳ می‌رود (شکل ب). مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی شخص را روی شکل مشخص و اندازه بردار 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.



فعالیت ۱-۱



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

تندی متوسط و سرعت متوسط: اگر متحرکی مانند دونه‌ی 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 نرده‌ای 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 پایین av در نمادهای تندی متوسط و سرعت متوسط از واژه انگلیسی average به معنای متوسط گرفته شده است.
 ۲- آموزش مسائلی که دانش‌آموزان را در محاسبه \vec{d} و \vec{v}_{av} ، درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحه xy یا فضای xyz می‌کند 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 $v_{av} = 550 \text{ m} / 420 \text{ s} = 1/31 \text{ m/s}$ 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 متر و جهت آن به طرف جنوب غربی است. در نتیجه با توجه به رابطه ۱-۱ 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:

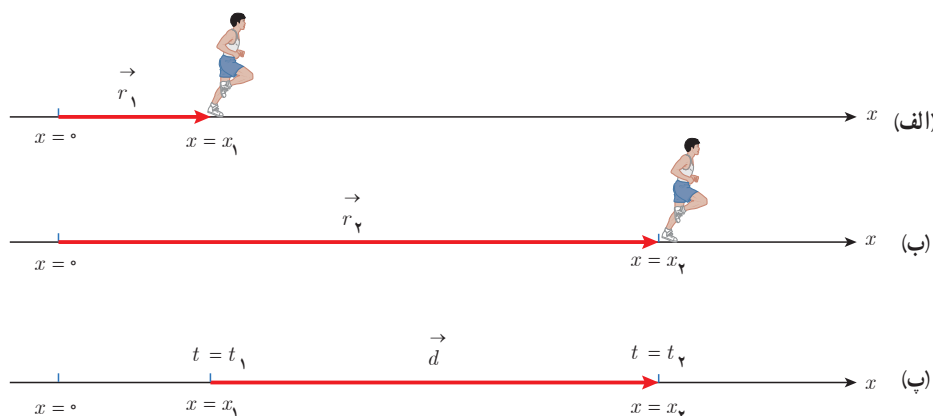
$$\vec{r}_1 = x_1 \vec{i} \quad \text{و} \quad \vec{r}_2 = x_2 \vec{i}$$

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:

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

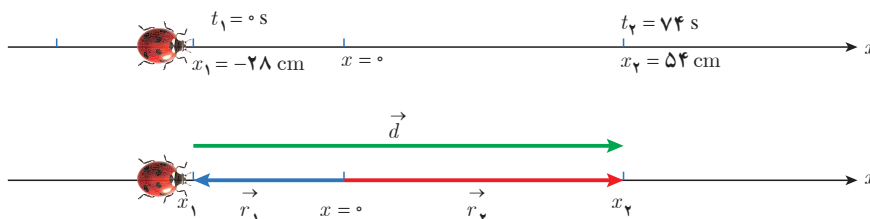


شکل ۲-۱ الف) و ب) بردار مکان دونده در دو لحظه متفاوت و ب) بردار جابه‌جایی آن

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

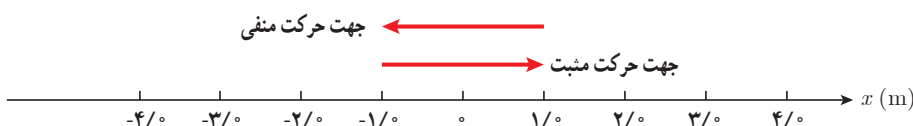
جدول زیر را کامل کنید. فرض کنید هر چهار متحرک در مدت زمان $4/0\text{ s}$ فاصله بین مکان آغازین و مکان پایانی را طی می‌کنند.

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

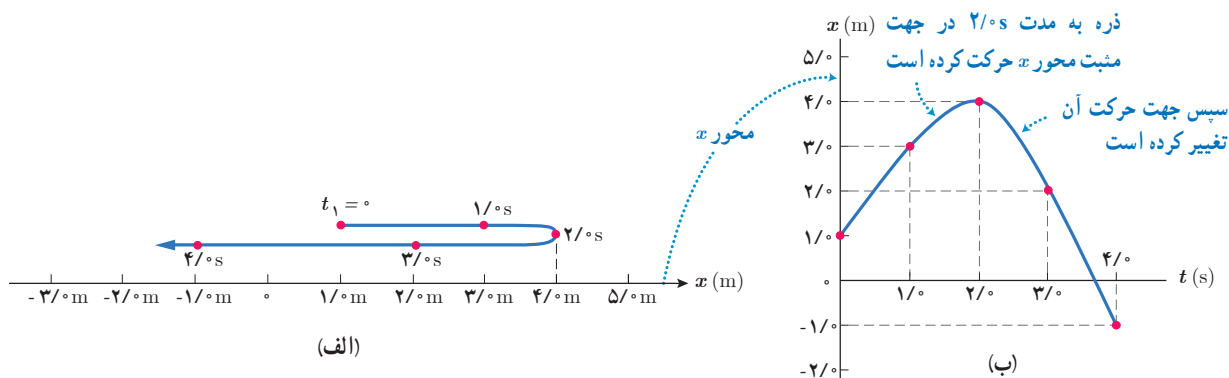
از آنجا که در ادامه این فصل، تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، جابه‌جایی متحرک را به جای بردار \vec{d} به صورت Δx و سرعت متوسط را به جای بردار \vec{v}_{av} به صورت رابطه زیر در حل مسئله‌ها به کار می‌بریم. در این صورت علامت‌های جبری Δx و v_{av} جهت جابه‌جایی و سرعت متوسط را نشان می‌دهند. اگر متحرک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

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

شکل ۱-۳ مکانی که روی یک محور تعیین می‌شود برحسب 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.

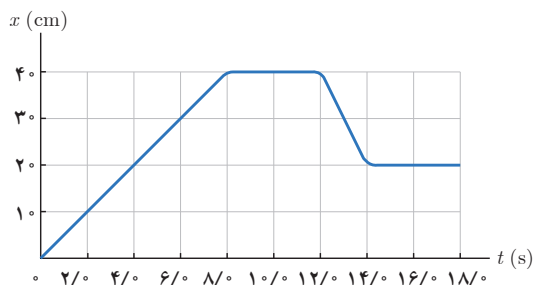


برای توصیف حرکت یک جسم می‌توان از نمودار مکان - زمان، که مکان جسم را در هر لحظه نشان می‌دهد، استفاده کرد. برای رسم این نمودار، زمان را روی محور افقی و مکان را روی محور قائم در نظر می‌گیریم. برای مثال، به حرکت ذره‌ای که در شکل ۱-۴ الف نشان داده شده است، توجه کنید. این ذره در لحظه $t_1 = 0\text{ s}$ در مکان $x_1 = 1\text{ m}$ ، در لحظه $t_2 = 1\text{ s}$ در مکان $x_2 = 3\text{ m}$ قرار دارد و به همین ترتیب در لحظه‌های دیگر در مکان‌های دیگر. اگر بخواهیم نمودار مکان - زمان حرکت این ذره را رسم کنیم، ابتدا به 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 ۱-۳



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 $t = 0\text{ s}$ تا $t = 8\text{ s}$ ، زیرا در این بازه، x همواره در حال افزایش است.

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

پ) در بازه‌های زمانی $t = 8\text{ s}$ تا $t = 12\text{ s}$ و $t = 14\text{ s}$ تا $t = 18\text{ s}$

ت) در لحظه‌های $t = 6\text{ s}$ و $t = 13\text{ s}$

ث) در بازه زمانی $t = 8\text{ s}$ تا $t = 12\text{ s}$

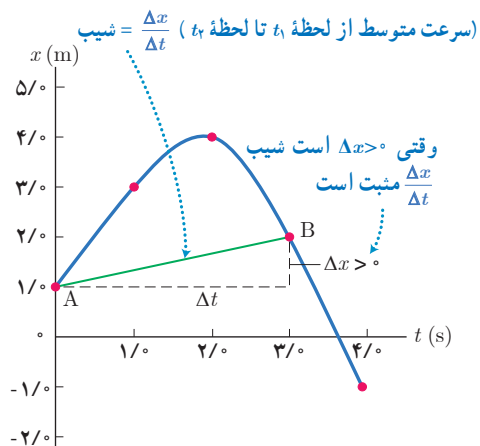
ج)

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

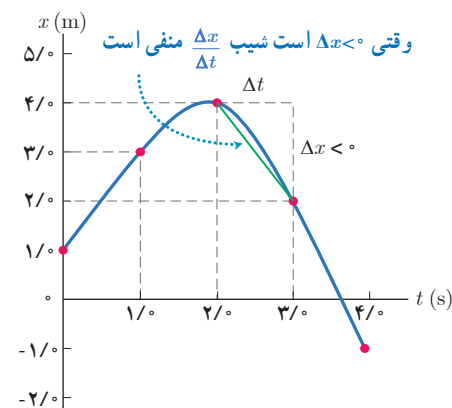
$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2\text{ cm}}{8\text{ s} - 4\text{ s}} = 5\text{ cm/s}$$

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

فصل ۱: حرکت بر خط راست



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

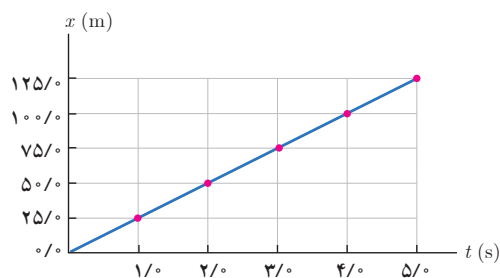
با توجه به نمودار مکان-زمان شکل ۱-۴، سرعت متوسط ذره را در بازه زمانی $t_1 = 2$ s تا $t_2 = 3$ s به دست آورید.

پاسخ: از رابطه ۱-۴ داریم:

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2/0 \text{ m} - 4/0 \text{ m}}{3/0 \text{ s} - 2/0 \text{ s}} = -2/0 \text{ m/s}$$

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 0/s تا 1/s، 1/s تا 2/s، 2/s تا 3/s، 3/s تا 4/s، 4/s تا 5/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:

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

بازه زمانی 0/s تا 1/s

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{100/0 \text{ m} - 50/0 \text{ m}}{4/0 \text{ s} - 2/0 \text{ s}} = 25 \text{ m/s}$$

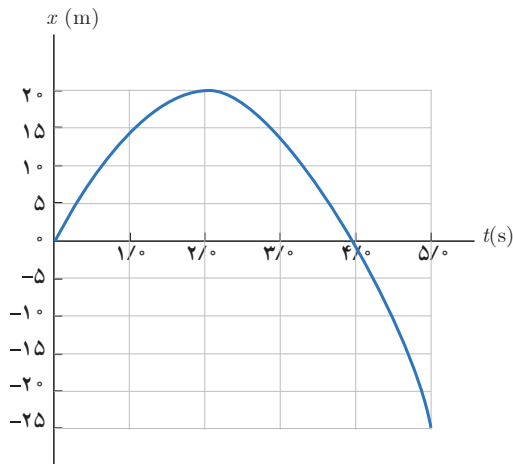
بازه زمانی 2/s تا 4/s

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{125/0 \text{ m} - 25/0 \text{ m}}{5/0 \text{ s} - 1/0 \text{ s}} = 25 \text{ m/s}$$

بازه زمانی 1/s تا 5/s

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

مثال ۱-۶



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

الف) با استفاده از داده‌های روی شکل، سرعت متوسط خودرو را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/s$ تا $2/s$ ، $2/s$ تا $4/s$ ، $4/s$ تا $5/s$ تا $0/s$ 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 خودرو برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با:

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

بازه زمانی $0/s$ تا $2/s$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0\text{ m} - 20\text{ m}}{4/s - 2/s} = 0\text{ m/s}$$

بازه زمانی $2/s$ تا $4/s$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0\text{ m} - 20\text{ m}}{4/s - 2/s} = -10\text{ m/s}$$

بازه زمانی $2/s$ تا $4/s$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-25\text{ m} - 20\text{ m}}{5/s - 2/s} = -15\text{ m/s}$$

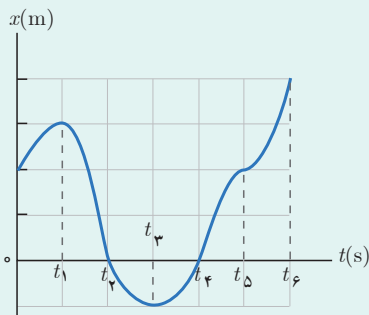
بازه زمانی $2/s$ تا $5/s$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-25\text{ m} - 0\text{ m}}{5/s - 4/s} = -25\text{ m/s}$$

بازه زمانی $4/s$ تا $5/s$

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

پوشی ۱-۳



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

الف) متحرک چند بار از مبدأ مکان عبور می‌کند؟

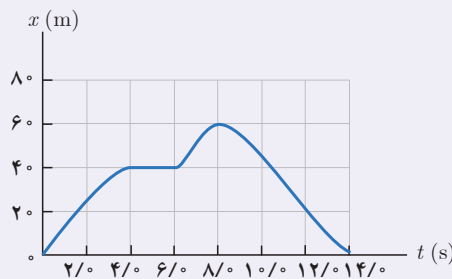
ب) در کدام بازه‌های زمانی متحرک در حال دور شدن از مبدأ است؟

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 لحظه 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 $0/0$ تا $2/0$ s، $4/0$ تا $6/0$ s، $2/0$ تا $4/0$ s، $6/0$ تا $8/0$ s، $8/0$ تا $14/0$ s، $0/0$ تا $14/0$ s حساب کنید.



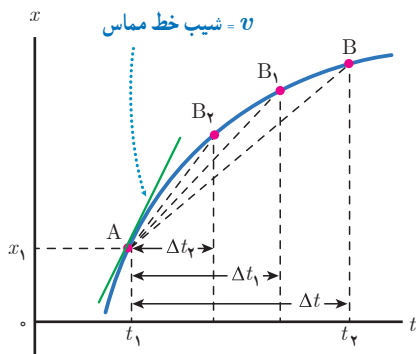
شکل ۱-۶ عقربه تندی سنج، تندی لحظه‌ای خودرو را نشان می‌دهد و هیچ گونه اطلاعی در خصوص جهت حرکت خودرو به ما گزارش نمی‌کند.

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 ۱-۶)، 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.

پوشش ۱-۴

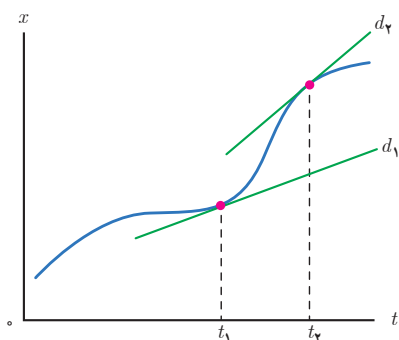
از روی نمودار مکان - زمان توضیح دهید در چه صورت سرعت لحظه‌ای متحرک همواره با سرعت متوسط آن برابر است.



شکل ۱-۷ 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.

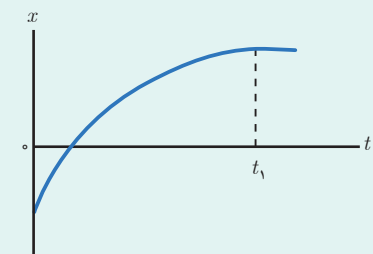
تعیین سرعت لحظه‌ای به کمک نمودار مکان - زمان: پیش از این دیدیم که سرعت متوسط متحرک بین هر دو لحظه دلخواه، برابر شیب خطی است که نمودار مکان - زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱-۷ دیده می‌شود اگر Δt به تدریج کوچک و کوچک‌تر شود، نقطه B به نقطه A نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود؛ به طوری که اگر 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



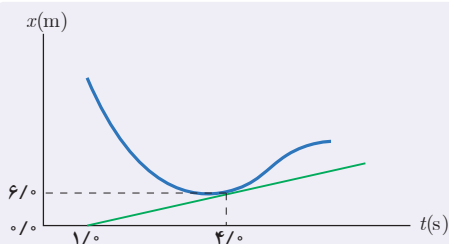
شکل روبه‌رو نمودار مکان-زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. d_1 و d_2 خط‌های مماس بر منحنی را در دو لحظه متفاوت نشان می‌دهند. در کدام لحظه سرعت متحرک بیشتر است؟
پاسخ: با توجه به شکل، شیب خط d_2 بیشتر از شیب خط d_1 است. بنابراین سرعت متحرک در لحظه t_2 بیشتر از سرعت آن در لحظه t_1 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



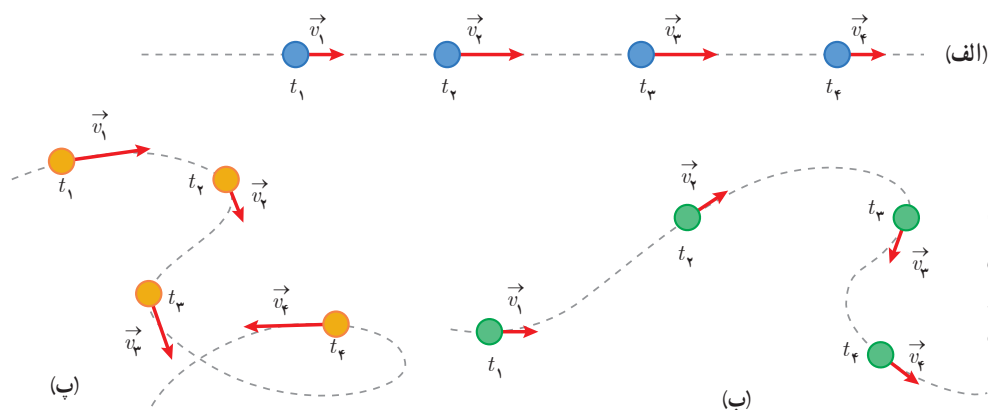
شکل روبه‌رو نمودار مکان-زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت است.
 الف) از لحظه صفر تا لحظه t_1 سرعت متحرک رو به افزایش است یا کاهش؟
 ب) اگر در لحظه t_1 خط مماس بر منحنی موازی محور زمان باشد، سرعت متحرک در این لحظه چقدر است؟

تمرین ۱-۳



شکل روبه‌رو نمودار مکان-زمان متحرکی را نشان می‌دهد. خط مماس بر منحنی در لحظه $t = 4/10$ 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 و (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 می‌شود که در آن v_1 سرعت متحرک در لحظه t_1 و v_2 سرعت متحرک در لحظه t_2 است. همان‌طور که دیده می‌شود شتاب متوسط (a_{av})، کمیتی برداری و هم‌جهت با بردار تغییر سرعت ($\Delta \vec{v}$) است^۱. یکای SI شتاب متوسط، متر بر مربع ثانیه (m/s^2) است.

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

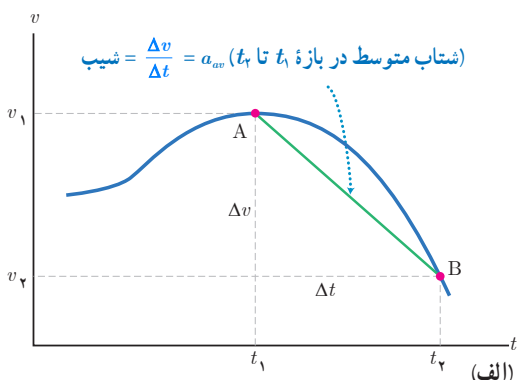
مثال ۸-۱

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

پاسخ: از رابطه ۵-۱، داریم:

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

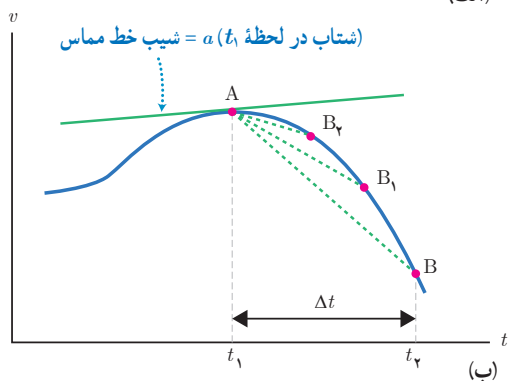
همان‌طور که دیده می‌شود، اندازه شتاب متوسط خودرو 2 m/s^2 و شتاب در جهت محور x است.



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

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

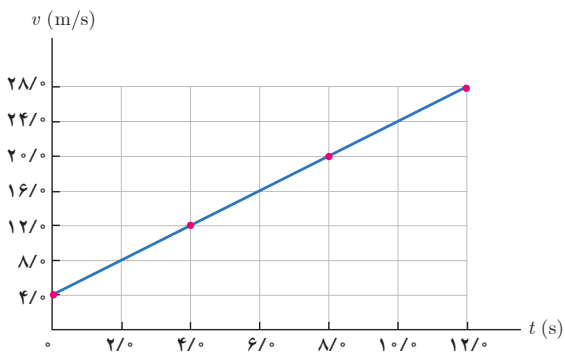
تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت - زمان: در شکل ۹-۱ الف، نمودار سرعت - زمان متحرکی نشان داده شده است که روی خط راست حرکت می‌کند. با توجه به تعریف شتاب متوسط، معلوم می‌شود، که شتاب متوسط بین دو لحظه برابر شیب خطی است که نمودار سرعت - زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۹-۱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



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 دانش‌آموزان را در محاسبه $\vec{a}_{av} = \Delta \vec{v} / \Delta t$ ، درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحه xy یا فضای xyz می‌کند 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 $120/s$ ، مطابق شکل روبه‌رو است. شتاب متوسط موتورسوار و جهت آن را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/s$ تا $20/s$ ، $20/s$ تا $40/s$ ، $40/s$ تا $80/s$ ، $80/s$ تا $120/s$ بیابید.

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

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{80/s - 40/s}{20/s - 0/s} = 2/s^2$$

بازه زمانی $0/s$ تا $20/s$

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{120/s - 40/s}{40/s - 0/s} = 2/s^2$$

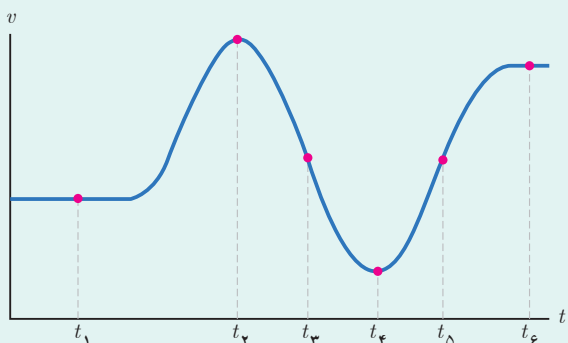
بازه زمانی $20/s$ تا $40/s$

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{200/s - 120/s}{80/s - 40/s} = 2/s^2$$

بازه زمانی $40/s$ تا $120/s$

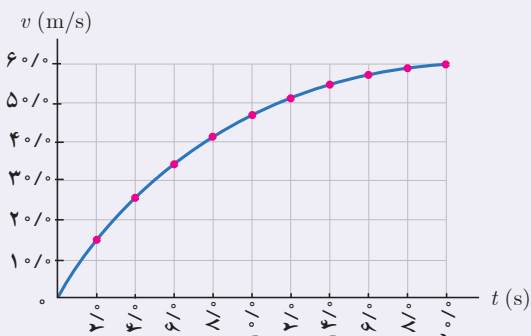
با توجه به علامت مثبت a_{av} در هر سه بازه زمانی، شتاب متوسط در جهت مثبت محور x است. اگر در هر بازه زمانی دلخواه دیگری نیز شتاب متوسط موتورسوار را حساب کنید با توجه به ثابت بودن شیب نمودار سرعت-زمان، اندازه و جهت یکسانی برای شتاب به دست می‌آید.

پرسش ۱-۶



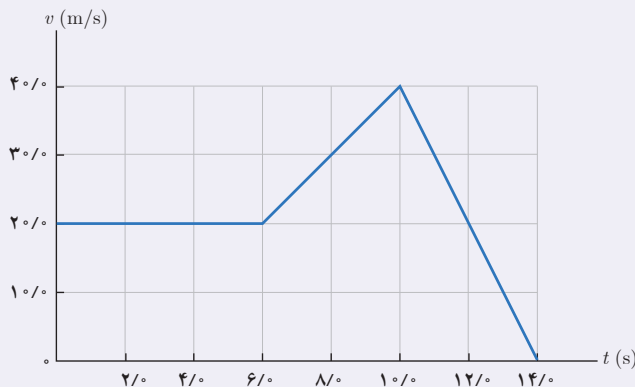
شکل روبه‌رو نمودار سرعت-زمان دوچرخه‌سواری را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. جهت شتاب دوچرخه‌سوار را در هر یک از لحظه‌های t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 و t_6 تعیین کنید.

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 ۵-۱



نمودار سرعت - زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می کند 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 می توان نوشت :

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



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

اگر مطابق شکل ۱-۱ 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 می توان به صورت زیر بازنویسی کرد :

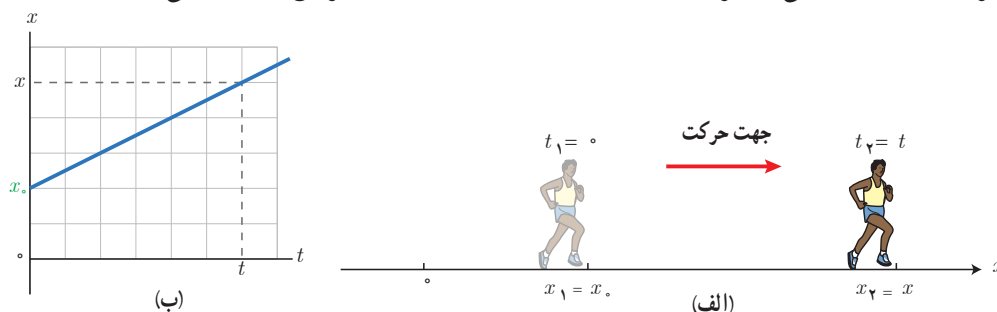
$$x - x_0 = v(t - 0)$$

یا :

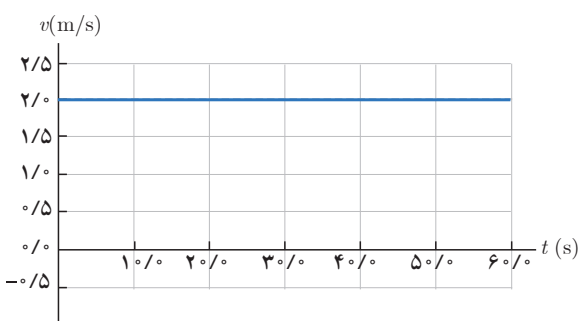
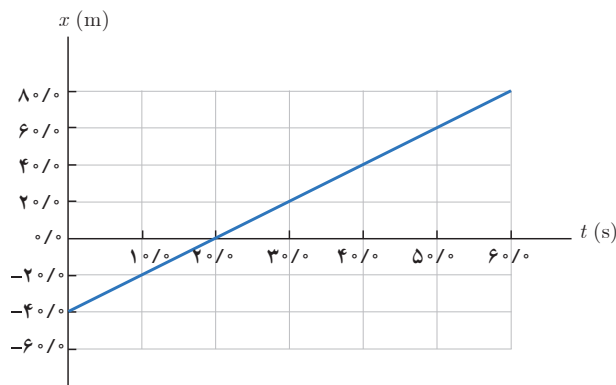
$$x = vt + x_0 \quad (7-1) \quad \text{(معادله مکان - زمان در حرکت با سرعت ثابت)}$$

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

شکل ۱-۱ الف) مکان یک دهنده در دو لحظه متفاوت. ب) نمودار مکان-زمان دهنده‌ای که در جهت محور x با سرعت ثابت می دود.



مثال ۱-۱۰



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

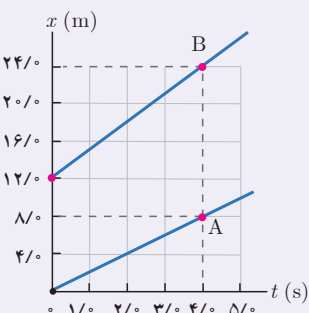
می‌دهد که شخص در جهت محور x حرکت می‌کند. نمودار سرعت - زمان مطابق شکل بالا است.

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 $t = 5$ min = 300 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 ۱-۶



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

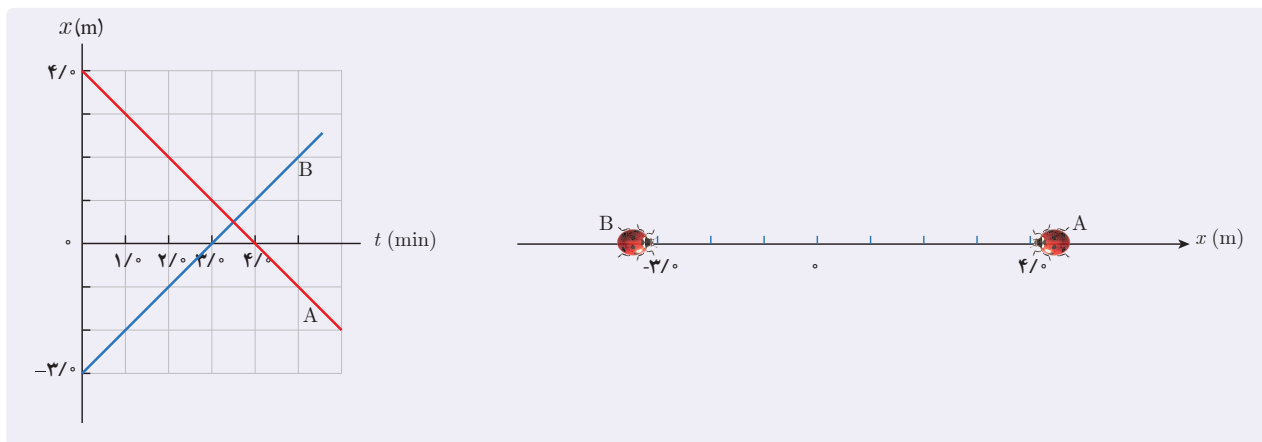
سرعت هر متحرک را پیدا کنید و معادله مکان - زمان آنها را بنویسید.

تمرین ۱-۷

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.

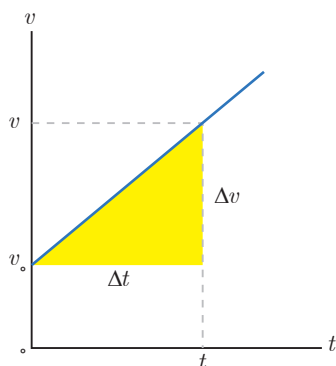
الف) از روی نمودار به‌طور تقریبی تعیین کنید کفش دوزک‌ها در چه لحظه و در چه مکانی به یکدیگر می‌رسند.

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



۳-۱ حرکت با شتاب ثابت

شکل ۱۲-۱ نمودار سرعت - زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد خط راست حرکت می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود سرعت متحرک با زمان به صورت خطی تغییر می‌کند و شیب نمودار سرعت - زمان ثابت است. پیش از این و در مثال ۸-۱ دیدیم در این شرایط، شتاب متوسط زمانی برابر شتاب لحظه‌ای متحرک است، یعنی $a_{av} = a$. 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 سرایشی 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.

شکل ۱۲-۱ نمودار $v-t$ در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن v و a



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

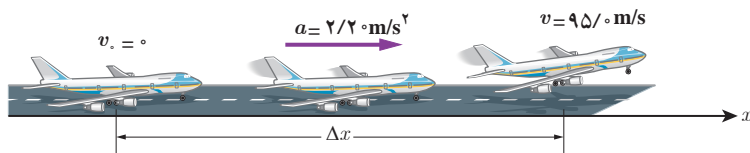
معادله سرعت - زمان در حرکت با شتاب ثابت: اگر مانند نمودار شکل ۱۲-۱ در $t = 0$ سرعت اولیه متحرک v_0 و در لحظه t ، سرعت متحرک برابر v باشد در این صورت معادله ۶-۱ را برای حرکت با شتاب ثابت ($a = a_{av}$) در امتداد خط راست می‌توانیم به صورت زیر بازنویسی کنیم:

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

همان‌طور که دیده می‌شود تغییرات v نسبت به t در معادله ۸-۱ به صورت 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:

$$v_{av} = \frac{v_0 + v}{۲} \quad \text{(معادله سرعت متوسط در حرکت با شتاب ثابت)} \quad (۹-۱)$$

مثال ۱-۱۱



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 ۱-۸ جای‌گذاری کرد. به این ترتیب داریم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow 95 \text{ m/s} = (2/2 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 43/2 \text{ s}$$

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

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

ب)

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

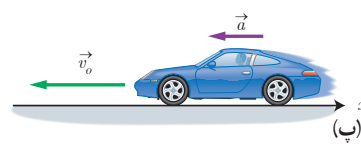
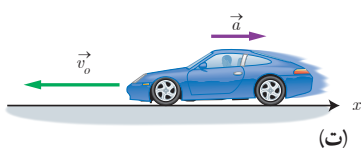
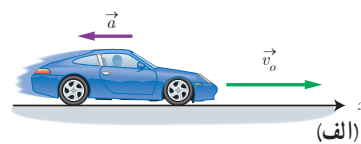
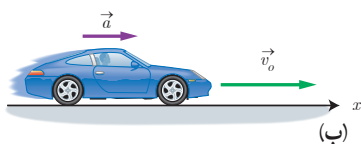
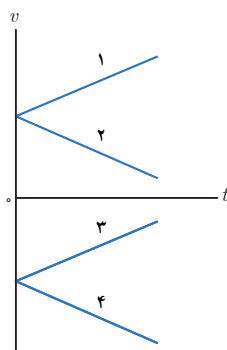
پ) از رابطه ۱-۴ داریم:

تمرین ۱-۸

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 هر یک از خودروها، توسط کدام یک از نمودارهای $v-t$ توصیف می‌شود؟ همچنین توضیح دهید تندی کدام خودرو در حال افزایش (حرکت تندشونده) و تندی کدام خودرو در حال کاهش (حرکت 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:

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

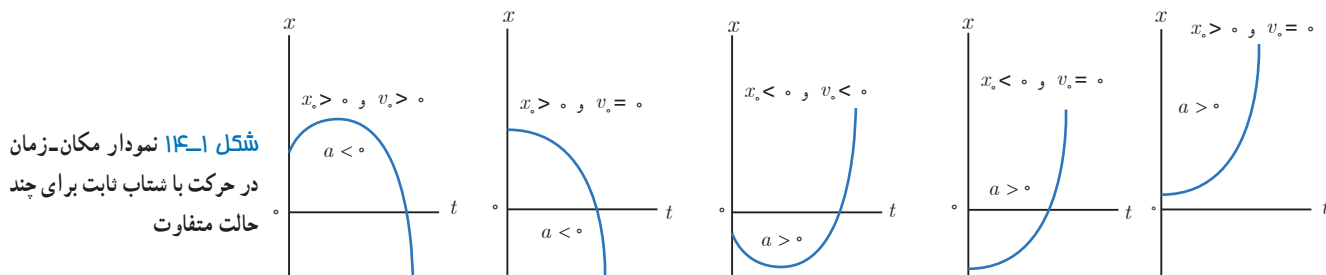
با قرار دادن رابطه ۱-۸ در معادله بالا داریم:

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

با ساده‌سازی این رابطه خواهیم داشت:

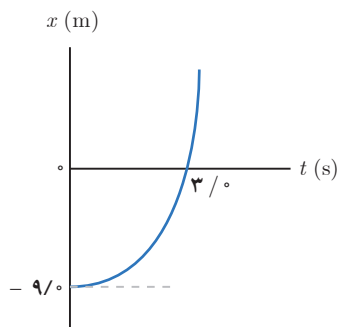
$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \quad (1-10) \quad (\text{معادله مکان - زمان در حرکت با شتاب ثابت})$$

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.



شکل ۱۴-۱ نمودار مکان-زمان در حرکت با شتاب ثابت برای چند حالت متفاوت

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 مساحت 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:

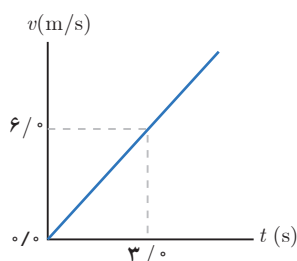
$$x_0 = -9/m, \quad t = 3/s \rightarrow x = 0/m, \quad v_0 = 0/m/s$$

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

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 $(0\text{ s}, 3\text{ s})$ برابر $9\text{ m} - (-9\text{ m}) = 18\text{ m}$ است. $\Delta x = 18\text{ m}$ است.
 ت) سطح بین منحنی سرعت و محور زمان در نمودار سرعت-زمان، برابر $9\text{ m} = (3\text{ s}) \times (6\text{ m/s})$ است که با نتیجه قسمت پ سازگار است.

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{18\text{ m}}{3\text{ s}} = 6\text{ m/s}$$

ث) از رابطه ۱-۴ داریم:

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

تمرین ۹-۱

خودرویی با سرعت 18 km/h در امتداد مسیری مستقیم از چهارراهی می‌گذرد تندی آن با شتاب 1 m/s^2 افزایش می‌یابد. سرعت خودرو پس از 30 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_0 ، سرعت v ، یا شتاب a متحرک استفاده کرد. برای به‌دست آوردن این معادله از رابطه‌های ۱-۴ و ۹-۱ شروع می‌کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام به‌دست آوردن معادله مکان-زمان دیدیم می‌توان نوشت:

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

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

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

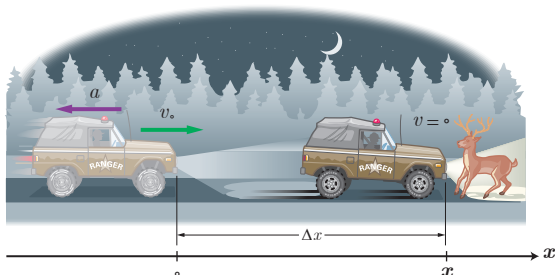
در این صورت داریم:

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \quad (11-1) \quad (\text{معادله سرعت - جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت})$$

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 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 m 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 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:

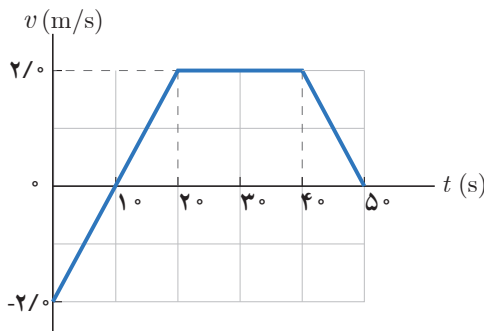
$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) \Rightarrow 0 - (11.1 \text{ m/s})^2 = 2(-3/8 \text{ m/s}^2)(x - 0)$$

در نتیجه $x = 16/2 \text{ m}$ و خودرو در فاصله $5/8 \text{ m}$ از $(22/0 \text{ m} - 16/2 \text{ m})$ 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 ۱-۱۴



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 $t_2 = 2 \text{ s}$ حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب از معادله ۸-۱ داریم:

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

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

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

در لحظه $t_1 = 2 \text{ s}$ داریم:

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

در بازه زمانی 2 s تا 4 s ، حرکت با سرعت ثابت روی خط راست است. به این ترتیب با توجه به معادله $7-1$ ، جابه‌جایی در

این بازه زمانی برابر است با:

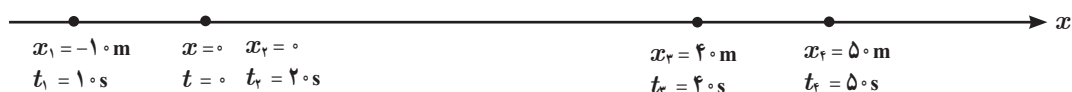
$$\Delta x = v\Delta t \Rightarrow \Delta x = (2/0 \text{ m/s})(4 \text{ s} - 2 \text{ s}) = 4 \text{ m}$$

در نتیجه متحرک در لحظه $t_2 = 4 \text{ s}$ در مکان $x_2 = x_1 + \Delta x = 0 + 4 \text{ m} = 4 \text{ m}$ قرار دارد.

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

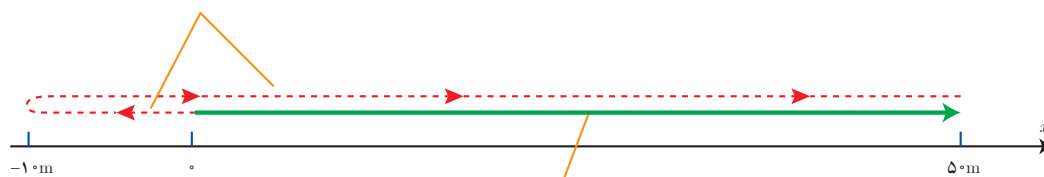
$$\Delta x = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)\Delta t = \left(\frac{2/0 \text{ m/s} + 0}{2}\right)(1 \text{ s}) \Rightarrow \Delta x = 1 \text{ m}$$

در نتیجه متحرک در لحظه $t_3 = 5 \text{ s}$ در مکان $x_3 = x_2 + \Delta x = 4 \text{ m} + 1 \text{ m} = 5 \text{ m}$ قرار دارد.

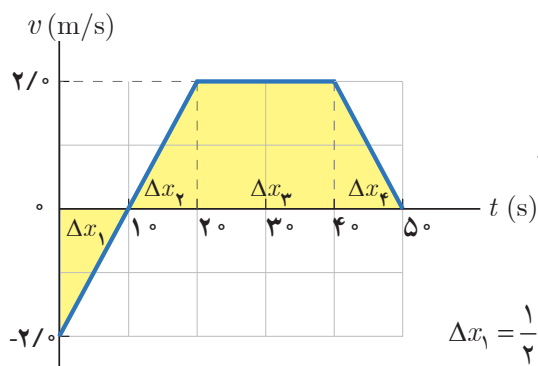


(ث) در شکل زیر جابه‌جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان حرکت نشان داده شده است.

مسافت کل پیموده شده برابر $l = 1 \text{ m} + 1 \text{ m} + 4 \text{ m} = 6 \text{ m}$ است.



برداری جابه‌جایی کل که برابر $\vec{d} = (+5 \text{ m})\hat{i}$ است.



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

$$\Delta x_1 = \frac{1}{2}(-2/0 \text{ m/s})(1 \text{ s}) = -1 \text{ m} \quad \Delta x_2 = \frac{1}{2}(2/0 \text{ m/s})(1 \text{ s}) = 1 \text{ m}$$

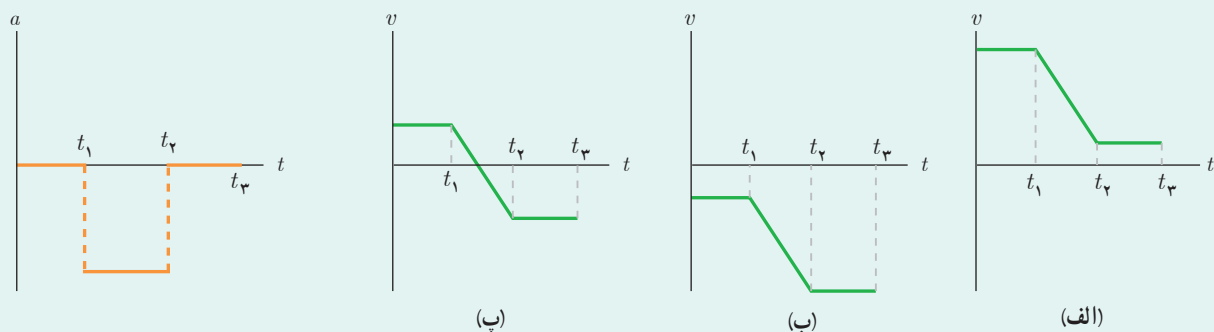
$$\Delta x_3 = (2/0 \text{ m/s})(2 \text{ s}) = 4 \text{ m} \quad \Delta x_4 = \frac{1}{2}(2/0 \text{ m/s})(1 \text{ s}) = 1 \text{ m}$$

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

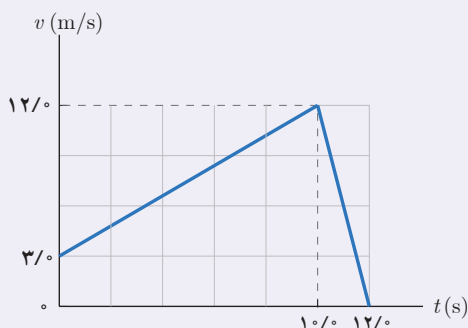
همان‌طور که از نتیجه بالا دیده می‌شود، مساحت سطح بین نمودار سرعت - زمان و محور زمان در کل زمان حرکت، با جابه‌جایی متحرک برابر است.

پرسش ۱-۲

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.

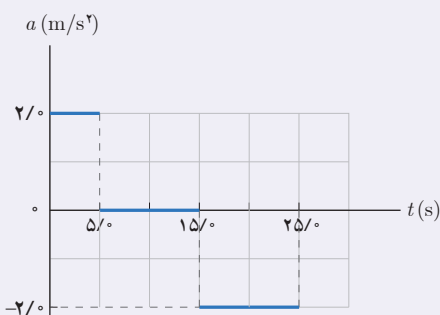


تمرین ۱-۱۰



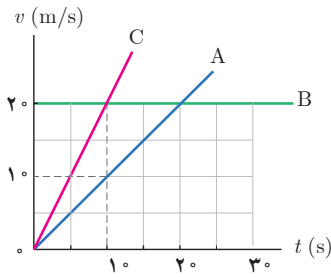
آهویی در مسیری مستقیم در امتداد محور x می‌دود. نمودار سرعت - زمان آهو در بازه زمانی صفر تا $120/s$ مطابق شکل است. در این بازه زمانی الف) مسافت کل پیموده شده توسط آهو را به دست آورید. ب) جابه‌جایی آهو را پیدا کنید. پ) نمودار شتاب - زمان آهو را رسم کنید.

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 $25/s$ ، 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 و مسافت پیموده شده توسط ماشین را پیدا کنید.

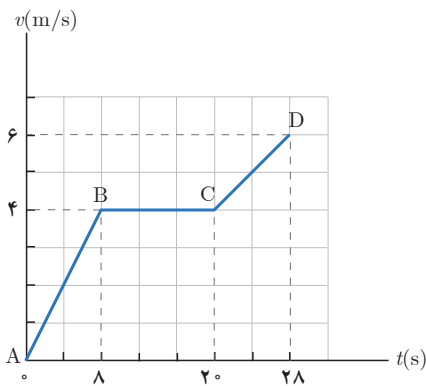
۱-۱ شناخت حرکت



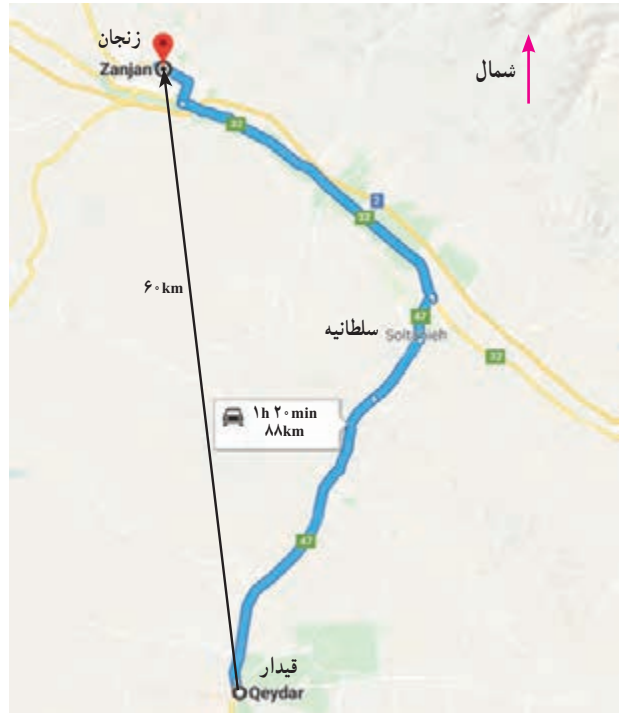
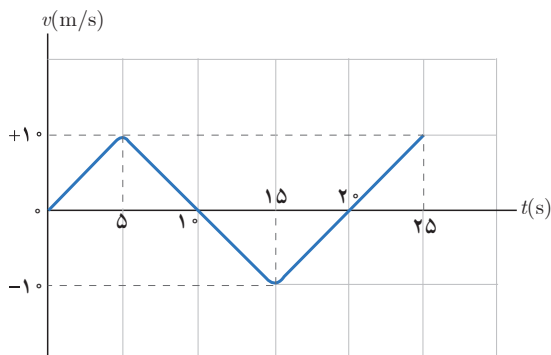
۱. با توجه به داده‌های نقشه شکل زیر،

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

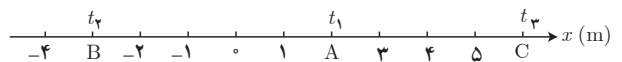
پ) در بازه زمانی ۰s تا ۱۰s جابه‌جایی این سه متحرک را پیدا کنید.
۴. شکل زیر نمودار سرعت - زمان متحرکی را که در امتداد محور x حرکت می‌کند در مدت ۲۸ ثانیه نشان می‌دهد.



- 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. 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.



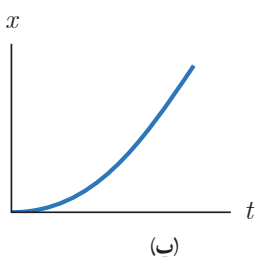
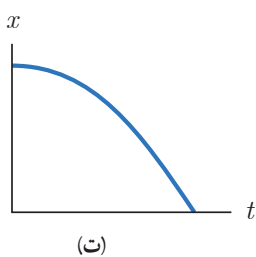
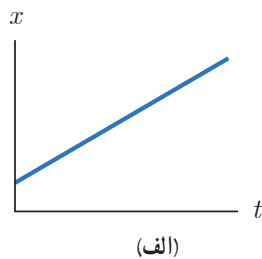
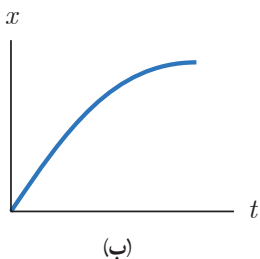
الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور x رسم کنید و برحسب بردار یکه بنویسید.

ب) بردار جابه‌جایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی t_1 تا t_4 ، t_4 تا t_3 و t_1 تا t_3 به دست آورید.

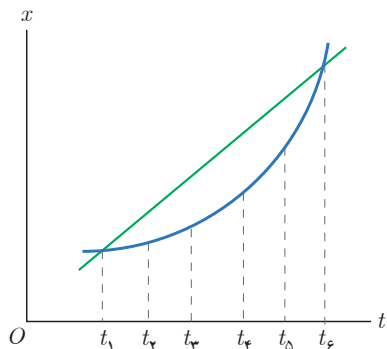
۷. در شکل زیر نمودار سرعت - زمان سه متحرک نشان داده شده است.

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

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

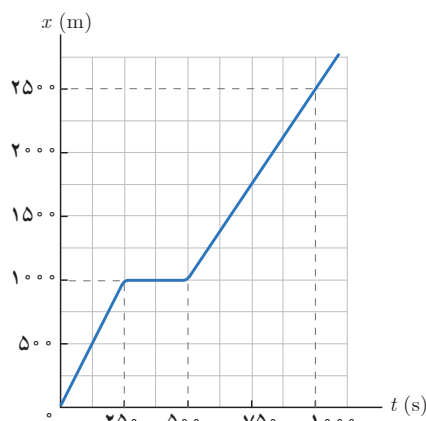


۹. شکل زیر نمودار مکان - زمان دو خودرو را نشان می دهد که در جهت محور x در حرکت اند.



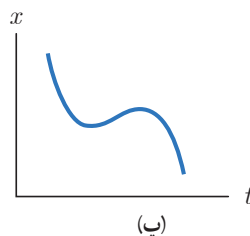
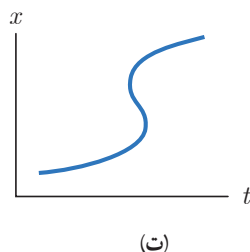
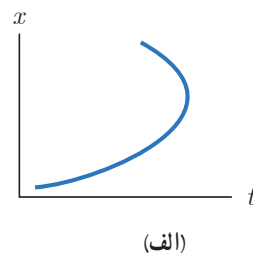
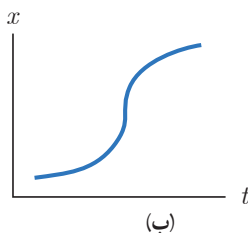
الف) در چه لحظه هایی دو خودرو از کنار یکدیگر می گذرند؟
 ب) در چه لحظه ای تندی دو خودرو تقریباً یکسان است؟
 پ) سرعت متوسط دو خودرو را در بازه زمانی t_1 تا t_6 با هم مقایسه کنید.

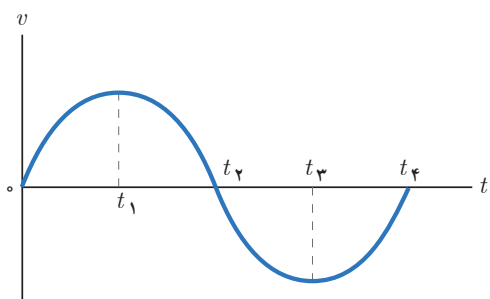
۴. شکل زیر نمودار مکان - زمان حرکت یک دوندۀ دوی نیمه استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می دهد.



الف) در کدام بازه زمانی دونده سریع تر دویده است؟
 ب) در کدام بازه زمانی، دونده ایستاده است؟
 پ) سرعت دونده را در بازه زمانی 0 s تا 250 s حساب کنید.
 ت) سرعت دونده را در بازه زمانی 500 s تا 1000 s حساب کنید.
 ث) سرعت متوسط دونده را در بازه زمانی 0 s تا 1000 s حساب کنید.

۷. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان - زمان شکل زیر می تواند نشان دهنده نمودار $x-t$ یک متحرک باشد.





۲-۱ حرکت با سرعت ثابت

۱۱۴. جسمی با سرعت ثابت بر مسیری مستقیم در حرکت است.

اگر جسم در لحظه $t_1 = 5/0 \text{ s}$ در مکان $x_1 = 6/0 \text{ m}$ و در لحظه

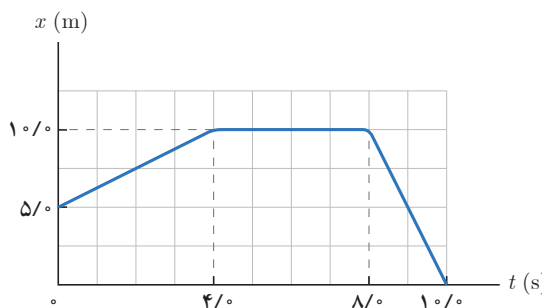
$t_2 = 20/0 \text{ s}$ در مکان $x_2 = 36/0 \text{ m}$ باشد،

الف) معادله مکان - زمان جسم را بنویسید.

ب) نمودار مکان - زمان جسم را رسم کنید.

۱۱۵. 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

$0/0 \text{ s}$ تا $4/0 \text{ s}$ ، $4/0 \text{ s}$ تا $8/0 \text{ s}$ ، $8/0 \text{ s}$ تا $10/0 \text{ s}$ و همچنین در کل

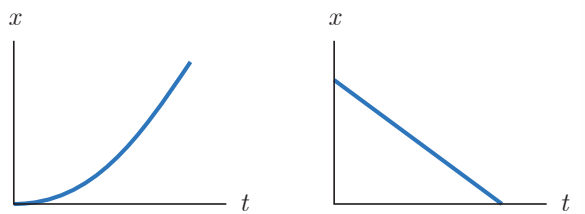
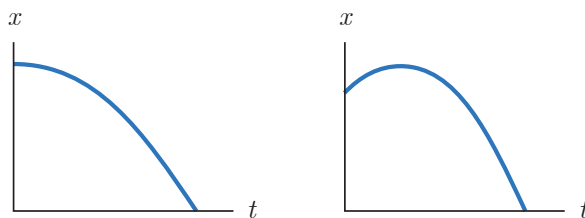
زمان حرکت به دست آورید.

پ) معادله حرکت متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی

$0/0 \text{ s}$ تا $4/0 \text{ s}$ ، $4/0 \text{ s}$ تا $8/0 \text{ s}$ ، و $8/0 \text{ s}$ تا $10/0 \text{ s}$ بنویسید.

ت) نمودار سرعت - زمان متحرک را رسم کنید.

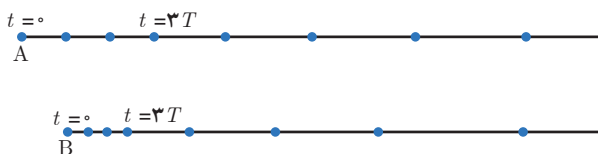
۱-۱. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان - زمان نشان داده شده، حرکت متحرکی را توصیف می‌کند که سرعت اولیه آن در جهت محور x و شتاب آن بر خلاف جهت محور x است.



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

$t=0$ ، $t=T$ ، $t=2T$ ، ... و $t=7T$ نشان می‌دهد. هر دو

خودرو در 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.

۱۱۲. معادله حرکت جسمی در SI به صورت $x = t^3 - 3t^2 + 4$ است.

الف) مکان متحرک را در $t = 2 \text{ s}$ و $t = 0 \text{ s}$ به دست آورید.

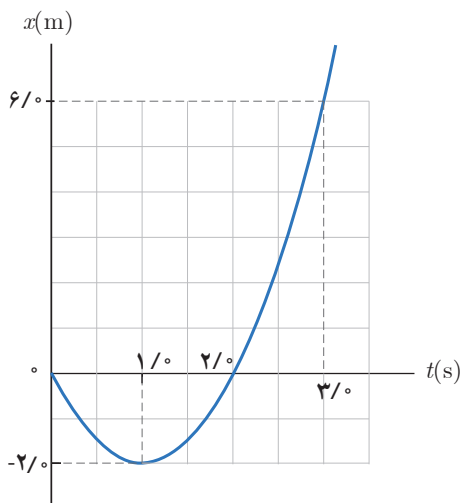
ب) سرعت متوسط جسم را در بازه زمانی صفر تا ۲ ثانیه پیدا کنید.

۱۱۳. 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.

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



الف) سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی صفر تا 30 ثانیه، چند متر بر ثانیه است؟

ب) معادله مکان - زمان متحرک را بنویسید.

پ) سرعت متحرک را در لحظه $t=30$ 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 $x=+10$ m سرعت متحرک 4 m/s+ و در مکان $x=+19$ 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+ می‌رسد؟

۲۱. خودرویی پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب 2 m/s² شروع به حرکت می‌کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت 36 km/h از آن سبقت می‌گیرد.

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

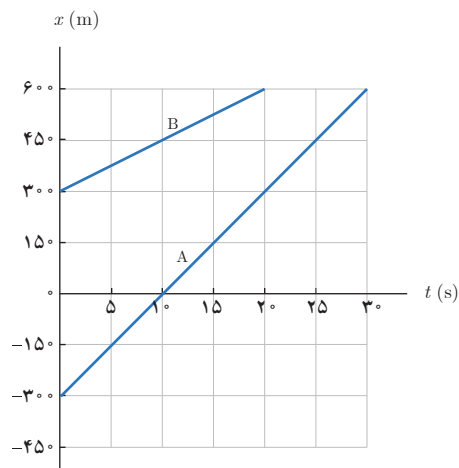
ب) نمودار مکان - زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

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

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

الف) معادله حرکت هر یک از آنها را بنویسید.

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



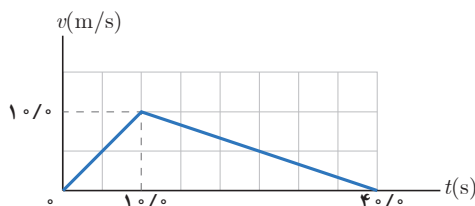
۱۷. دانستن محل قرارگیری یک ماهواره در مأموریت‌های

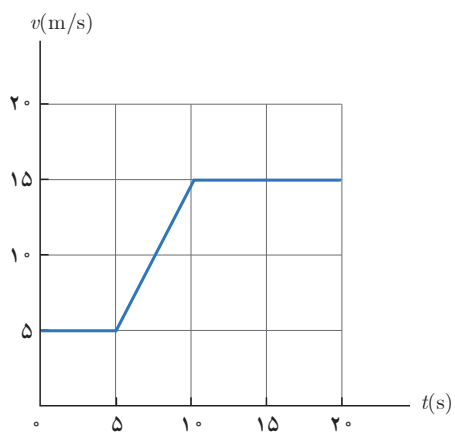
فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش‌بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت‌های کارشناسان فضایی است. بدین منظور تپ‌های الکترومغناطیسی را که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند، به طرف ماهواره مورد نظر می‌فرستند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می‌شود. اگر زمان رفت و برگشت یک تپ $24/0$ ثانیه باشد، 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. سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی

0 تا 5 s چند برابر سرعت متوسط آن در بازه زمانی 25 تا 40 s است؟





۴۴. شکل نشان داده شده نمودار سرعت - زمان خودرویی را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند.
- الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t=3s$ ، $t=8s$ و $t=11s$ و $t=15s$ به دست آورید.
- ب) شتاب متوسط در بازه زمانی $t_1=0s$ تا $t_2=20s$ را به دست آورید.
- پ) در هر یک از بازه‌های زمانی $t_1=5s$ تا $t_2=11s$ و $t_1=11s$ تا $t_2=20s$ خودرو چقدر جابه‌جا شده است؟
- ت) سرعت متوسط خودرو در بازه‌های $t_1=5s$ تا $t_2=11s$ و $t_1=11s$ تا $t_2=20s$ را به دست آورید.



وقتی در یک تصادف، به خودرو از پشت ضربه شدیدی وارد شود، به دلیل تفاوتی که در حرکت تنه و سر راننده رخ می‌دهد، به گردن راننده آسیبی وارد می‌شود که به آن آسیب تازیانه‌ای (whiplash injury) می‌گویند. در نبود ضربه گیر گردن ممکن است این آسیب جدی و جبران‌ناپذیر باشد. به کمک مفاهیم نیرو می‌توان دلیل این آسیب را توضیح داد.

بخش‌ها

- ۱-۲ قوانین حرکت نیوتون
- ۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص
- ۳-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون
- ۴-۲ 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 علت انواع حرکت، پرسشی مطرح نشد، مثلاً در چه صورت حرکت جسم با سرعت ثابت است؟ در چه صورت جسم دارای حرکت با شتاب ثابت روی خط راست است؟ در چه صورت جسم ساکن می‌ماند؟ و...

وقتی جسمی را می‌کشیم یا آن را هل می‌دهیم، به آن نیرو وارد می‌کنیم. نیرو، حاصل برهم‌کنش یا اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است. نیرو کمیتی برداری است که علاوه بر اندازه، جهت نیز دارد (شکل 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 و قوانین حرکت 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.



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 مورد نظر بازیکنان برخورد کند.



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

۱-۲ قوانین حرکت نیوتون

ایزاک نیوتون (۱۶۴۳-۱۷۲۷ م.) 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 برابند نیروهای وارد بر جسم صفر شود، می‌گوییم نیروهای وارد بر جسم متوازن هستند.

۱- F سرواژه انگلیسی Force به معنای نیرو است.

پوشش 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.

پوشش 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.

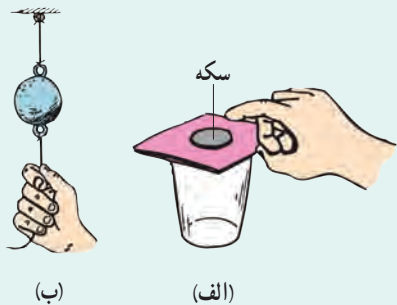
فعالیت ۱-۲

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

۱- Inertia

پرسش ۲-۳

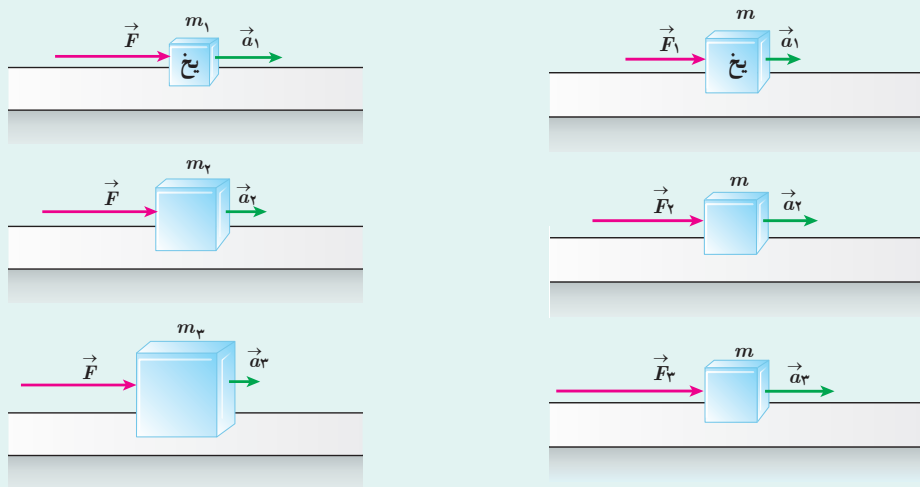


الف) در شکل الف مقوا را به سرعت می‌کشیم، برای سکه چه اتفاقی می‌افتد؟ چرا؟
 ب) در شکل ب، اگر به آرامی نیروی وارد بر گوی سنگین را زیاد کنیم کدام نخ پاره می‌شود؟ اگر ناگهان نخ را بکشیم، کدام نخ پاره می‌شود؟ علت را توضیح دهید.

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

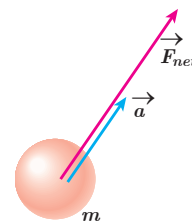
در شکل‌های زیر، قطعه یخ‌ها روی یک سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارند. تفسیر خود را از این شکل‌ها بیان کنید.



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 ۳-۱۱ شتاب جسم (\vec{a}) در جهت نیروی خالص وارد بر آن (\vec{F}_{net}) است.

و یا

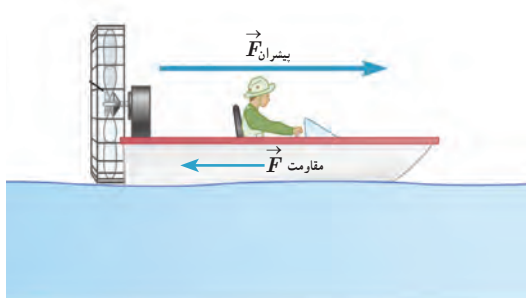
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m}$$

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

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

توجه: در رابطه ۱-۲، ma نیرو نیست. تمام نیروهای وارد بر یک جسم با هم جمع برداری می شوند تا نیروی خالص (F_{net}) وارد بر جسم به دست آید و آن را در سمت چپ معادله قرار می دهند. 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 گونه ای تنظیم می شود که در بازه زمانی معینی، همواره نیروی افقی خالص 800 N به طرف جلو بر قایق وارد می شود. الف) شتاب این قایق چقدر و در چه جهتی است؟ ب) اگر نیروی پیشران در یک لحظه 1300 N باشد، نیروی مقاومت در آن لحظه چقدر است؟

پ) چقدر طول می کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به 15 m/s برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه جا می شود؟

پاسخ: الف) از قانون دوم نیوتون برای پیدا کردن شتاب قایق استفاده می کنیم. قایق در یک مسیر مستقیم حرکت می کند،

می توان رابطه ۱-۲ را برای یک راستا به صورت $a = \frac{F_{net}}{m}$ نوشت:

$$a = \frac{F_{net}}{m} = \frac{800 \text{ N}}{400 \text{ kg}} = 200 \text{ N/kg} = 200 \text{ m/s}^2$$

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 می توانیم بنویسیم:

$$F_{net} = F_{pishran} - F_{maqawmat} \Rightarrow 800 \text{ N} = 1300 \text{ N} - F_{maqawmat}$$

$$F_{maqawmat} = 500 \text{ N}$$

پ) از رابطه سرعت - زمان و سرعت - جابه جایی در حرکت با شتاب ثابت استفاده می کنیم.

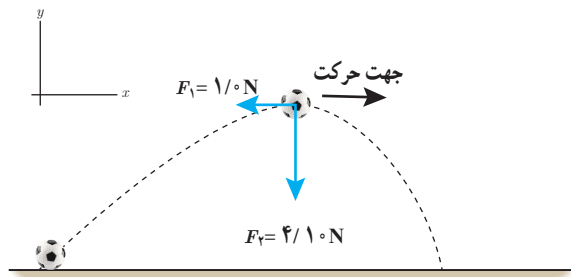
$$v = at + v_0 \Rightarrow 15 \text{ m/s} = (200 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 7/5 \text{ s}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(15 \text{ m/s})^2 - (0 \text{ m/s})^2}{2(200 \text{ m/s}^2)} = 56/3 \text{ m}$$

به این ترتیب با داشتن نیروی خالص می توانیم کمیت های شتاب، سرعت، زمان حرکت، مکان و جابه جایی 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 و وزن توپ است. جهت و بزرگی شتاب توپ در این نقطه را تعیین کنید. از نیروهای دیگر وارد بر توپ صرف‌نظر می‌شود.

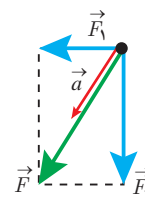
پاسخ: جهت شتاب در جهت نیروی خالص (برایند) است.

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

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

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m} = \frac{(-1/10\text{ N})\vec{i} + (-4/10\text{ N})\vec{j}}{420 \times 10^{-3}\text{ kg}} = (-2/4\text{ N/kg})\vec{i} + (-9/8\text{ N/kg})\vec{j}$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(-2/4\text{ N/kg})^2 + (-9/8\text{ N/kg})^2} = 1\text{ N/kg} = 1\text{ m/s}^2$$



قانون سوم نیوتون: وقتی فتری را می‌کشید، فتر 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:

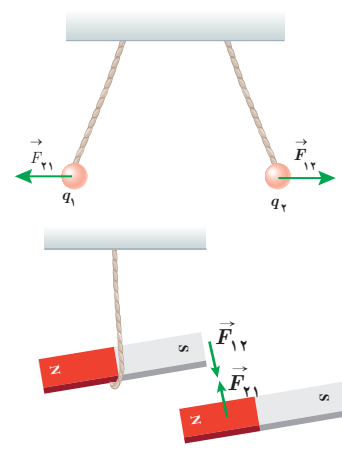
هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم نیز به جسم اول نیرویی هم‌اندازه و هم‌راستا اما در خلاف جهت وارد می‌کند.

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

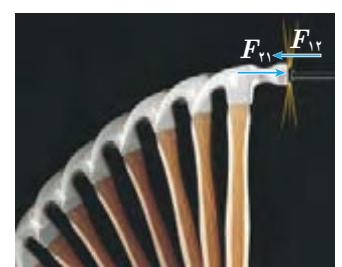
$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} \quad (2-2) \quad \text{(قانون سوم نیوتون)}$$

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 درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

مثال ۲-۳



دو شخص به جرم‌های $۷۵/۰\text{kg}$ و $۵۰/۰\text{kg}$ با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روبه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی $۱۰۰/۰\text{N}$ 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}) با هم‌اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند (\vec{F}_{21}) . با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \Rightarrow F_{21} = F_{12} = 100/0\text{N}$$

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{12}}{m} = \frac{(100/0\text{N}) \vec{i}}{50/0\text{kg}} = (2/00 \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \vec{i} = (2/00 \text{m/s}^2) \vec{i}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{21}}{m} = \frac{-(100/0\text{N}) \vec{i}}{75/0\text{kg}} = -(1/33 \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \vec{i} = -(1/33 \text{m/s}^2) \vec{i}$$

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

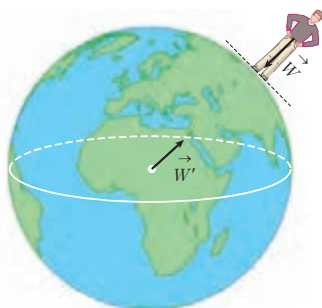
بنا به قانون دوم نیوتون $(\vec{F}_{net} = m \vec{a})$ برای بررسی حرکت یک جسم باید نیروهای وارد بر آن جسم را تعیین کنیم. به همین دلیل لازم است با انواع نیروها آشنا شویم. در این بخش تعدادی از نیروهایی را که با آنها بیشتر سروکار داریم، معرفی می‌کنیم.

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، 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 \vec{g} و وزن را با \vec{W} نشان دهیم، رابطه بالا به شکل زیر درمی‌آید:

$$\vec{W} = m \vec{g} \quad (\text{وزن جسم}) \quad (۳-۲)$$



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

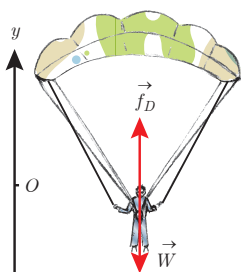
توجه کنید، حتی اگر جسم در حال سقوط آزاد نباشد باز هم نیروی وزن (\vec{W}) بر آن وارد می‌شود. مثلاً بر یک چتر باز قبل از پرش، در حال سقوط و حتی هنگام رسیدن به زمین، نیروی وزن وارد شده و از رابطه ۲-۳ به دست می‌آید.

نیروی مقاومت شماره: 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 شماره (مایع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شماره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن **نیروی مقاومت شماره** می‌گویند و معمولاً آن را با \vec{f}_D نشان می‌دهند. نیروی مقاومت شماره به بزرگی جسم، تندی آن و ... بستگی دارد. هرچه تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شماره 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

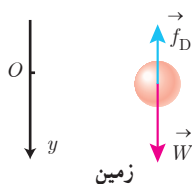
۱- توجه کنید، نیروی مقاومت شماره با نیروی شناوری که از سال دهم با آن آشنا هستید، متفاوت است.

۲- D Drag به معنای پسا (پس کشی) است.

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.

مثال ۲-۵

دو گوی هم‌اندازه را 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؟
پاسخ: 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.

طبق رابطه سرعت - جابه‌جایی می‌توانیم بنویسیم:

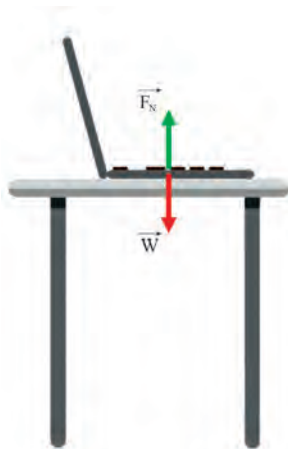
$$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta y \Rightarrow v^2 - 0 = 2ah \Rightarrow v = \sqrt{2ah} \Rightarrow v_2 > v_1$$

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

تمرین ۲-۲

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

نیروی عمودی سطح: مطابق شکل ۲-۷، لپ‌تاپی را روی سطح افقی میزی در نظر بگیرید. 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؟



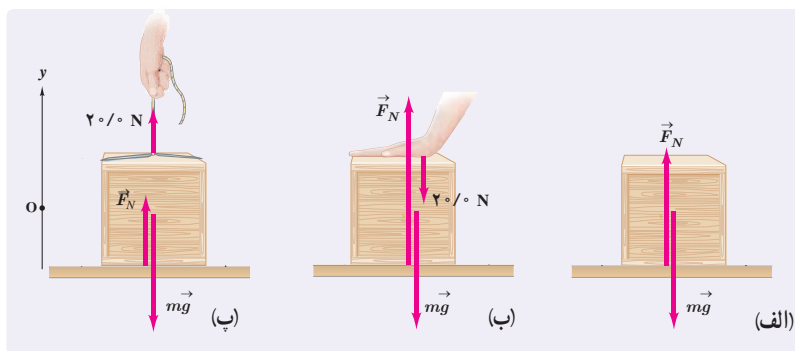
همان‌طور که می‌دانیم نیروهای وارد بر جسم ساکن، متوازن‌اند، بنابراین در این حالت باید یک نیروی هم‌اندازه و در خلاف جهت وزن از طرف میز (سطح) بر لپ‌تاپ وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، **نیروی عمودی سطح** (تکیه‌گاه) می‌گویند و آن را با F_N نشان می‌دهند.

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

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 به‌ظاهر سفت و سخت نیز وقتی جسمی روی آن قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل مربوط به نیروهای بین مولکولی است که در فیزیک ۱ با آن آشنا شدید.

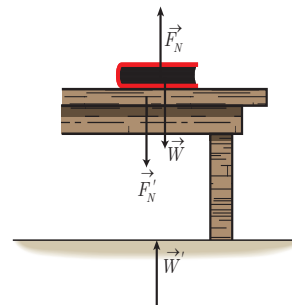
شکل ۲-۷ نیروهای وارد بر لپ‌تاپ متوازن‌اند.

تمرین ۲-۲



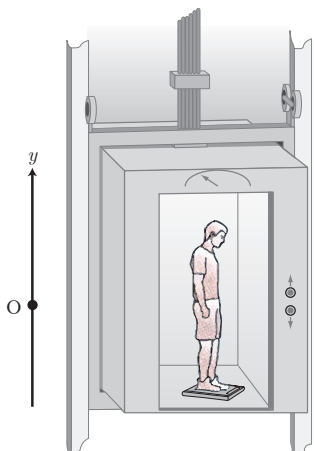
همانند شکل، جعبه‌ای به جرم $4/0 \text{ kg}$ روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده به دست آورید.

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.

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

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

(ت) وقتی کابل آسانسور پاره شود، آسانسور سقوط آزاد می‌کند و اندازه شتاب آن برابر g و شتاب 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 ۲-۶

در مثال ۲-۶، 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

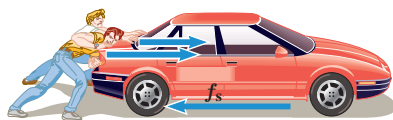
حرکت کند و چه ساکن بماند، با مقاومتی روبه‌رو می‌شویم که به آن **نیروی اصطکاک** گویند.

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 ۲-۹). این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی**

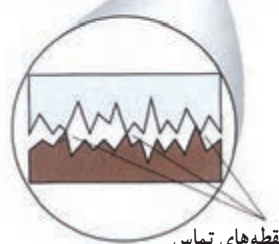
اصطکاک ایستایی است و آن را با f_s نشان می‌دهند. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننده‌اش ترمز کرده و چرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. در این حالت نیز نیرویی در خلاف جهت حرکت از طرف سطح بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی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

نیروی اصطکاک بین دو جسم به جنس سطح دو جسم، و زبری و نرمی آنها و... بستگی دارد؛ مثلاً اصطکاک بین کفش و سطح زمین به جنس 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 ۲-۱۰). حتی سطوحی که بسیار هموار به نظر می‌آیند، ناهمواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارند که سبب اصطکاک می‌شوند.

نیروی اصطکاک عمدتاً به‌عنوان نیروی اتلافی شناخته می‌شود، با وجود این در زندگی روزمره لازم است. نگه‌داشتن 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.

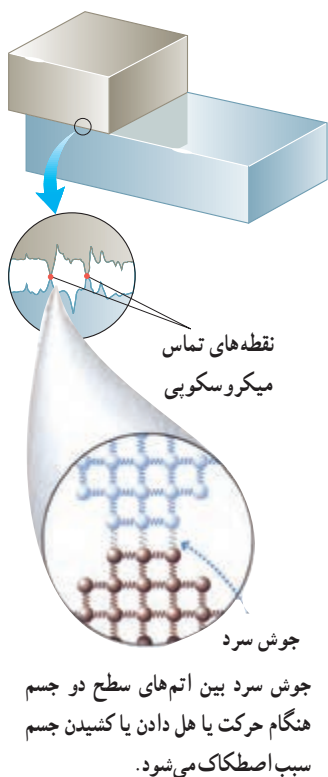


شکل ۲-۹ نیروی اصطکاک ایستایی در خلاف جهت هل دادن به وجود آمده است.



شکل ۲-۱۰

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 بلغزاند، اصطکاک ایستایی ایجاد می‌کنند. اگر نیروی وارد شده برای کشیدن یک سطح روی دیگری به حد کافی بزرگ باشد، نخست جوش‌ها جدا می‌شوند (در لحظه شروع به حرکت) و پس از آن با شروع حرکت، جوش‌ها به‌طور پیوسته مجدداً تشکیل و سپس پاره می‌شوند.

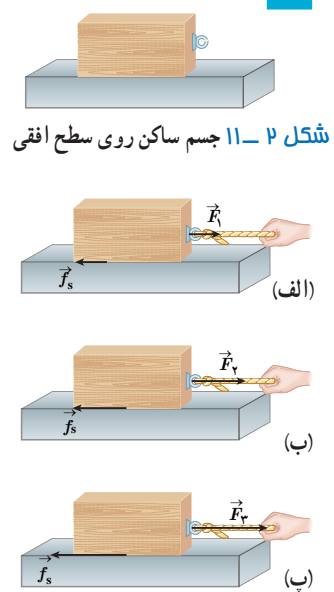
تجزیه و تحلیل

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 به طوری 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.

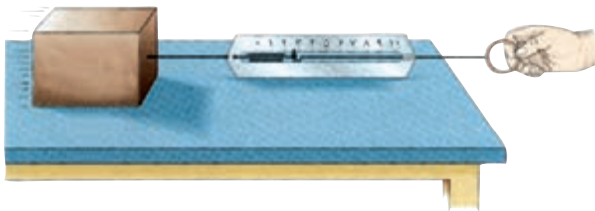
توجه کنید که رابطه ۴-۲ اندازه نیروی اصطکاک ایستایی را فقط در آستانه حرکت نشان می‌دهد. در حالت کلی نیروی اصطکاک ایستایی کوچک‌تر و یا مساوی $f_{s,max}$ است:

$$f_s \leq \mu_s F_N \quad (۵-۲)$$

تمرین ۲-۴

اگر در شکل ۲-۱۲، جرم جسم 4 kg و بزرگی نیروها $F_1 = 4 \text{ N}$ ، $F_2 = 8 \text{ N}$ و $F_3 = 16 \text{ N}$ 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 ۲-۱۳ 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.

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

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 ۲-۱ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱ برخی از ضریب‌های اصطکاک ایستایی و جنبشی

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

فعالیت 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 ۲-۷



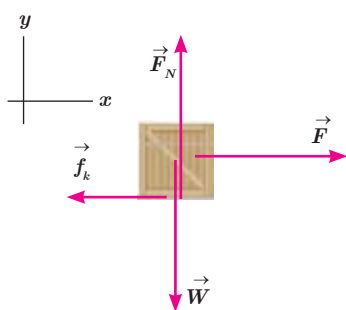
شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبه ۷۵/۰ کیلوگرمی با نیروی 309 N روی سطح افقی است. نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند افقی و جعبه در حال حرکت است. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جعبه $0/400$ باشد،

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 :

$$f_k = \mu_k F_N \Rightarrow f_k = 0.400 \times 735 \text{ N} \Rightarrow f_k = 294 \text{ N}$$

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

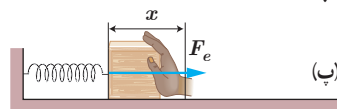
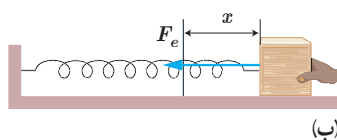
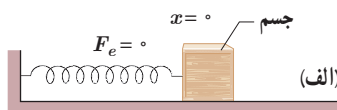
$$F - f_k = ma \Rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} \Rightarrow a = \frac{309 \text{ N} - 294 \text{ N}}{75 \text{ kg}} = 0.2 \text{ m/s}^2$$

تمرین ۲-۵

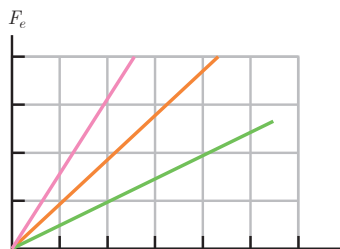
در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین 0.600 و جسم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای به حرکت درآوردن جعبه چقدر است؟



شکل ۲-۱۴ فنرهای به کار رفته در چرخ‌های خودرو



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.

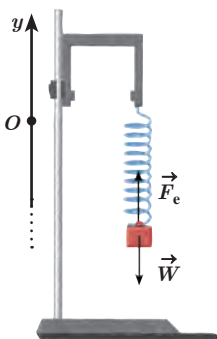
مثال ۸-۲

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.



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

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

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

ب)

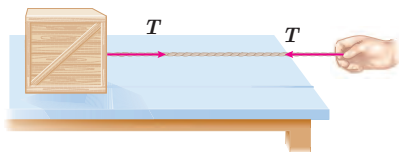
$$kx = mg \Rightarrow (98 \text{ N/m})x = (300 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) \Rightarrow$$

$$x = 0.030 \text{ m} = 3/10 \text{ cm}$$

$$x = L - L_0 \Rightarrow 3/10 \text{ cm} = L - 10/10 \text{ cm} \Rightarrow L = 13/10 \text{ cm}$$

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 محورهای 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...

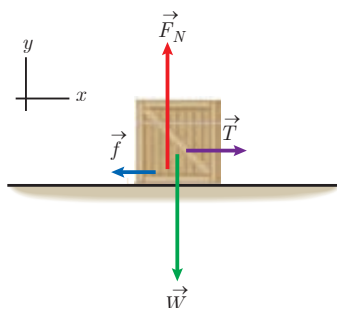
را محاسبه می‌کنیم.

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 $6/s$ پس از حرکت به دست آورید. ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)

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

$$F_N - W = 0 \Rightarrow F_N = W \Rightarrow F_N = mg = (10 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 98 \text{ N}$$

برای اینکه جسم شروع به حرکت کند، باید $T > f_{s,max}$ باشد. پس ابتدا $f_{s,max}$ را از معادله ۲-۴ به دست می‌آوریم:

$$f_{s,max} = \mu_s F_N = (0.30)(98 \text{ N}) = 29.4 \text{ N}$$

با توجه به اینکه $T = 31 \text{ N} > 29.4 \text{ N}$ است، جعبه شروع به حرکت می‌کند.

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

$$f_k = \mu_k F_N = (0.25)(98 \text{ N}) = 24.5 \text{ N}$$

$$T - f_k = ma \Rightarrow 31 \text{ N} - 24.5 \text{ N} = (10 \text{ kg})a \Rightarrow a = 0.65 \text{ m/s}^2$$

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

$$v = at + v_0 \Rightarrow v = (0.65 \text{ m/s}^2)(6 \text{ s}) + (0 \text{ m/s}) \Rightarrow v = 3.9 \text{ m/s}$$

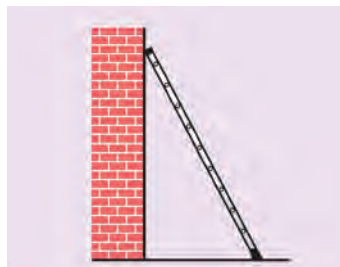
علامت مثبت نشان می‌دهد که سرعت نیز در جهت محور x است.

تمرین ۲-۶



کارگری یک سطل محتوی مصالح به جرم 16 kg را با طناب سبکی به طرف بالا می‌کشد. اگر شتاب رو به بالای سطل $1/2 \text{ m/s}^2$ باشد، نیروی کشش طناب چقدر است؟ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)

مثال ۲-۱۰

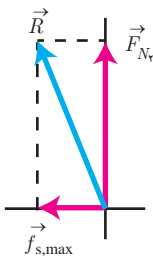
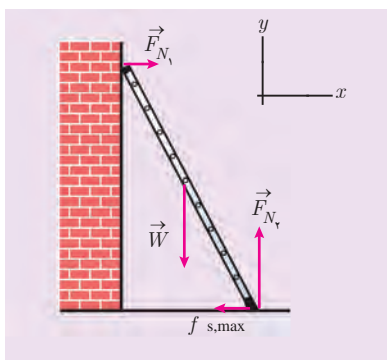


در شکل روبه‌رو نردبانی به جرم 20 kg به دیوار قائم بدون اصطکاک تکیه داده شده است. ضریب اصطکاک ایستایی بین زمین و پای نردبان 0.46 است. در آستانه سُرخوردن نردبان، الف) سطح زمین به نردبان چه نیرویی وارد می‌کند؟ ب) چه نیرویی از دیوار به نردبان وارد می‌شود؟

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

نیروی عمودی سطح دیوار (F_N) ، نیروی وزن (\vec{W}) ، نیروی عمودی سطح زمین (F_{N_y})

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.

$$F_{N_y} - W = 0 \Rightarrow F_{N_y} = W = mg = (20 / \text{kg})(9 / 80 \text{ N/kg}) = 196 \text{ N}$$

$$f_{s,\text{max}} = \mu_s F_{N_y} = (0 / 460) \times (196 \text{ N}) = 90 / 2 \text{ N}$$

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

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

که بزرگی آن برابر است با

$$R = \sqrt{F_{N_y}^2 + f_{s,\text{max}}^2} = \sqrt{(196 \text{ N})^2 + (90 / 2 \text{ N})^2} = 216 \text{ N}$$

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

$$F_{N_x} - f_{s,\text{max}} = 0 \Rightarrow F_{N_x} = f_{s,\text{max}} = 90 / 2 \text{ N}$$

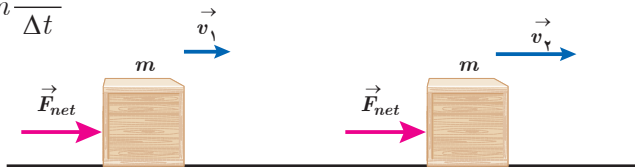
در نبود نیروی اصطکاک بین نردبان و دیوار، نیروی F_{N_x} همان نیروی وارد از دیوار به نردبان است.

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 (v) قرار دهیم.

$$\vec{F}_{\text{net}} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$$

حاصل ضرب جرم جسم (m) در سرعت آن (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 10g با سرعت $\vec{v} = (50\text{m/s})\vec{i}$ در حال حرکت است. الف) تکانه گلوله را تعیین کنید. ب) انرژی جنبشی گلوله را به دست آورید.

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

$$\begin{aligned} \vec{p} &= m\vec{v} = (10 \times 10^{-3}\text{kg})(50\text{m/s})\vec{i} \\ &= (0.5\text{kg}\cdot\text{m/s})\vec{i} \Rightarrow p = 0.5\text{kg}\cdot\text{m/s} \end{aligned}$$

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:

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{(0.5\text{kg}\cdot\text{m/s})^2}{(2 \times 10^{-3}\text{kg})} = 0.125\text{J}$$

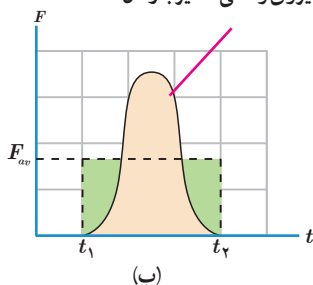
در شرایط واقعی نیروی وارد بر یک جسم به ندرت ثابت است. اگر نیرو ثابت نباشد، معادله‌های داده شده را فقط برای بازه‌های زمانی‌ای می‌توان به کار برد که بسیار کوچک باشد و بتوان نیرو را در این بازه‌ها تقریباً ثابت در نظر گرفت. برای بازه‌های زمانی بزرگ به جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصله زمانی مورد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

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

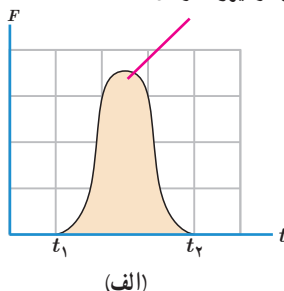
این نتیجه به کاربردهای جالبی در توجیه و بررسی پدیده‌های فیزیکی می‌انجامد.

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.

$$v_1 = +54 \text{ km/h} = +15 \text{ m/s} \quad \text{و} \quad v_2 = -9 \text{ km/h} = -2.5 \text{ m/s} \quad \begin{array}{c} \text{---} \\ | \\ \text{O} \end{array} \text{---} \rightarrow x$$

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

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

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

ب) نیروی متوسط وارد بر اتومبیل با استفاده از رابطه ۸-۲ 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 نیروی گرانشی

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 نیرویی که سبب چرخش ماه به دور زمین



شکل ۲-۲۰ اگر بر ماه نیرویی وارد نشود ماه باید به طور مستقیم حرکت کند نه به صورت دایره‌ای

می‌شود چیست (شکل ۲-۲۰)؟ زمین به همراه هفت سیاره دیگر نیز به دور خورشید می‌چرخند؛ منشأ نیروی 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 دیگر را به خود جذب می‌کند و این الهام‌بخش او برای قانون گرانش عمومی بوده است که بیان می‌دارد:

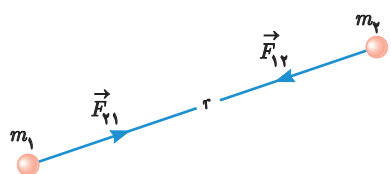
نیروی گرانشی میان دو ذره^۱ با حاصل ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصله آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.

اگر مطابق شکل ۲-۲۱، 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:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (\text{اندازه نیروی گرانشی بین دو ذره}) \quad (2-12)$$

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 ۲-۲۱ 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 ۲-۱۳

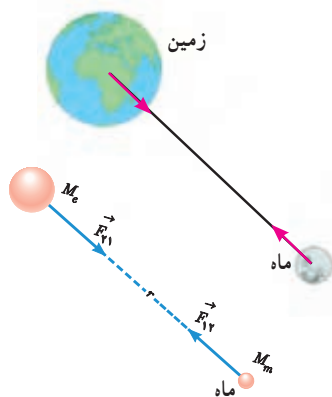
جرم زمین و ماه به ترتیب حدود $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ و $7.36 \times 10^{22} \text{ kg}$ و فاصله متوسط آنها از یکدیگر حدود $3.84 \times 10^8 \text{ m}$ است. نیروی گرانشی را که زمین و ماه به یکدیگر وارد می‌کنند پیدا کنید.

پاسخ: فاصله دو کره در این مثال خیلی بزرگ‌تر از قطر کره‌هاست. بنابراین می‌توان کره‌ها را ذره فرض کرد.

به کمک رابطه ۲-۱۲، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F_{12} = F_{21} = G \frac{M_e M_m}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2 / \text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(7.36 \times 10^{22} \text{ kg})}{(3.84 \times 10^8 \text{ m})^2} = 1.99 \times 10^{20} \text{ N}$$

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 ۲-۱۴

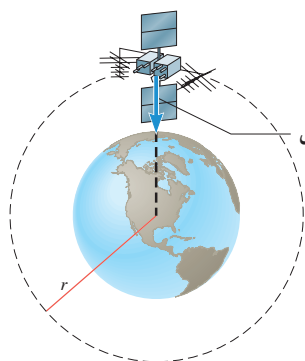
دو کره همگن به جرم‌های 800 kg و 1200 kg را در نظر بگیرید که فاصله مرکز آنها از یکدیگر 100 m است. نیروی گرانشی را که این دو کره بر یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه کنید.

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 ۲-۱۲، نیروی گرانشی را که دو کره به یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(800 \text{ kg})(1200 \text{ kg})}{(100 \text{ m})^2} = 6.40 \times 10^{-7} \text{ N}$$

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

مثال ۲-۱۵



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:

الف) نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین چقدر است؟

ب) نمودار نیروی گرانشی وارد بر ماهواره را بر حسب فاصله آن از مرکز زمین رسم کنید.

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

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 ۲-۱۲، نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه می‌کنیم.

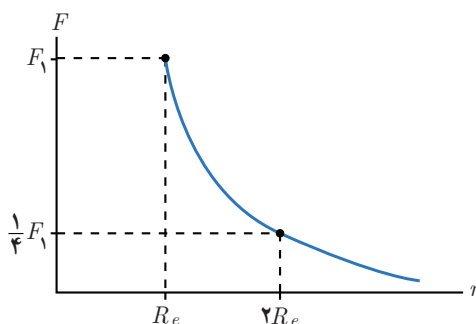
الف)

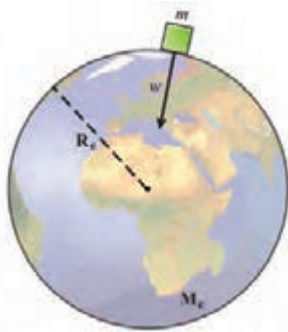
$$r = R_e + h = 6400 \text{ km} + 2600 \text{ km} = 9000 \text{ km} = 9.000 \times 10^6 \text{ m}$$

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

ب) بیشترین نیروی گرانشی بر ماهواره در سطح زمین به آن وارد می‌شود. هر چه فاصله ماهواره بیشتر شود، نیروی گرانشی با

وارون مربع فاصله کاهش می‌یابد. بنابراین نمودار آن به شکل زیر خواهد بود.





شکل ۲-۲۲ وزن نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند.

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 ۲-۲۲). اگر جرم جسم را با m ، جرم زمین را با M_e و شعاع زمین را با R_e نمایش دهیم، وزن جسم در سطح زمین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = G \frac{M_e m}{R_e^2} \quad \text{(وزن جسم در سطح زمین)} \quad (۱۳-۲)$$

تمرین ۸-۲

نشان دهید که شتاب گرانشی در سطح زمین از رابطه $g = G \frac{M_e}{R_e^2}$ به دست می‌آید.

مثال ۱۶-۲

ماهواره‌ای مخابراتی در ارتفاع ۳۵۶۰۰ کیلومتری سطح زمین به دور زمین می‌چرخد. شتاب گرانشی در این ارتفاع چقدر است؟ ($M_e = ۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} \text{ kg}$ و $R_e = ۶۴۰۰ \text{ km}$)

پاسخ: شتاب گرانشی در فاصله r از مرکز زمین از رابطه $g = G \frac{M_e}{r^2}$ محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن $r = R_e + h$ می‌توانیم بنویسیم:

$$g = (۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱} \text{ N.m}^2 / \text{kg}^2) \frac{۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴} \text{ kg}}{(۶۴۰۰ \times ۱۰^۳ \text{ m} + ۳۵۶۰۰ \times ۱۰^۳ \text{ m})^2} = ۰/۲۲۶ \text{ m/s}^2$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار g در این فاصله بسیار ناچیز است.

تمرین ۹-۲

تلسکوپ فضایی هابل در ارتفاع تقریبی ۶۰۰ کیلومتری از سطح زمین به دور زمین می‌چرخد.

(الف) شتاب گرانشی در این فاصله چقدر است؟

(ب) وزن این تلسکوپ در این ارتفاع چند برابر وزن آن روی زمین است؟



۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنه $4/0 \text{ kg}$ را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر $14/0 \text{ cm}$ می‌شود، و وقتی وزنه $5/0 \text{ kg}$ را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر $15/0 \text{ cm}$ 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 $72/0 \text{ km/h}$ در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت $2/0 \text{ m}$ 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 در نظر بگیرید.

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. در شکل صفحه بعد، نیروی F_1 به بزرگی $2/0 \text{ N}$ بر جعبه وارد

شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت

بزرگی نیروی قائم \vec{F}_2 که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر

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 جدانشدن از درخت نشان دهید. (ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. دانش‌آموزی به جرم $5/0 \text{ kg}$ روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ ($g=9/80 \text{ N/kg}$)

(الف) آسانسور ساکن است.

(ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.

(پ) آسانسور با شتاب $1/2 \text{ m/s}^2$ به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.

(ت) آسانسور با شتاب $1/2 \text{ m/s}^2$ به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.

۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 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 $0/20$ باشد،

شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

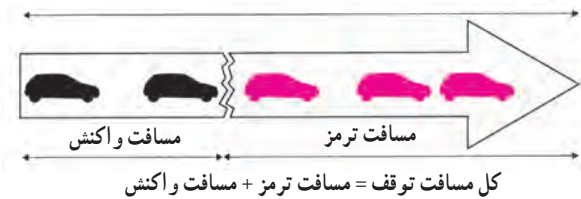
الف) آسانسور ساکن است.

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.

۱۱۱. برای یک راننده دانستن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد کل مسافت توقف، دو قسمت دارد؛ مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظه دیدن مانع تا ترمز گرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).



الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.

ب) زمان واکنش راننده‌ای 0.6 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18 m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

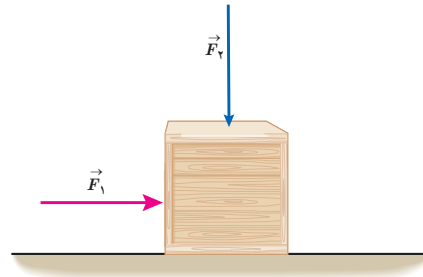
پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 0.5 s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.

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

۱۱۲. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 220 N و 380 N است.



شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه

ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه

پ) اندازه بیشینه نیروی اصطکاک ایستایی

ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۱۱۳. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن 5 kg است، شتاب 2 m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیرویی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.

ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک 0.2 به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.

پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.

ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۱۱۴. قطعه چوبی را با سرعت افقی 1 m/s روی سطحی افقی پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.2 است.

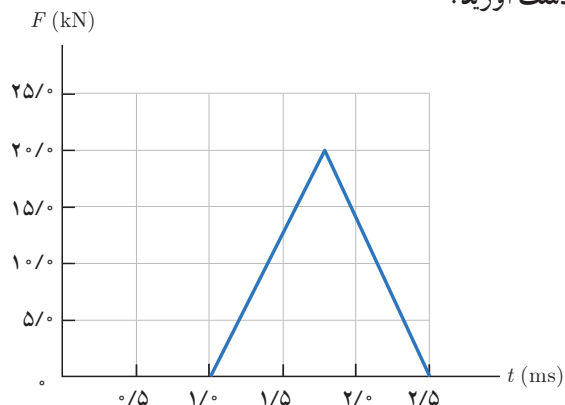
الف) چوب پس از پیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟

ب) اگر از یک قطعه چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت پرتاب شود، مسافت پیموده شده آن چند برابر می‌شود؟

۱۱۵. وزنه‌ای به جرم 2 kg را به انتهای فنری به طول 12 cm که

ثابت آن 20 N/cm است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های الف تا ت محاسبه کنید.

۱۷. شکل زیر، منحنی نیروی خالص بر حسب 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 نیروی گرانشی

۱۸. دو جسم در فاصله $2 \times 10^8 \text{ m}$ از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک 10^{-8} N جذب می‌کنند. اگر جرم یکی از اجسام $5 \times 10^4 \text{ kg}$ باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟

۱۹. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟

ب) اگر جرم ماهواره‌ای 25 kg باشد، وزن آن در ارتفاع 36000 km کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟
 $(M_e = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ و $R_e = 6400 \text{ km})$

۲۰. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟

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

$M_{\text{خورشید}} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ و $M_{\text{ماه}} = 7.36 \times 10^{22} \text{ kg}$

$149.6 \times 10^6 \text{ km} = \text{فاصله زمین تا خورشید}$

$3.84 \times 10^5 \text{ km} = \text{فاصله زمین تا ماه}$

۲۱. الف) سفینه‌ای به جرم 10^4 kg در وسط فاصله بین زمین و ماه قرار دارد. نیروی گرانشی خالصی را که از طرف زمین و ماه به این سفینه در این مکان وارد می‌شود به دست آورید (از داده‌های مسئله‌های قبل استفاده کنید).

ب) در چه فاصله‌ای از زمین، نیروی گرانشی ماه و زمین بر سفینه، یکدیگر را خنثی می‌کنند؟

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

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

۱۴. کتابی را مانند شکل با نیروی عمودی F

به دیوار قائمی فشرده و ثابت نگه داشته‌ایم.

الف) نیروهای وارد بر کتاب را رسم کنید.

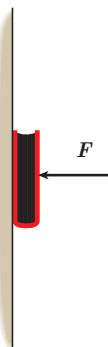
ب) اگر جرم کتاب $2/5 \text{ kg}$ باشد، اندازه

نیروی اصطکاک را به دست آورید.

پ) اگر کتاب را بیشتر به دیوار بفشاریم، آیا

نیروی اصطکاک تغییر می‌کند؟ با این کار

چه نیروهایی افزایش می‌یابد؟



۲-۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

۱۵. وقتی در خودروی ساکنی نشسته‌اید و خودرو ناگهان شروع

به حرکت می‌کند، به صندلی فشرده می‌شوید. همچنین اگر در

خودروی در حال حرکتی نشسته باشید، در توقف ناگهانی به

جلو پرتاب می‌شوید.



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

تزدیک 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 0.06 s با توپ در تماس باشد، اندازه نیروی

متوسط وارد بر مشت بازیکن از طرف توپ را به دست آورید.



عمل لیتوتریپسی (Lithotripsy)، روشی غیرتهاجمی برای شکستن سنگ‌های کلیه است. در این عمل، امواج فراصوتی روی سنگ‌های کلیه متمرکز می‌شوند، به طوری که با خرد شدن سنگ‌ها، آنها بتوانند از طریق مجاری ادراری خارج شوند. چگونه یک دستگاه عمل لیتوتریپسی می‌تواند امواج فراصوتی را بر یک سنگ کلیه چنان متمرکز کند که موجب شکستن آن شود؟

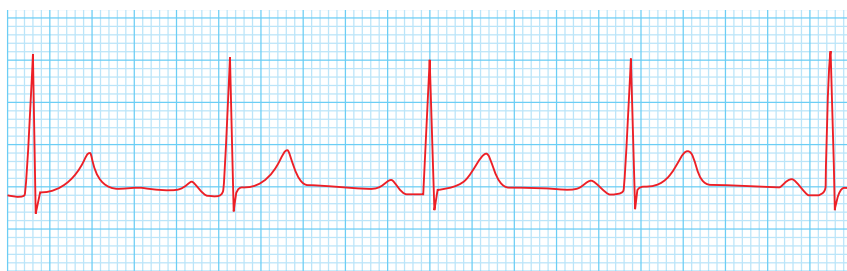
بخش‌ها

- 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
- ۷-۳ بازتاب موج
- ۸-۳ شکست 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. همچنین امواج با محیطی که در آن منتشر می‌شوند برهم‌کنش نیز می‌کنند. بازتاب و شکست امواج نمونه‌هایی از این برهم‌کنش هستند که به خصوص کاربردهایی فراوان در علوم طبیعی دارند.

۱-۳ نوسان دوره‌ای

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



شکل ۲-۳ نمونه‌ای از نمودار الکتروقلب نگاره^۱ (نوار قلب) یک شخص^۲

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:

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

پوشش ۱-۳

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



(الف)



(ب)



(پ)



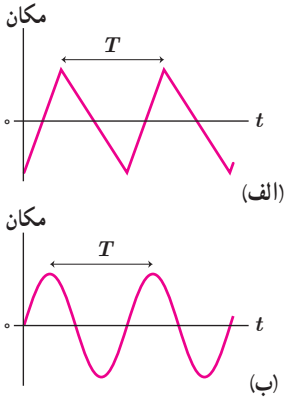
(ت)

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

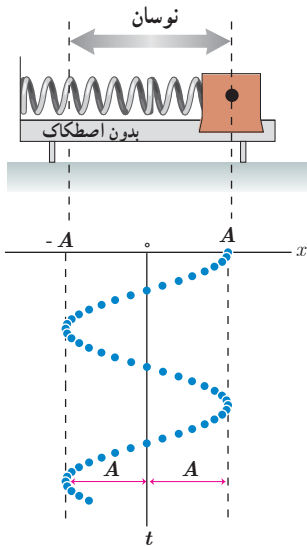
^۱ Electro Cardio Gram (ECG)

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

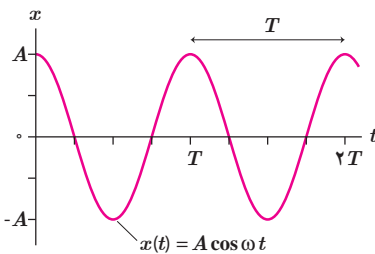
۲-۳ حرکت هماهنگ ساده



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 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 به صورت تابعی سینوسی یا کسینوسی از زمان t نوشت. در این کتاب برای سادگی تابع کسینوس را برمی‌گزینیم، یعنی فرض می‌کنیم در لحظه $t = 0$ نوسانگر در مکان بیشینه خود، یعنی $x = +A$ ، باشد. بنابراین مکان $x(t)$ نوسانگر را می‌توان چنین نوشت:

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

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 نموداری از این تابع را نشان می‌دهد. اگر به حرکت سامانه جرم - فنر شکل ۳-۴ توجه کنید درمی‌یابید که وقتی نوسانگر در $x = \pm A$ است، سرعت آن برابر با صفر است. به این نقطه‌ها اصطلاحاً نقطه‌های بازگشت^۳ 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

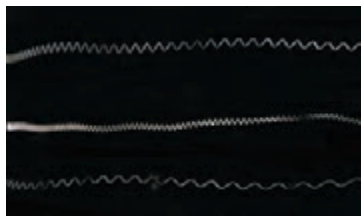
۳-Turning Points

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



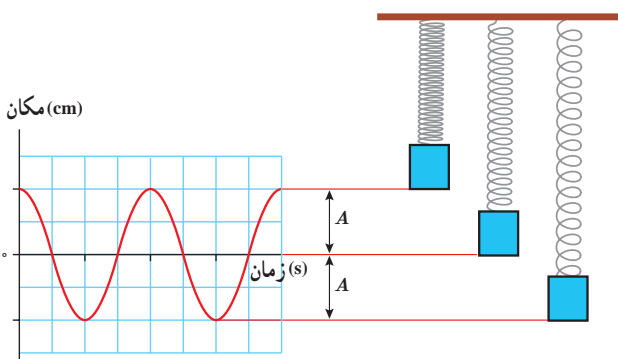
دیاپازون با تیغه ای نوک تیز



انتر ارتعاش‌های دیاپازون 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 بگیریم تا به خوبی دوداندود شود. سپس تیغه نوک تیزی را به نوک یکی از شاخه‌های دیاپازون^۱ کم بسامدی (در حدود 100 Hz) محکم بچسبانیم. دیاپازون را به نوسان وادارید و آن را به سرعت روی شیشه دوداندود به حرکت درآورید، 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



جرمی متصل به یک فنر با بسامد 20 Hz و دامنه 3 cm به‌طور هماهنگ ساده در امتداد قائم نوسان می‌کند. پس از گذشت $10/66\text{ s}$ از رها شدن جرم از بالای نقطه تعادل، جابه‌جایی این جرم نسبت به نقطه تعادل چقدر است؟
پاسخ : با استفاده از رابطه $x = A \cos \omega t$ جابه‌جایی نسبت به نقطه تعادل جرم - 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 مائین حساب برای محاسبه چنین روابطی استفاده می‌کنید، دقت کنید که مُد مائین حساب روی رادیان (RAD) باشد.

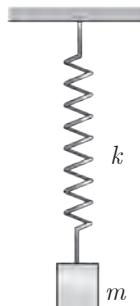


هاینریش هرتز (۱۸۹۴-۱۸۵۷ م.)

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 دربارهٔ نظریهٔ الکترومغناطیس ماکسول پرداخت. او به خاطر آزمایش‌هایی که در این زمینه انجام داد به سمت استادی فیزیک دانشگاه پلی‌تکنیک کالبروه منصوب شد. در آنجا یک فرستنده و یک گیرندهٔ رادیویی ساخت که مورد توجه قرار گرفت و به کمک آن توانست تندی امواج رادیویی را به دست آورد. آزمایش‌های متعدد هرتز، به قول خود او، همگی نشانه‌ای از پیروزی درخشان نظریهٔ ماکسول بود.

آزمایش‌های متعدد با جرم و فنر نشان می‌دهد که افزایش جرم m در سامانهٔ جرم- فنر (با فنر یکسان) به کُند شدن نوسان‌ها، یعنی افزایش دورهٔ تناوب T می‌انجامد. همچنین اگر این آزمایش‌ها را با وزنه‌ای به جرم ثابت ولی فنرهایی با سختی متفاوت (k متفاوت) انجام دهیم، درمی‌یابیم که با افزایش ثابت فنر k دورهٔ 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 محاسبهٔ دورهٔ تناوب T برای هر سامانهٔ جرم- فنر، به‌طور تجربی نشان دهید که:

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

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

پ) دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم- فنر مستقل از دامنه است.

محاسبات و همچنین آزمایش‌هایی مشابه با آنچه در فعالیت ۲-۳ دیدید نشان می‌دهد دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم- فنر با وزنه‌ای به جرم m و فنری با ثابت k برابر است با:

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

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

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{بسامد زاویه‌ای سامانهٔ جرم- فنر}) \quad (5-3)$$

مثال ۲-۳

قطعه‌ای به جرم 680 g به فنری با ثابت فنر $k = 65 \text{ N/m}$ بسته شده است. قطعه را به اندازهٔ مشخصی از مکان تعادل خود روی یک سطح افقی بدون اصطکاک می‌کشیم و از حالت سکون رها می‌کنیم. الف) دورهٔ تناوب و ب) بسامد زاویه‌ای نوسان چقدر می‌شود؟

پاسخ: الف) دورهٔ تناوب با استفاده از رابطهٔ ۴-۳ به دست می‌آید:

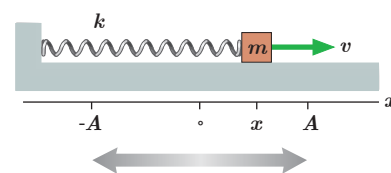
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0.680 \text{ kg}}{65 \text{ N/m}}} = 0.64 \text{ s}$$

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

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{65 \text{ N/m}}{0.680 \text{ kg}}} = 9.8 \text{ rad/s}$$

۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

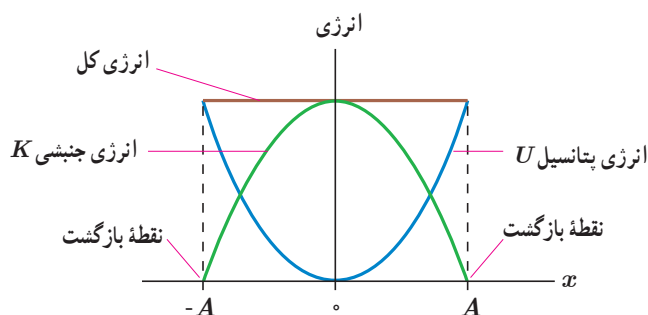
شکل ۳-۶ سامانه جرم-فنری را هنگام نوسان روی سطح افقی بدون اصطکاک نشان می‌دهد. این سامانه مثال بارز حرکت هماهنگ ساده است. در کتاب فیزیک ۱ دیدید وقتی فنری فشرده یا کشیده می‌شود در سامانه جرم-فنر انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره می‌شود، به طوری که با افزایش جابه‌جایی از نقطه تعادل (جایی که فنر نه فشرده و نه کشیده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

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

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 $U = \frac{1}{2} k x^2$ به‌دست 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:

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

یا

$$E = 2\pi^2 m A^2 f^2 \quad (\text{انرژی مکانیکی نوسانگر هماهنگ ساده}) \quad (7-3)$$

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:

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

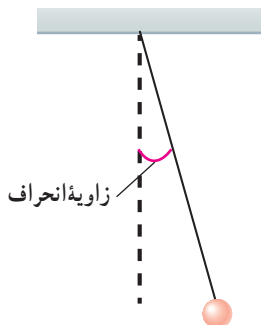
ب)

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

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 ۸-۳). اگر زاویه انحراف آونگ از وضع تعادل کوچک باشد، آونگ حرکت هماهنگ ساده خواهد داشت و همان تبدیل‌های انرژی نوسانگر هماهنگ ساده در اینجا نیز رخ می‌دهد. آزمایش‌های متعدد و محاسبه، نشان می‌دهد دوره تناوب آونگ ساده فقط به شتاب گرانشی (g) و طول آونگ (L) بستگی دارد، و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad (\text{دوره تناوب آونگ ساده}) \quad (8-3)$$

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



شکل ۸-۳ آونگ ساده، شامل وزنه‌ای کوچک است که از نخ بدون جرم و کش نیامدنی آویزان است.

مثال ۳-۴

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 72° نوسان را در 60 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:

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

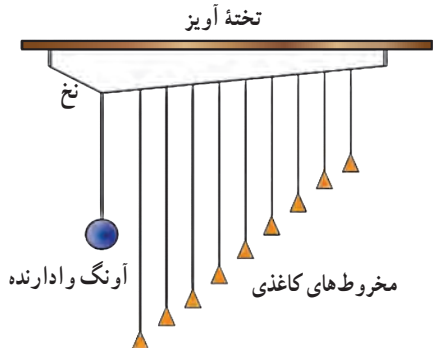
۴-۳ تشدید

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 $f_s = \sqrt{k/m}/2\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f_s = \sqrt{g/L}/2\pi$ است. اما این نوسانگرها می‌توانند با اعمال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، **نوسان واداشته** گفته می‌شود و بسامد این نوسان را با f_d نمایش می‌دهند. مثالی از یک نوسان واداشته، تاب خوردن کودکی است که به طور 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 دامنهٔ نوسان‌های تاب بزرگ‌تر و بزرگ‌تر شود حاکی از آن است که بسامد نوسان‌های واداشته با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی ($f_d = f_s$) اصطلاحاً گفته می‌شود که برای نوسانگر **تشدید** (رزونانس) رخ داده است. اگر تاب را با بسامدهایی بیشتر یا کمتر از بسامد طبیعی آن هل دهیم، دامنهٔ نوسان کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که آن را با بسامد طبیعی اش هل می‌دهیم. 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 پارتون^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.

۲- Barton's Pendulums

۳- Driver Pendulum

تمرین ۳-۳

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از، 0.4m ، 0.8m ، 1.2m ، 2.8m ، 3.5m . 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.

۵-۳ موج و انواع آن



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

هر گاه در ناحیه‌ای از یک محیط کشسان، ارتعاشی به وجود آید، موجب پدید آمدن ارتعاش‌های بی‌دربی دیگری می‌شود که از محل شروع ارتعاش دور و دورترند و به این ترتیب آنچه که **موج مکانیکی** می‌نامند، به وجود 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.

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.

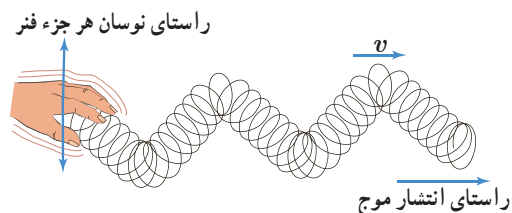
اگر مانند شکل ۳-۱۱ یک سر فنر بلند کشیده شده‌ای را به سرعت به چپ و راست تکان دهید، موجی مطابق شکل در طول فنر منتشر می‌شود که به آن **تپ** می‌گویند. اگر سر آزاد فنر را مانند شکل ۳-۱۲ رو به بالا حرکت دهید، بخش مجاور آن نیز از طریق کشش بین این دو بخش شروع به بالا رفتن می‌کند. وقتی بخش مجاور به بالا حرکت 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 فنر موجب



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

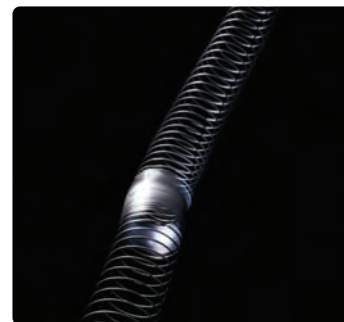
۱- به این فنر، فنر اسلینکی (Slinky) می‌گویند.

پایین کشیده شدن بخش‌های بعدی فنر می‌شود، و بدین ترتیب آشفتگی‌ای در شکل فنر ایجاد می‌شود که با تندی v در طول فنر حرکت می‌کند. اگر دست خود را پیایی به بالا و پایین حرکت دهید یک موج پیوسته با تندی v در طول فنر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فنر که در هنگام عبور موج به بالا و پایین نوسان می‌کند دقت کنید، درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فنر، عمود بر جهت حرکت موج است، که به آن، **موج عرضی** گفته می‌شود.



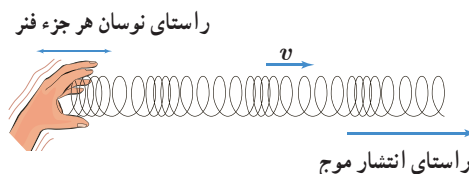
شکل ۱۲-۳ در حالی که موج به سمت راست منتشر می‌شود هر جزء فنر عمود بر راستای انتشار موج، به بالا و پایین نوسان می‌کند.

از این فنر بلند می‌توان برای ایجاد نوع دیگری از موج موسوم به **موج طولی** نیز استفاده کرد. اگر این بار، سر آزاد فنر را به جای اینکه به بالا و پایین یا به چپ و راست حرکت دهید، به سرعت به جلو و عقب ببرید، یک تپ در طول فنر به راه می‌افتد (شکل ۱۳-۳) و اگر دست خود را پیایی به جلو و عقب حرکت دهید یک موج طولی پیوسته با تندی v در طول فنر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فنر که در هنگام عبور این موج به چپ و راست نوسان می‌کند دقت کنید، درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فنر در راستای حرکت موج است (شکل ۱۴-۳). به همین دلیل است که به چنین موجی، **موج طولی** می‌گویند.



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

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 فنر) که موج در آن حرکت می‌کند. همچنین دریافتید که برای ایجاد چنین امواجی به یک جسم (چشمه) نوسانی نیاز دارید و موج از این چشمه دور می‌شود، و اگر چشمه به طور هماهنگ ساده نوسان کند، اجزای محیط حول نقطه تعادل خود با همان بسامد چشمه نوسان می‌کنند.



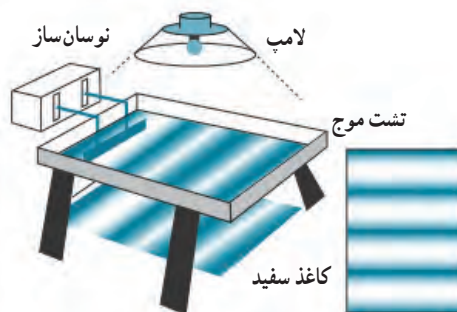
شکل ۱۴-۳ در حالی که موج به سمت راست حرکت می‌کند، هر حلقه فنر همراستا با حرکت موج به چپ و راست نوسان می‌کند، به طوری که ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شود.

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 فنر 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 ۱۵-۳ 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

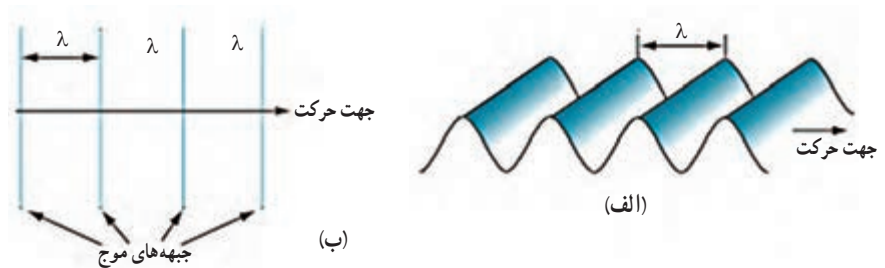


شکل ۱۵-۳ طرحی از دستگاه تشت موج



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، **د/منه** موج نامیده می‌شود که همان فاصله قله با دره نسبت به سطح آرام یا ساکن است.

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

بسامد (f): تعداد نوسان‌های انجام شده توسط هر ذره محیط در یک ثانیه **بسامد** موج نامیده می‌شود که برابر با بسامد 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:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad \text{(تندی انتشار موج)} \quad (9-3)$$

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.

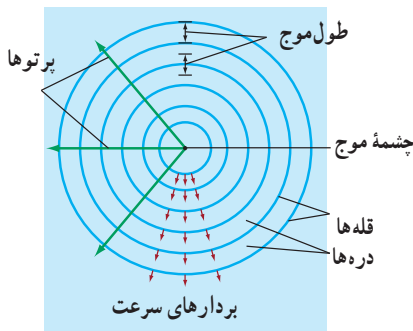
با قرار دادن $\lambda_1 = 0/50$ m و $T = 1/10$ s در رابطه ۳-۹ خواهیم داشت:

$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{0/50 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 0/50 \text{ m/s}$$

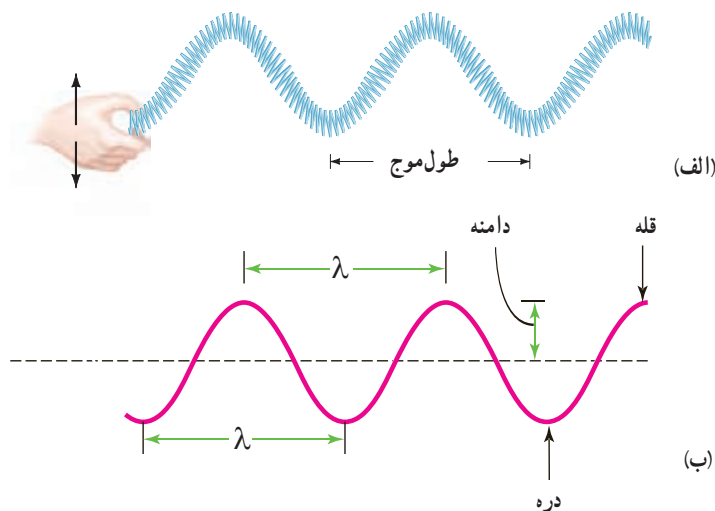
و با قرار دادن $\lambda_2 = 0/60$ m و $T = 1/10$ s در رابطه ۳-۹ خواهیم داشت:

$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{0/60 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 0/60 \text{ m/s}$$

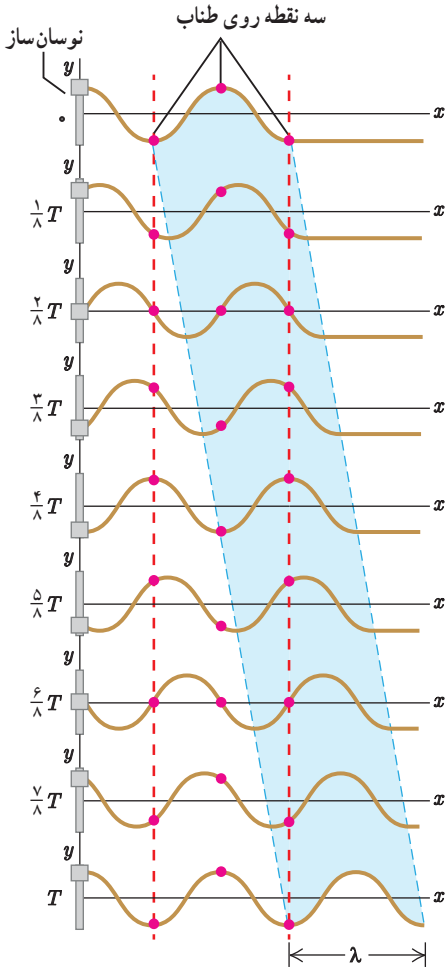
از اینجا درمی‌یابیم که تندی انتشار موج سطحی روی آب‌های کم عمق، به عمق آب که یکی از ویژگی‌های محیط انتشار موج است بستگی دارد.



موج عرضی و مشخصه‌های آن: اگر یک سرفنر 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 مدل‌سازی کرد. در این شکل طول موج و دامنه این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.

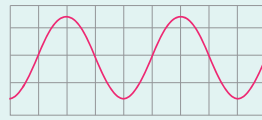


شکل ۳-۱۸ الف) یک موج عرضی در فنر کشیده شده و ب) مدل سینوسی برای این موج

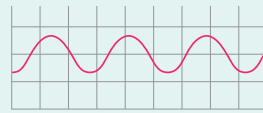


شکل ۱۹-۳ نُه عکس لحظه‌ای از یک موج عرضی منتشر شده در یک تار کشیده شده

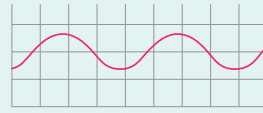
پوشش ۳-۴



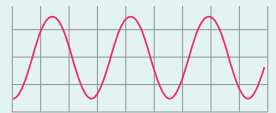
شکل روبه‌رو موجی عرضی را نشان می‌دهد. دامنه و طول موج هر کدام از شکل موج‌های الف، ب، و پ را با دامنه و طول موج این شکل مقایسه کنید.



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۱۹-۳، نقش یک موج عرضی را در چند لحظه متفاوت در مدت یک دوره تناوب (T) نشان می‌دهد. در این مدت، هر ذره از محیط یک نوسان کامل انجام داده است و موج به اندازه یک طول موج (λ) پیشروی کرده است. بنابراین تندی انتشار موج عرضی نیز از همان رابطه ۳-۹ 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:

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

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



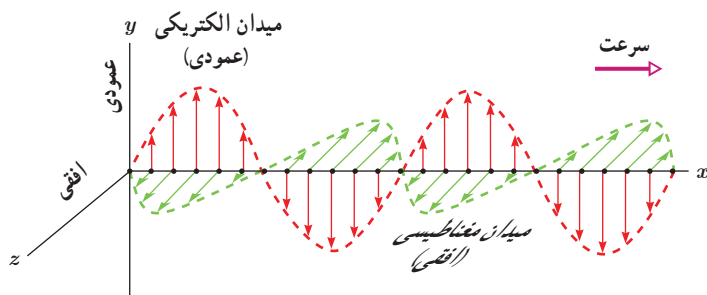
در سازهای زهی همانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شُل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت 0.628m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار 0.208g و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار 3.32g است. تارها تحت کششی برابر 226N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر است؟

انتقال انرژی در موج عرضی: هر موجی حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان یا فنر کشیده موجی عرضی را ایجاد می‌کنیم، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده‌ایم. با انتشار موج، این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می‌یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت و کشیدگی هر جزء ریسمان یا فنر را شخصی تأمین می‌کند که سر ریسمان یا فنر را 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.

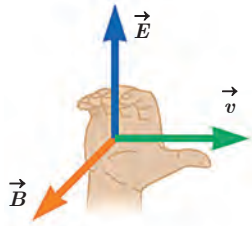
امواج الکترومغناطیسی: در کتاب فیزیک ۲ آموختیم که بار الکتریکی، میدان الکتریکی ایجاد می‌کند و جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اگر بارهای الکتریکی ساکن باشند، میدان الکتریکی حاصل از آنها با زمان تغییر نمی‌کند. به همین ترتیب اگر جریان الکتریکی ثابت باشد، میدان مغناطیسی حاصل از آن ثابت و بدون 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 (x) و انتشار موج در جهت z 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.

پوشی 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 $4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ و ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و برابر $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ 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.

مثال ۳-۷

۴۰۰ nm	۴۵۰	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰	۷۰۰ nm
بنفش	آبی	سبز	زرد	نارنجی	قرمز	

گستره تقریبی طول موج نور مرئی در خلأ از ۴۰۰ nm (نور بنفش) تا ۷۰۰ nm (نور قرمز) 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 $(c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s})$ 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 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، فرسرخ، 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.

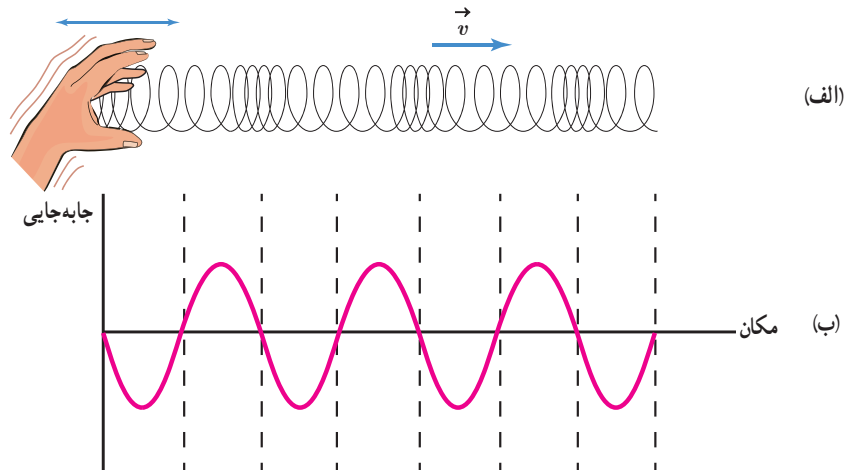


شکل ۳-۲۲ طیف امواج الکترومغناطیسی

در مورد نواحی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، چگونگی تولید و کاربردهای آنها تحقیق کنید.

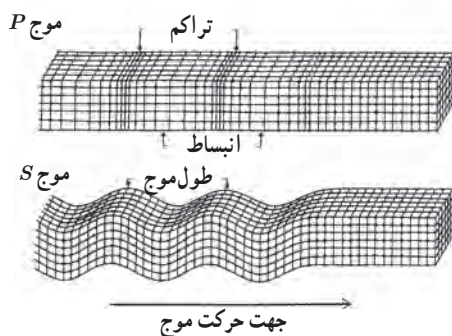
موج طولی و مشخصه‌های آن: در انتشار موج طولی در یک فنر بلند کشیده شده دیدیم که با انتشار موج، ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شوند. برای اینکه این موج را مدل‌سازی کنیم لازم است ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان‌هایی 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 بیشینه و یک بازشدگی بیشینه مجاور هم، اندازه جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل، بیشینه 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 بیشینه 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، زمین‌لرزه‌ها 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 زمین‌لرزه را ثبت می‌کند. فرض کنید نخستین امواج P، ۳/۰ دقیقه پیش از نخستین امواج S دریافت شوند.

اگر این موج‌ها روی خط راستی حرکت کنند، زمین‌لرزه در چه فاصله‌ای از محل لرزه‌نگار رخ داده است؟

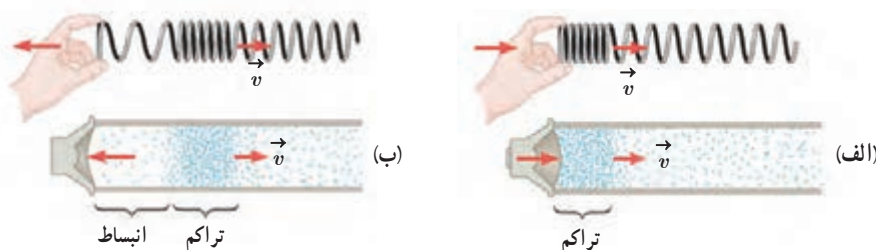
پاسخ: نخست با استفاده از رابطه $\Delta x = v \Delta t$ که در فصل ۱ آموختیم، زمان پیمودن هر یک از دو موج را می‌یابیم. اگر تندی موج S را با v_s و تندی موج P را با v_p نشان دهیم، اختلاف زمان رسیدن این دو موج چنین می‌شود:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v_s} - \frac{\Delta x}{v_p} = \frac{(v_p - v_s)\Delta x}{v_s v_p}$$

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، تارهای 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 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

۲- Secondary Waves

۳- Primary Waves

۴- Seismograph



ارتعاش یک مولکول هوا

شکل ۳-۲۵ در حالی که موج از بلندگو به سمت شنونده حرکت می‌کند، مولکول‌های هوا در جای خود نوسان می‌کنند.

را برعکس می‌کند و به سمت داخل می‌رود. حرکت رو به داخل دیافراگم، هوای جلوی آن را منبسط می‌کند. این انبساط که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود، مشابه ناحیهٔ 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).

پرسش 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 استثناهایی 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.

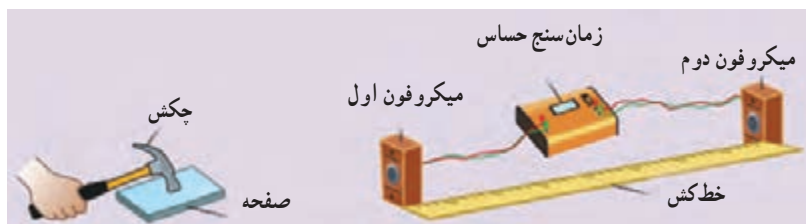
جدول ۳-۱ تندی صوت در محیط‌های مختلف

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 همهٔ گازها ۱ atm است.

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.



۱- Fast timer

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 340 m/s باشد، طول میله چقدر است؟

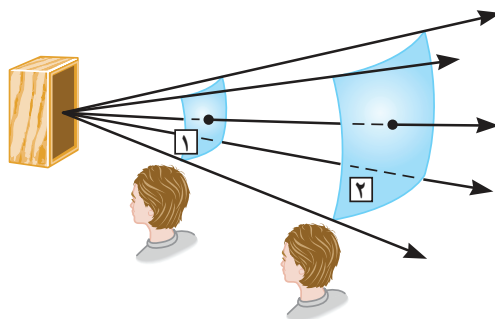
خطای شنوایی در زیر آب

سازوکاری که مغز برای تعیین جهت چشمه صدا به کار می‌برد مبتنی بر تأخیر زمانی بین رسیدن صدا به گوش نزدیک‌تر به چشمه و گوش‌ای است که دورتر از چشمه قرار دارد. مثلاً اگر چشمه صدا مستقیماً در طرف راست شما باشد، تأخیر زمانی $58 \mu\text{s}$ است و تجربه قبلی به درستی به شما می‌گوید که چشمه در سمت راست شما قرار دارد. ولی اگر شما و چشمه صدا هر دو در آب فرو روید میزان تأخیر زمانی تنها $\frac{1}{4}$ تأخیر زمانی قبلی خواهد بود، زیرا تندی صوت در آب ۴ برابر تندی صوت در هوا است. پس صدا سریع‌تر از گوش نزدیک‌تر به گوش دیگر حرکت می‌کند. این تأخیر زمانی کوتاه‌تر و تجربه قبلی شما این علامت اشتباه را می‌دهد که چشمه در زاویه دیگری از جهت مقابل شما قرار دارد.

شدت و تراز شدت صوت: انتشار صوت از هر چشمه صوتی همراه با انتقال بی‌انرژی 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 بعدتر منتقل و در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی‌ای است که توسط موج به واحد سطح، عمود بر راستای انتشار صوت می‌رسد یا از آن عبور می‌کند (شکل ۳-۲۶).

$$I = \frac{P_{av}}{A} \quad \text{(شدت صوت)} \quad (3-11)$$

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 متر مربع (W/m^2) 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.

جدول ۳-۲ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

تراز شدت صوت (dB)	شدت صوت (W/m^2)	صوت
۱۰	10^{-11}	نفس کشیدن در فاصله ۳m
۲۰	10^{-10}	پیچ در فاصله ۱m
۳۰	10^{-9}	کتابخانه
۴۰	10^{-8}	خیابان بی سروصدا
۵۰	10^{-7}	رستوران ساکت
۶۰	10^{-6}	صحبت معمولی در فاصله ۱m
۷۰	10^{-5}	خیابان پر سروصدا
۸۰	10^{-4}	در نزدیکی جاروبرقی
۹۰	10^{-3}	قطار در عبور از یک تقاطع
۱۰۰	10^{-2}	کارگاه ماشین آلات پر سروصدا
۱۱۰	10^{-1}	دستگاه پخش صوت در بیشترین صدای خود
۱۲۰	10^0	متن سنگ شکن
۱۳۰	10^1	موتور جت در فاصله ۳۰m

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 (در پایه ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به جای شدت I یک موج صوتی، ساده‌ترین است که از **تراز شدت صوت (تراز صوتی)** که به صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم:

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (\text{تراز شدت صوت}) \quad (12-3)$$

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 dB دارد. جدول ۳-۲، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

مثال ۳-۹

تراز شدت صوت یک مخلوط‌کن که انتشار صوت آن به صورت شکل ۳-۲۶ است در سطح ۲، dB ۸۰/۰ است. الف) شدت این صدا چقدر است؟ ب) اگر مساحت سطح ۲، برابر $4/0 \text{ m}^2$ باشد، آهنگ متوسط انتقال انرژی از این سطح را محاسبه کنید. **پاسخ:** با استفاده از رابطه ۳-۱۲ داریم:

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log(I/I_0) \Rightarrow 80/0 \text{ dB} = (10 \text{ dB}) \log(I/I_0) \Rightarrow \log(I/I_0) = 8/00 \quad (\text{الف})$$

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

$$I = \frac{P_{av}}{A} \Rightarrow P_{av} = IA = (10^{-4} W/m^2)(4/00 \text{ m}^2) = 4/00 \times 10^{-4} W \quad (\text{ب})$$

تمرین ۳-۷

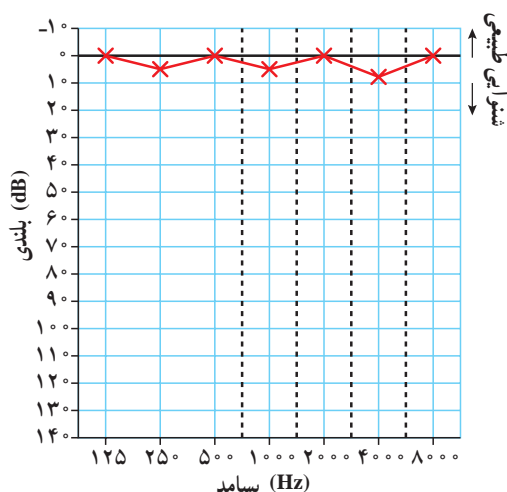
با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد 10^0 برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

ادراک شنوایی: وقتی دیپازونی را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی‌داریم، دیپازون 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^۱ 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 دیپازون 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 دیپازون 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 ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن تُن‌های صدای ۲۰ Hz تا ۲۰,۰۰۰ Hz است.

شنوایی سنجی و اودیوگرام

همان‌طور که گفتیم گوش به تمام بسامدها به طور یکسانی حساس نیست و بنابراین برای آزمودن شنوایی یک شخص، گستره‌ای از بسامدهای مختلف استفاده می‌شود. در حین یک آزمون شنوایی سنجی صداهایی با بسامدهای ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ هرتز در گوش ایجاد می‌شود (شکل الف). هر بسامد با شدت پایینی شروع می‌شود، به طوری که شخص ابتدا نمی‌تواند آن را بشنود. سپس شدت به تدریج زیاد می‌شود تا اینکه بالاخره شخص بتواند صدا را بشنود. بلندی مربوط به این صدا که اصطلاحاً **آستانه شنوایی** در بسامد آزمون گفته می‌شود، ثبت می‌گردد. سپس نتایج روی نمودار بلندی (بر حسب dB) در برابر بسامد رسم می‌شود. به نمودار حاصل **اودیوگرام** می‌گویند (شکل ب). اگر نتایج حاصل در محدوده مشخصی قرار گیرد که به عنوان شنوایی طبیعی تعیین شده است، شنوایی شخص طبیعی محسوب می‌شود. البته افزون بر آستانه شنوایی، **آستانه دردناکی** نیز برای هر بسامد تعریف می‌شود که پیشینه بلندی صدایی است که در آن بسامد بدون آزار شنوایی، قابل شنیدن است. آستانه دردناکی برخلاف آستانه شنوایی چندان به بسامد آزمایش حساس نیست.



ب) یک نمودار اودیوگرام نوعی برای شخصی با شنوایی خوب



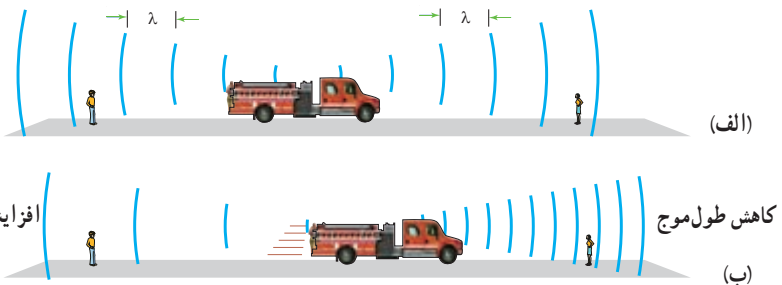
الف) شخصی در حین آزمون شنوایی سنجی

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 رانندهٔ 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 به‌عنوان دو حالت خاص، وضعیت‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آنها چشمهٔ صوتی به شنوندهٔ ساکن نزدیک و یا از او دور شود، و یا شنونده به چشمهٔ صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود.^۱

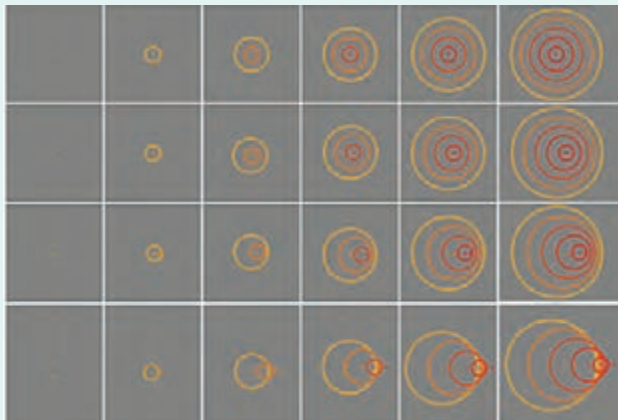
الف) چشمهٔ متحرک و ناظر (شنونده) ساکن: شکل ۳-۲۷ الف، جبهه‌های موج حاصل از صدای آژیر یک ماشین آتش‌نشانی ساکن را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود فاصلهٔ این جبهه‌ها از هم، در جلو و عقب ماشین یکسان است، ولی اگر ماشین آتش‌نشانی مثلاً به جلو حرکت کند، فاصلهٔ جبهه‌های موج در جلوی ماشین کمتر از پشت آن خواهد بود (شکل ۳-۲۷ 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 ۳-۲۷ 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.



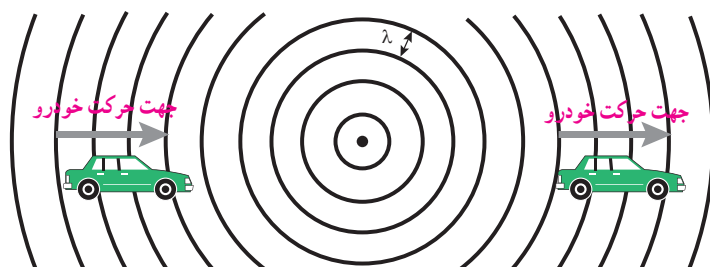
پوشش ۲-۳



- الف) در هر ردیف شکل روبه‌رو، جبهه‌های موج متوالی حاصل از یک چشمه را می‌بینید.
- ب) الف) تندی چشمه‌ها را با هم مقایسه کنید.
- پ) ب) تندی هر چشمه را با تندی صوت مقایسه کنید.
- ت) الف) تندی چشمه‌ها را با هم مقایسه کنید.

۱- روابط و محاسبات مربوط به اثر دوپلر خارج از برنامهٔ 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 ۳-۲۸).



شکل ۳-۲۸ 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.

۳-۷ بازتاب موج

تولید صدا در آلات موسیقی، پژواک صداها، دیدن ماه، دیدن صفحه این 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. برخی از جانداران نظیر خفاش از همین ویژگی برای یافتن مسیر خود یا طعمه استفاده می‌کنند (شکل ۳-۲۹). 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. در این بخش، نخست بازتاب امواج مکانیکی و سپس بازتاب امواج الکترومغناطیسی را بررسی می‌کنیم.

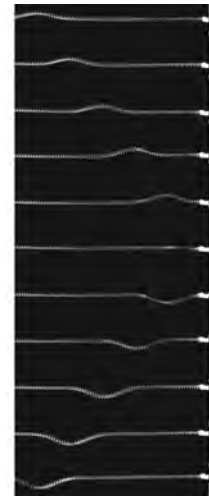


شکل ۳-۲۹ خفاش برای یافتن طعمه از پژواک موج صوتی خود استفاده می‌کند.

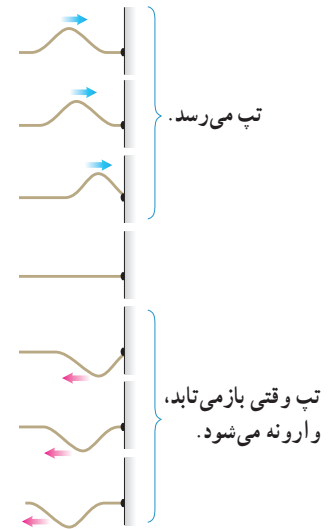
بازتاب امواج مکانیکی: اگر تپی را در یک فنر (یا یک ریسمان) کشیده بلند که یک سر آن بر تکیه‌گاهی ثابت شده است روانه کنیم، وقتی تپ به تکیه‌گاه (مرز) می‌رسد نیرویی به آن وارد می‌کند و طبق قانون سوم نیوتون، تکیه‌گاه نیز نیرویی با اندازه برابر و در جهت مخالف بر فنر وارد می‌آورد. این نیرو در محل تکیه‌گاه، تپی در فنر ایجاد می‌کند که روی فنر در جهت مخالف تپ تابیده حرکت می‌کند (شکل ۳-۳۰). شکل ۳-۳۱ طرحی واضح‌تر از تابش و بازتابش چنین تپی را نشان می‌دهد. چنین بازتابی را بازتاب در یک بُعد می‌گویند.

به خاطر داریم وقتی تیغه تختی را بر سطح آب تثبت موج به نوسان درمی‌آوریم، امواج تختی بر سطح آب تشکیل می‌شود. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع‌هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این موانع بازمی‌تابند. به چنین بازتابی، بازتاب در دو بُعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل یک مانع، مانعی تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۳-۳۲). شکل ۳-۳۳ طرحی از چنین بازتابی را نشان می‌دهد. با استفاده از جبهه‌های موج می‌توانیم به‌طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع پی‌بریم. 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 مربوط به شکل ۳-۳۳ را در حضور جبهه‌های موج به صورت شکل ۳-۳۴ رسم کرد. زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فرودی) را زاویه تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند^۱ و زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را زاویه بازتابش می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند^۲. آزمایش‌هایی نظیر آنچه در شکل ۳-۳۳ 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.

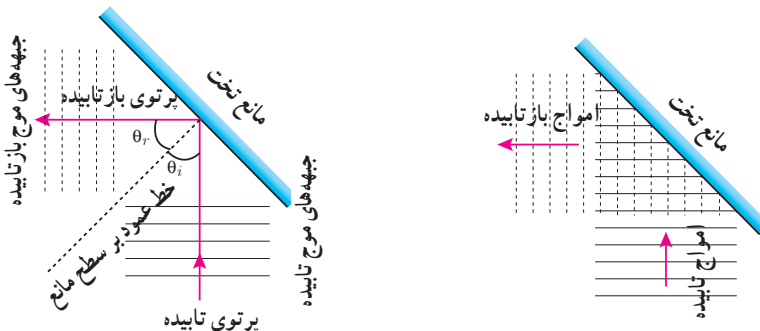
نمونه دیگری از بازتاب امواج مکانیکی، بازتاب امواج صوتی است. صوت می‌تواند از یک سطح سخت مانند دیوار بازتابش کند. این مثالی از بازتاب امواج در سه بُعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند. در فعالیت ۳-۷ به تحقیق این امر می‌پردازیم.



شکل ۳-۳۰ 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.

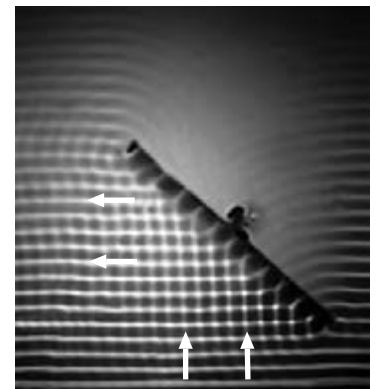


شکل ۳-۳۱ طرحی از پیشروی و بازتاب تپ عرضی شکل ۳-۳۰



شکل ۳-۳۲ نمودار پرتویی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانعی تخت

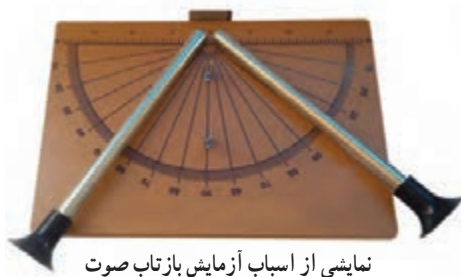
شکل ۳-۳۳ طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط تیره) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط سفید)



شکل ۳-۳۴ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تشت موج.

۱- توجه کنید که طول مانع باید در مقایسه با طول موج λ بسیار بزرگ باشد.
 ۲- i سرواژه کلمه incident به معنی تابش است.
 ۳- r سرواژه کلمه reflection به معنی بازتابش است.

فعالیت ۲-۳



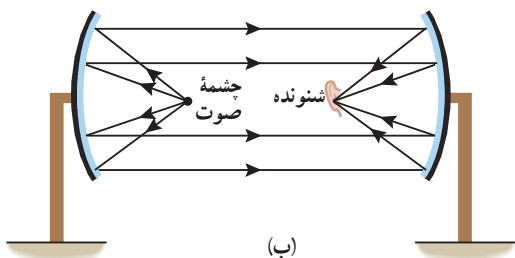
نمایشی از اسباب آزمایش بازتاب صوت

با اسباب نشان داده شده در شکل روبه‌رو، می‌توان زاویه تابش و زاویه بازتابش را در امواج صوتی اندازه‌گیری کرد. با استفاده از این اسباب، قانون بازتاب عمومی را برای امواج صوتی تحقیق کنید.

امواج صوتی می‌توانند مانند سایر امواج از سطوح خمیده نیز بازتابیده شوند. شاید در پارک‌های تفریحی دو سطح کاو را در برابر هم دیده باشید که وقتی شخصی در کانون یکی از این سطوح صحبت می‌کند، شخص دیگری در کانون سطح کاو دیگر آن را می‌شنود (شکل ۳-۳۵).



(الف)



(ب)

شکل ۳-۳۵ 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 ۸-۳



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 $1/8$ s باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

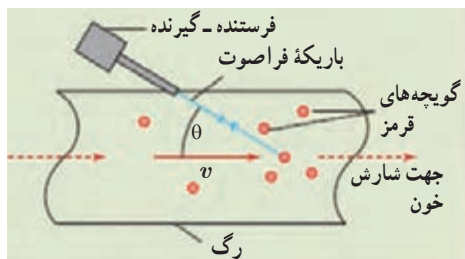
۱- Lithotripsy

۲- Echo

فناوری و کاربرد: مکان‌یابی پژواکی

مکان‌یابی پژواکی^۱ روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند. مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر، 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. خفاش، فوری 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 باز می‌تابد 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.

فعالیت ۹-۳



اندازه‌گیری تندی شارش خون: از مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر می‌توان برای تعیین تندی شارش خون (گویچه‌های قرمز) در رگ‌ها استفاده کرد. در مورد چگونگی این فناوری تحقیق کنید.

تمرین ۸-۳

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 ۱۰-۳

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 ۳-۱ حدود $1.52 \times 10^3 \text{ m/s}$ است، الف) طول موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای مانعی که در فاصله 100 m از آن قرار گرفته، چقدر است؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه $\lambda = v/f$ داریم:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1.52 \times 10^3 \text{ m/s}}{10^5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 1.52 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.52 \text{ cm}$$

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:

$$t = \frac{2L}{v} = \frac{2 \times 100 \text{ m}}{1.52 \times 10^3 \text{ m/s}} = 0.132 \text{ s}$$

بازتاب امواج الکترومغناطیسی: امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توانند از یک سطح، بازتابیده شوند و بازتاب آنها از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند.

امواج الکترومغناطیسی تخت تابیده به یک سطح کاو پس از بازتابش، مانند شکل ۳-۳۶ 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 فرسوخ برای گرم کردن آب یا مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی (شکل ۳-۳۶ ب) استفاده می‌شود.

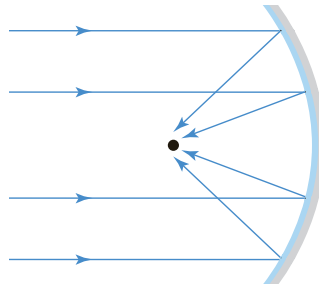


کریستین هویگنس (۱۶۹۵-۱۶۲۹ م.)

در لاهه هلند به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیدن و بریدا 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 پیش از آن دانشمندانی مانند گالیله روی آن کار کرده بودند، اما به جایی نرسیده بودند. علاوه بر این، او پژوهش‌هایی با ارزش روی نور نیز انجام داد و 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.



(ب)



(الف)

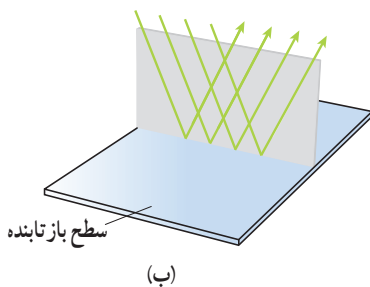
شکل ۳-۳۶ الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح، کانونی می‌شود. ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

فعالیت ۱۰-۳

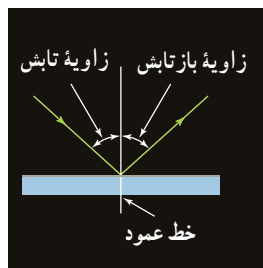
رادار دوپلری: از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی پژواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید. (راهنمایی: اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی نیز برقرار است.)



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 ۳-۳۷ 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 ۳-۳۷ ب).

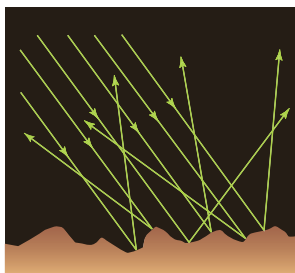


(ب)



(الف)

شکل ۳-۳۷ 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.



شکل ۳-۳۸ طرحی 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.

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 ۳-۳۸). 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 جهات‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که سطح در مقایسه با طول موج نور ناهموار است؛ مثلاً یک کاغذ در ظاهر بسیار هموار به نظر می‌رسد اما از دید میکروسکوپی این سطح از اجزای متمایز و کوچکی تشکیل شده است که بسیار بزرگ‌تر از $1\mu\text{m}$ هستند. با توجه به اینکه طول موج نور مرئی در حدود $5\mu\text{m}$ 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.

۳-۸ شکست موج

بازتاب، تنها راه برهم کنش امواج با محیط نیست. شکست نیز نوع دیگری از برهم کنش امواج با محیط است که بر اثر آن جهت پیشروی موج در ورود به محیط جدید تغییر می‌کند. 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 ۳-۳۹). 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 شکسته شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به

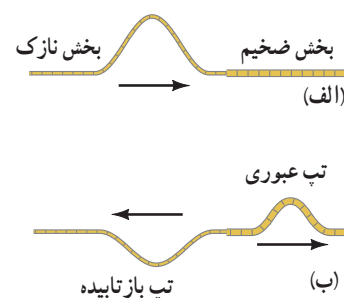


شکل ۳-۳۹ شکارچیان بومی آمریکای جنوبی به تجربه دریافته‌اند که محل واقعی یک ماهی متفاوت با محلی است که آن را می‌بینند.

۱- specular reflection

۲- diffuse reflection

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 این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۳-۴ الف)، بخشی از این تپ بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۳-۴ ب). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط چشمه موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطه $\lambda = v/f$ ، طول موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

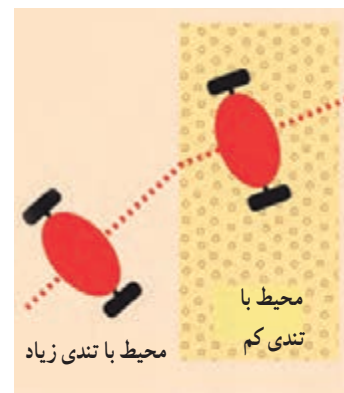


شکل ۳-۴ الف تپ فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم‌تر آن می‌شود. **ب** بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

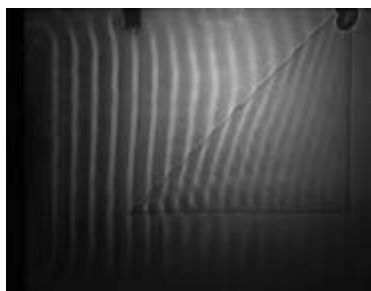
پرسش ۳-۸

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؟

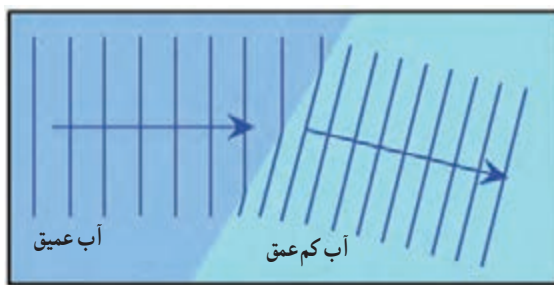
در حالت‌های دو یا سه بُعدی با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج شکست پیدا کند. همان‌طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب به عمق آن بستگی دارد. از این ویژگی می‌توانیم برای تحقیق پدیده شکست در تشت موج استفاده 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 کم عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش از جبهه موج که زودتر به ناحیه کم عمق 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 ۳-۴۱ 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 ۳-۴۲).



شکل ۳-۴۲ وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا چرخ‌ها که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۴۱ 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

جسمه موج تخت



در یک تشت موج به کمک یک نوسان‌ساز تیغه‌ای که با بسامد $5/0 \text{ Hz}$ کار می‌کند، امواجی تخت ایجاد می‌کنیم، به طوری که فاصله بین دو برآمدگی متوالی آن برابر با 1 cm می‌شود. اگر اکنون بزه‌ای شیشه‌ای را در کف تشت قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیه کم عمق بالای بزه، شکست پیدا می‌کنند. اگر تندی امواج در ناحیه کم عمق، $4/0$ برابر تندی در ناحیه عمیق باشد، طول موج امواج در ناحیه کم عمق چقدر می‌شود؟

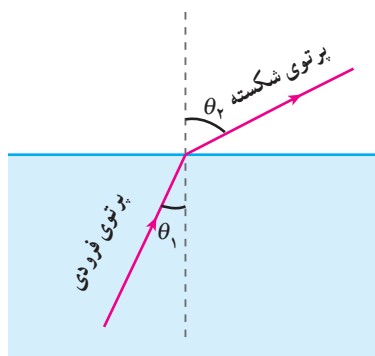


ابن هیثم در سال ۳۴۳ هجری شمسی (۳۵۴ هجری قمری) در بصره متولد شد و در سال ۴۱۸ هجری شمسی (۴۳۰ هجری قمری) درگذشت. او با اینکه از آثار گذشتگان خود استفاده کرد، اما بنیان نورشناخت را دگرگون ساخت و آن را به صورت علم منظم و مشخصی درآورد. او مانند اقلیدس هم فیزیک‌دان نظری و هم تجربی بود و به منظور تشخیص حرکت مستقیم‌الخط نور، یافتن خصوصیات سایه، موارد استفاده از عدسی‌ها و ویژگی‌های اتاق تاریک آزمایش‌هایی انجام داد. وی برای نخستین بار در مورد بسیاری از مسائل در نورشناسی به تحلیل ریاضی پرداخت. در مبحث شکست نور، وی ثابت کرد که زاویه شکست متناسب با زاویه تابش نیست و به تحقیق در مورد شکست نور در عدسی‌ها و در جو پرداخت. همچنین سهم عمده او در بحث بازتاب نور که پیش از آن یونانیان به اکتشاف‌های مهمی در آن دست یافته بودند، پژوهش در آینه‌های سهموی و کروی بود. او از آزمایش‌های خود دریافت کرد که در آینه سهموی همه پرتوها در یک نقطه متمرکز می‌شود و از این رو بهترین آینه‌های سوزاننده همین آینه‌های سهموی هستند. المناظر، کتابی است که از این دانش پژوه مسلمان برجای مانده است، اثری بی نظیر که یافته‌های او را در زمینه نورشناسی دربردارد. نویسنده در این شاهکار خود، با تکیه بر نظریه‌های ریاضی به توضیح علمی فرایند دیدن می‌پردازد و سعی می‌کند ساز و کار دیدن با دو چشم را توضیح دهد.

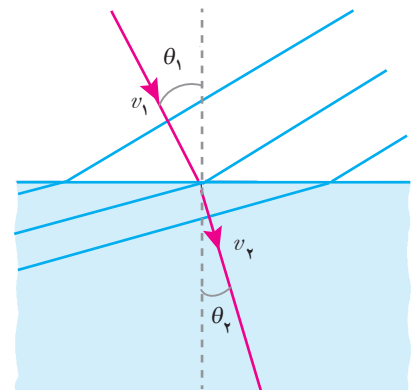
قانون شکست عمومی: در پدیده‌های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می‌پردازیم. فرض کنید مطابق شکل ۳-۴۳ جبهه‌های موج تختی به طور مایل به مرز دو محیط می‌رسند و سپس شکست پیدا می‌کنند. از آنجا که جبهه‌های موج در مرز جدایی دو محیط می‌شکنند، پرتوهای موج که همواره عمود بر جبهه‌های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می‌دهند. این پرتوها نیز در شکل ۳-۴۳ 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 ۳-۴۳، θ_1 ، θ_2 ، θ_3 و θ_4 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.

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

(۱۳-۳) (قانون شکست عمومی)



شکل ۳-۱۴۴ 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 ۳-۱۴۳ 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).

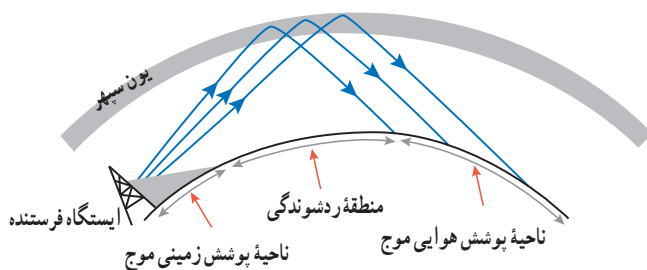
در شکل ۳-۴۳ موجی تخت از محیطی با تندی بیشتر به محیطی با تندی کمتر رفته است. ولی اگر موج در جهت مخالف حرکت کند، یعنی از محیط دوم که در آن تندی موج کمتر است وارد محیط اول شود که در آن تندی موج بیشتر است، زاویه شکست بزرگ‌تر از زاویه تابش می‌شود (شکل ۳-۴۴).

۱- شاخص پایین n سرواژه کلمه انگلیسی refraction به معنی شکست است.

تمرین ۳-۱۰

در تمرین ۳-۹ با فرض اینکه زاویه تابش امواج برابر 3° باشد، زاویه شکست چقدر می شود؟

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 می شود، شکست پیدا می کنند. به جز گستره نور مرئی که بیشترین و معروفترین موارد شکست برای آنها مطرح می شود و به پیامدها و کاربردهای جالبی می انجامد، شکست امواج رادیویی نیز اهمیتی کاربردی در ارتباطات رادیویی دارد.

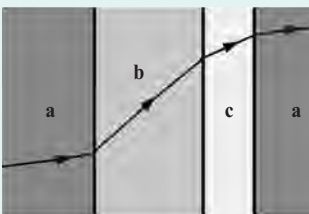


در این شکل ناحیه پوشش زمینی مربوط به پیرامون ایستگاه است، که امواج به طور مستقیم به گیرنده می رسد. منطقه ردشوندگی ناحیه ای است که امواج به زمین نمی رسد، و ناحیه پوشش هوایی ناحیه ای است که امواج رادیویی با بازگشت از یون سپهر به زمین می رسد.

موج های ارسال شده از یک ایستگاه فرستنده رادیویی دوردست را به همان وضوحی می شنویم که در محدوده آن ایستگاه شنیده می شود. روش کار به این ترتیب است که یک موج پر قدرت رادیویی، با بسامد بین 3° تا 30° مگاهرتز، به لایه یون سپهر (یونسفر) بالای جو که در ارتفاع 80 تا 1000 کیلومتری سطح زمین واقع است فرستاده می شود. این لایه به علت وجود یونها و الکترون های آزاد، پلاسمایی را ایجاد می کند که ویژگی های فیزیکی اش آن را از بقیه جو متمایز می سازد. یون سپهر در حالی که نور مرئی و تابش فرسرخ را عبور می دهد، امواج رادیویی با طول موج های بلند (با λ بزرگ تر از حدود 10^3 m) را که در جهت های مناسبی به سوی این لایه ارسال شده باشند، به طرف زمین برمی گرداند. دلیل این اتفاق، یکنواخت نبودن چگالی الکترون های آزاد در این لایه و در نتیجه، تفاوت تندی امواج رادیویی در قسمت های مختلف آن است، به طوری که در سازوکاری مانند پدیده سراب که بعداً خواهیم آموخت، امواج را به سمت پایین بازمی گرداند.

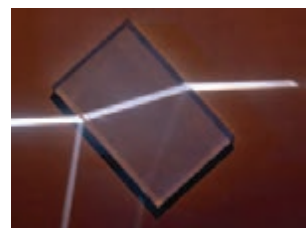
فیزیک ۳

پوشی ۳-۹



شکل روبه رو یک پرتوی موج الکترومغناطیسی را نشان می دهد که با عبور از محیط اولیه a ، از طریق محیط های b و c به محیط a بازمی گردد. این محیط ها را بر حسب تندی موج در آنها از بیشترین تا کمترین مرتب کنید.

وقتی یک پرتوی نور از محیطی شفاف وارد محیط شفاف دیگری شود، بخشی از نور بازمی تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم می شود. همان طور که انتظار داریم آن بخش نور که وارد محیط دوم می شود، به دلیل آنکه تندی آن در محیط دوم تغییر می کند، شکسته می شود (شکل ۳-۴۵). به همین دلیل برای هر محیط ضریب شکست تعریف می کنند که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است:



شکل ۳-۴۵ در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفاف دیگر، بخشی از نور بازمی تابد و بخشی می شکند.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\text{تندی نور در خلأ}}{\text{تندی نور در یک محیط}} \quad (3-14) \quad (\text{تعریف ضریب شکست})$$

جدول ۳-۳ ضریب شکست چند ماده مختلف*

ضریب شکست	محیط
۱	خلأ
۱/۰۰۰۲۹	هوا (شرایط متعارف)
۱/۳۱	یخ
۱/۳۳	آب (۲۰°C)
۱/۳۶	استون
۱/۳۶	اتانول
۱/۳۸	محلول آب قند (۳٪)
۱/۴۹	محلول آب قند (۸۰٪)
۱/۵۰	بنزن
۱/۵۱	پلاستیک پلکسی گلاس
۱/۵۲	شیشه خالص
۱/۵۴	سدیم کلرید (نمک خوراکی)
۱/۵۴	کوارتز (SiO ₂)
۲/۴۲	الماس

* برای طول موج ۵۸۹nm (نور زرد سدیم)

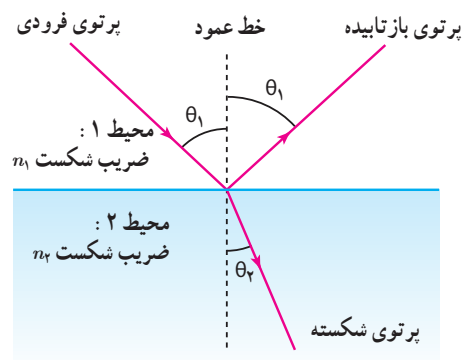
که در آن c تندی نور در خلأ با مقدار دقیق $۴۵۸\ ۷۹۲\ ۲۹۹\ \text{m/s}$ است که در محاسبات، آن را برابر با $۳/۰۰ \times ۱۰^8\ \text{m/s}$ در نظر می‌گیریم؛ چون تندی نور در خلأ بیشترین تندی ممکن است، ضریب شکست همواره بزرگ‌تر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلأ است). جدول ۳-۳ ضریب شکست برای چند ماده مختلف را به دست می‌دهد. بنابراین برای دو محیط خاص ۱ و ۲، ضریب شکست‌ها به ترتیب $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ است که v_2 و v_1 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 ۳-۴)، از قانون شکست عمومی (رابطه ۳-۱۳) درمی‌یابیم:

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{c/n_2}{c/n_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

و یا

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{قانون شکست اسنل}) \quad (۳-۱۵)$$

این رابطه را به افتخار فیزیک‌دان هلندی، ویلبرد اسنل (۱۶۲۶-۱۵۸۰م.) که آن را به‌طور تجربی کشف کرد، **قانون شکست اسنل** می‌نامند.



شکل ۳-۴ طرحی از بازتاب و شکست نور، در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفاف دیگر

مثال ۳-۱۱

پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیغه شیشه‌ای متوازی‌السطوحی، با زاویه تابش 60° 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. توجه به جدول ۳-۳ ضریب شکست هوا $n_1 = 1/00$ و ضریب شکست شیشه $n_2 = 1/52$ است.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (1/00)(\sin 60^\circ) = (1/52)(\sin \theta_A)$$

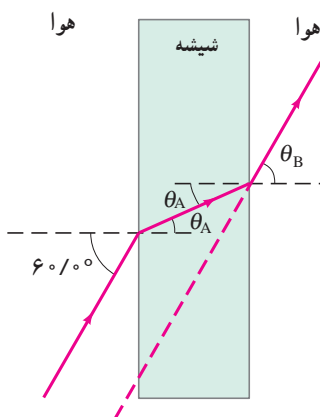
$$\sin \theta_A = 0/5698 \Rightarrow \theta_A = 34/7^\circ$$

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 $\theta_1 = \theta_A$.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (1/52)(0/5698) = (1/00)(\sin \theta_B)$$

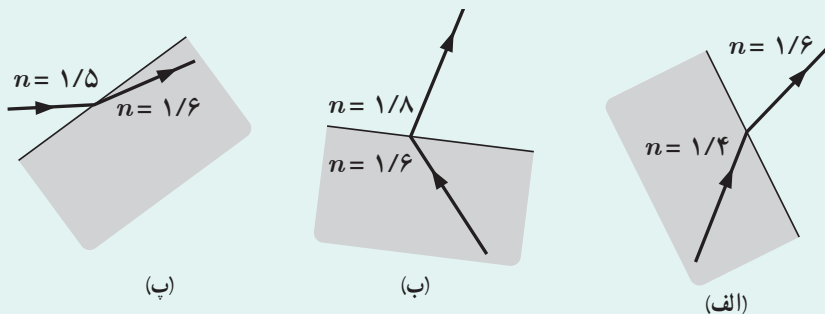
$$\sin \theta_B = 0/8661 \Rightarrow \theta_B = 60^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می‌توانستید مقدار θ_B را بیابید.



پرسش ۱۰-۳

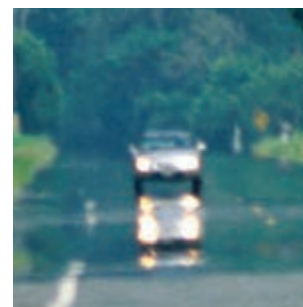
کدام یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



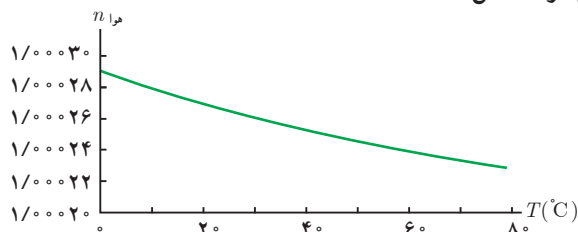
فعالیت ۱۱-۳

اندازه گیری ضریب شکست : با توجه به مثال ۱۱-۳، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغه متوازی السطوح شفاف را اندازه گرفت.

سراب : در روزهای گرم ممکن است برکه آبی را در دور دست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد، اما وقتی به آن محل می رسید، آنجا را خشک می یابید. به این پدیده **سراب** یا سراب آگیر می گویند و نه تنها می توان آن را دید، بلکه می توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۳-۴۷). در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، چگالی هوا با افزایش دما کاهش می یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می شود (شکل ۳-۴۸).

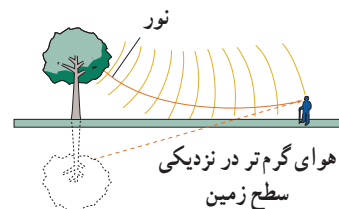


شکل ۳-۴۷ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده



شکل ۳-۴۸ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

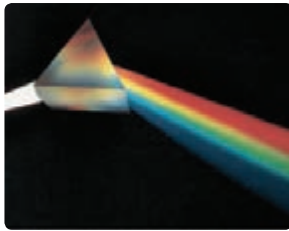
در شکل ۳-۴۹ پدیده سراب را مبتنی بر جبهه های موج نشان داده ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه های موجی را در نظر می گیریم که به طرف پایین می آیند. با پایین آمدن هر چه بیشتر پرتوهای متناظر این جبهه های موج، آنها با ضریب شکست های کوچک تر و کوچک تری روبرو می شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می شوند (شکل ۳-۵۰ الف). وقتی پرتوها در نزدیکی سطح زمین تقریباً افقی می شوند به سمت بالا خم برمی دارند. این خم شدن رو به بالا را می توان با استفاده از جبهه های موج توضیح داد. بخش پایینی هر جبهه موج در هوای کمی گرم تر قرار دارد و بنابراین کمی تندتر از بخش بالایی جبهه موج حرکت می کند و این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه های موج،



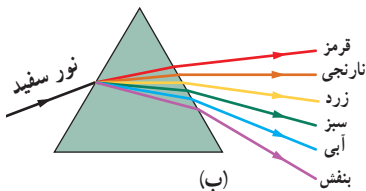
شکل ۳-۴۹ مدل سازی پدیده سراب به کمک جبهه های موج. ناظری که پرتوهای نور در پدیده سراب به چشمش می رسد، گمان می برد که این پرتوها از یک تصویر آمده اند.



شکل ۳-۵ 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. **ب)** خمیدگی اغراق آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم‌تر به سمت هوای گرم بالا می‌رود.



(الف)



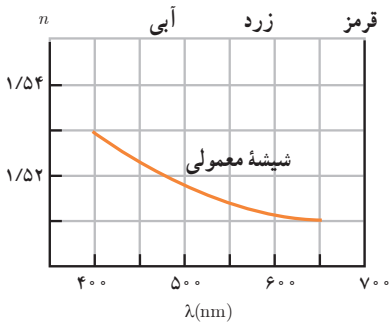
(ب)

شکل ۳-۵۱ 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

موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۳-۵۰ 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 ۳-۵۰ پ) اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می‌آید که منشأ این نور از امتداد رو به عقب پرتوهای است که به چشم ما رسیده‌اند و همان‌طور که در شکل ۳-۴۹ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.

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 ۳-۵۱ 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 پرتوهای با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، **پاشندگی نور** می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط معین برای طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۳-۵۲ 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.

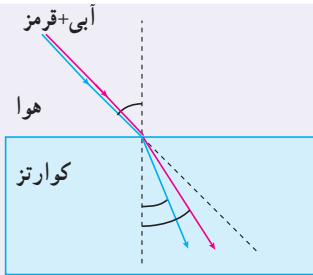
اگر باریکه نور سفید از هوا بر یک سطح شیشه‌ای فرود آید بر اثر شکست نور، مؤلفه‌های سازنده باریکه نور سفید هر کدام به میزان متفاوتی خم می‌شوند که البته این تفاوت چندان محسوس نیست. برای افزایش جدایی رنگ‌ها در پاشندگی نور، معمولاً از یک منشور با سطح مقطع مثلثی استفاده می‌کنیم. پاشندگی ناچیز در سطح اول، سپس با پاشندگی در سطح دوم افزایش می‌یابد و مؤلفه‌های رنگی نور سفید به‌طور محسوسی از هم جدا می‌شوند (شکل ۳-۵۱ ب)¹.



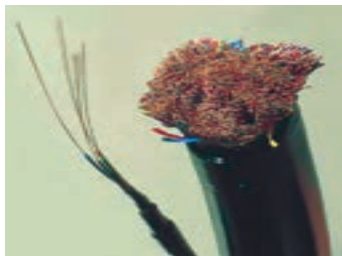
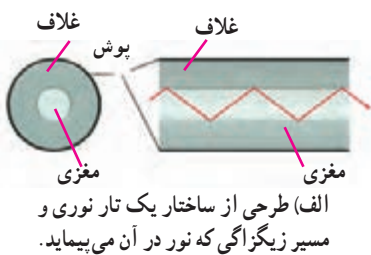
شکل ۳-۵۲ تغییرات ضریب شکست در طیف مرئی نور برحسب طول موج برای شیشه معمولی

۱- محاسبه زاویه‌ها در شکست نور به وسیله منشور، خارج از برنامه درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

تمرین ۳-۱۱



شکل روبه‌رو باریکه نوری متشکل از دو پرتوی قرمز و آبی را نشان می‌دهد که از هوا و 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 $n_{قرمز} = 1/459$ و $n_{آبی} = 1/467$.

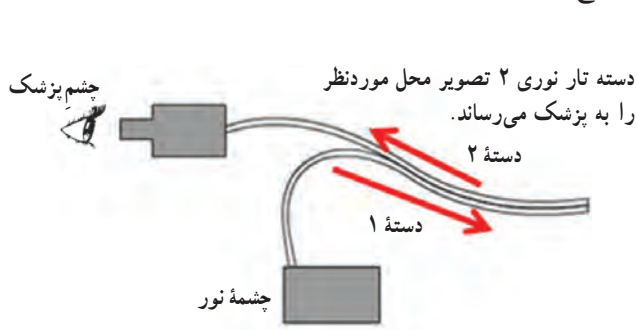


ب) یک کابل سبک تار نوری (شکل سمت چپ) می‌تواند مکالمه‌های تلفنی بسیار بیشتری را از یک کابل سیمی معمولی (شکل سمت راست) انتقال دهد.

تار نوری: وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به‌طور 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 بیش از آنکه شدتش کاهش یابد، تا مسافت‌های طولانی حرکت کند. تارهای نوری اغلب به‌صورت دسته‌ای کنار هم قرار می‌گیرند تا به شکل یک کابل درآیند. چون تارها بسیار نازک‌اند کابل‌ها نسبتاً کوچک و انعطاف‌پذیر هستند و به این ترتیب می‌توانند در بسیاری موارد، برای انتقال اطلاعات جایگزین کابل‌های فلزی بزرگ شوند (شکل ب). یکی از کاربردهای مهم تارهای نوری در عمل آندوسکوپی در پزشکی است. از آندوسکوپ برای دیدن درون بدن، بدون انجام جراحی استفاده می‌شود. در آندوسکوپی، جراح دو دسته تار نوری را وارد بدن بیمار می‌کند که یکی نور را به محل موردنظر می‌رساند و دیگری تصویر محل موردنظر را به یک چشمی یا صفحه نمایشگر می‌رساند. شکل پ، طرح ساده شده‌ای از چگونگی این تصویربرداری و شکل ت، یک اسباب آندوسکوپی معمولی را نشان می‌دهد.



دو دسته تار نوری داخل کابل قرار دارد. ت) یک اسباب آندوسکوپ معمولی



دسته تار نوری ۱ محل مورد نظر را روشن می‌کند. پ) طرح ساده‌شده‌ای از طرز کار یک آندوسکوپ

۱۷. جسمی به جرم $1/0 \text{ kg}$ به فنری افقی با ثابت $6/0 \text{ N/cm}$ متصل است. فنر به اندازه $9/0 \text{ cm}$ 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؟

۱۸. معادله حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به صورت $x = (0/50 \text{ m}) \cos 20\pi t$ 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؟

۱۹. (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 $g_{\text{تهران}} = 9/78 \text{ m/s}^2$)

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

۳-۴ 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 $5/0 \text{ Hz}$ 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

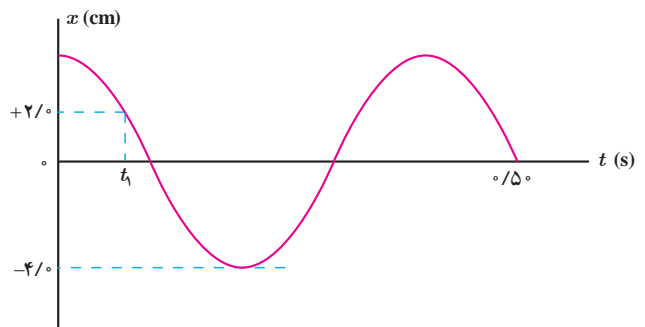
۱-۳ و ۲-۳ نوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده

۱. یک وزنه 20 N را از انتهای یک فنر قائم می‌آویزیم، فنر 20 cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنه $5/0 \text{ N}$ 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 $2/0 \text{ s}$ نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم $2/0 \text{ kg}$ افزایش یابد، دوره تناوب $3/0 \text{ s}$ 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 به طور یکنواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.

۴. دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $3/0 \times 10^{-2} \text{ m}$ و بسامد آن $5/0 \text{ Hz}$ هرتز است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را در یک دوره رسم کنید.

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



(الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید.

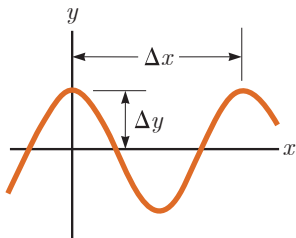
(ب) مقدار t_1 را به دست آورید.

(پ) اندازه شتاب نوسانگر را در لحظه t_1 محاسبه کنید.

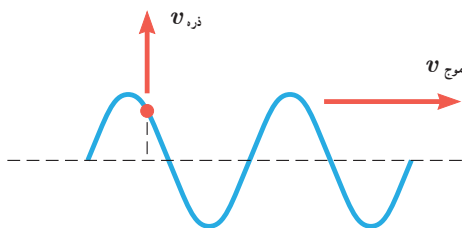
۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده - آونگ ساده

۴. دامنه نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت 74 N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با $8/0 \text{ cm}$ 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.)

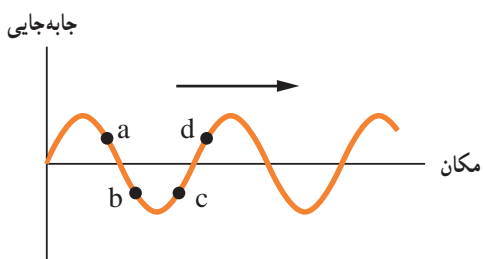
۱۱۴. در نمودار جابه‌جایی - مکان موج عرضی شکل زیر چشمه $\Delta y = 15^\circ \text{cm}$ و $\Delta x = 4^\circ \text{cm}$ است. اگر بسامد نوسان‌های موج چقدر است؟



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

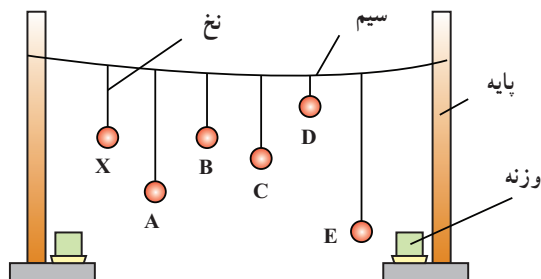


۱۱۶. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه‌ای از زمان نشان می‌دهد که در جهت محور x در طول ریسمان کشیده شده‌ای حرکت می‌کند. چهار جزء از این ریسمان روی شکل نشان داده شده‌اند. در این لحظه هر یک از این چهار جزء بالا می‌روند یا پایین؟



۱۱۷. 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.

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



۲-۵ و ۳-۶ موج و انواع آن، و مشخصه‌های موج

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

الف) با افزایش بسامد نوسان‌ساز کدام یک از کمیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول موج موج.

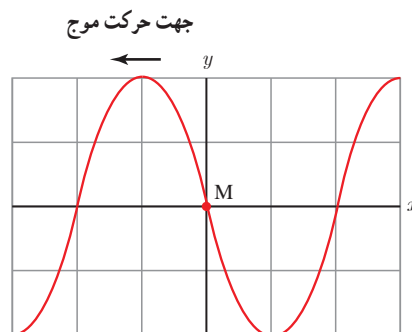
ب) حال اگر به جای افزایش بسامد، کشش ریسمان را افزایش دهیم، هر یک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول موج موج.

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

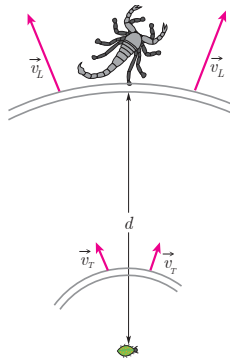
الف) با رسم این موج در زمان $T/4$ بعد، نشان دهید جزء M ریسمان در این مدت در چه جهتی حرکت کرده است. همچنین روی این موج، دامنه موج و طول موج را نشان دهید.

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؟



۱۳۳. توضیح دهید کدام یک از عامل‌های زیر بر تندی صوت در هوا مؤثر است.

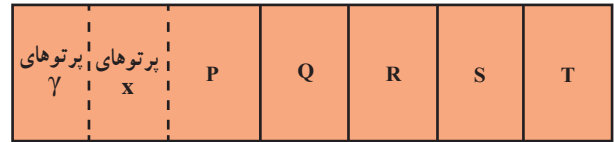
الف) شکل موج (ب) دامنه موج (پ) بسامد موج (ت) دمای هوا
 ۱۳۴. در سونوگرافی معمولاً از کاوه‌ای^۱ دستی موسوم به تراگذار فراصوتی^۲ برای تشخیص پزشکی استفاده می‌شود که دقیقاً روی ناحیه موردنظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می‌شود. این کاوه در بسامد $6/7 \text{ MHz}$ عمل می‌کند. الف) بسامد زاویه‌ای در این 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

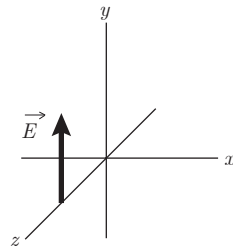
۱۸. شکل زیر طیف موج‌های الکترومغناطیسی را بدون مقیاس نشان می‌دهد.



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؟

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،

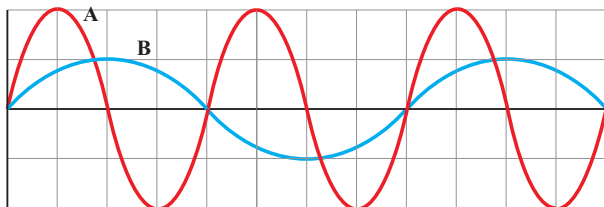
الف) فاصله بین دو تراکم متوالی این موج چقدر است؟

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

۳۲. در یک آتش‌بازی، موشکی در بالای آسمان منفجر 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 $I = 0.10 \text{ W/m}^2$ به شنونده‌ای برسد که به فاصله $r_1 = 640 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد، این صوت به شنونده‌ای که در فاصله $r_2 = 160 \text{ m}$ از محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟

۳۳. 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.



۳۴. 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 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 $1/2 \times 10^{-4} \text{ W}$ از دو صفحه فرضی شکل ۳-۲۶ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به ترتیب $A_1 = 4/0 \text{ m}^2$ 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 $10/0 \text{ m}$ از آن $1/0 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ 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 $\beta_1 = 90/0 \text{ dB}$ و دستگاه صوتی دیگر، صدایی با تراز شدت $\beta_2 = 95/0 \text{ dB}$ 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.

۲-۳ بازتاب موج

۳۳. دانش‌آموزی بین دو صخره قائم ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیکتر 24 m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از $1/5\text{ s}$ و صدای پژواک دوم را $1/3\text{ s}$ بعد از پژواک اول می‌شنود. الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟ ب) فاصله بین دو صخره را بیابید.

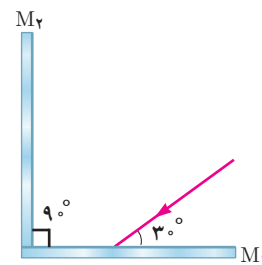
۳۴. اگر در فاصله مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونه جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان^۱ در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کوکولکان

۳۵. وقتی یک باریکه لیزر را به دیوار کلاس می‌تابانیم، همه دانش‌آموزان نقطه رنگی ایجاد شده روی دیوار را می‌بینند. دلیل آن چیست؟

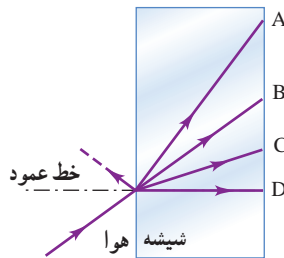
۳۶. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.



۳-۸ شکست موج

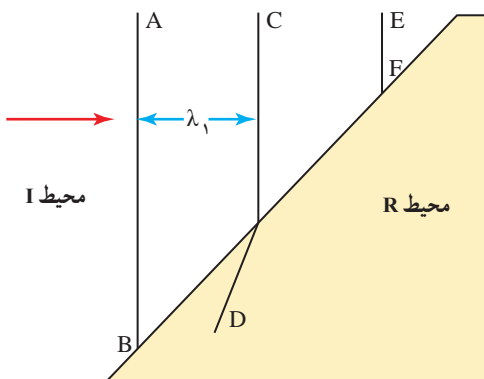
۳۷. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیب‌دار، تغییر می‌کند.

۳۸. شکل زیر پرتویی را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟



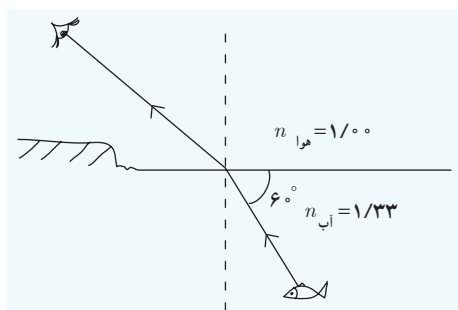
۳۹. ضریب شکست آب $1/3$ و ضریب شکست شیشه $1/5$ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید. **۴۰.** شکل زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده‌اند.

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؟

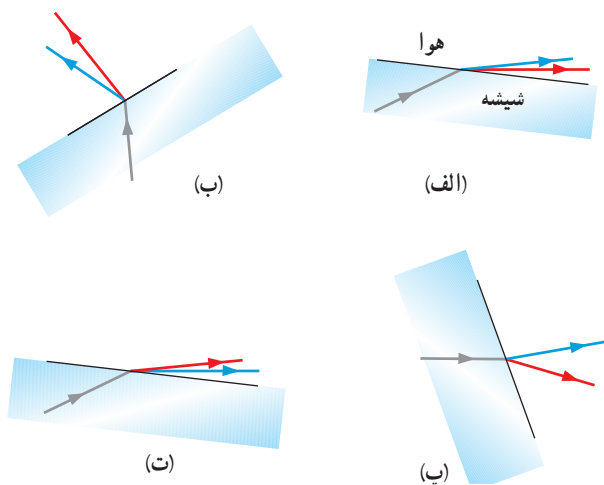


^۱ Kukulkan Temple

۱۴۴. 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؟

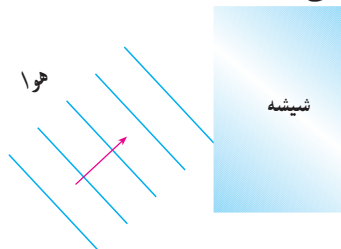


۱۴۵. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



۱۴۶. 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؟

۱۴۱. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود. الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست یافته را با موج فرودی مقایسه کنید. ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست یافته را رسم کنید.



۱۴۲. طول موج نور قرمز لیزر هلیوم - نئون در هوا حدود 633nm است، ولی در زجاجیه چشم 474nm 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.

۱۴۳. 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 پرشدن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.





آشنایی با فیزیک اتمی و 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

- ۱-۴ اثر فوتوالکتریک و فوتون
- ۲-۴ طیف خطی
- ۳-۴ مدل اتم رادرفورد - بور
- ۴-۴ لیزر
- ۵-۴ ساختار هسته
- ۶-۴ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

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 فیزیک هسته‌ای 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.

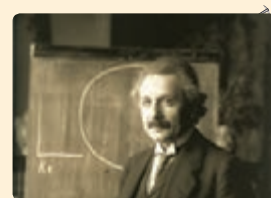
در این فصل ضمن معرفی و بررسی برخی از پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک و طیف خطی گسیلی و جذبی از گازهای اتمی که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند، به معرفی الگوهای اتمی می‌پردازیم و سپس نگاهی به مبانی فیزیکی لیزر خواهیم داشت. پس از آن با ساختار هسته و پرتوزایی طبیعی آشنا می‌شویم.

۱-۴ اثر فوتوالکتریک و فوتون

اگر بر کلاهک برق‌نمایی با بار منفی، نور فرابنفشی تابیده شود، مشاهده می‌شود که انحراف ورقه‌های آن کاهش می‌یابد (شکل ۱-۴ الف) در حالی که با تابش نور مرئی، تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نما رخ نمی‌دهد (شکل ۱-۴ ب). چرا این پدیده اتفاق می‌افتد؟ آزمایش نشان می‌دهد وقتی نوری با بسامد

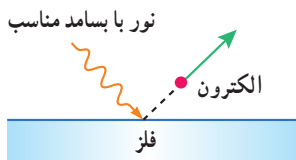


شکل ۱-۴ الف) برهم‌کنش نور فرودی فرابنفش با کلاهک برق‌نما سبب می‌شود تا ورقه‌های آن به سرعت به هم نزدیک شوند. **ب)** در حالی که برهم‌کنش نور مرئی گسیل شده از یک لامپ رشته‌ای تغییراتی در انحراف ورقه‌های برق‌نما به وجود نمی‌آورد.



آلبرت اینشتین (۱۹۵۵-۱۸۷۹ 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، ارائه نظریه نسبیت خاص بود که دربرگیرنده اندیشه‌های نو و انقلابی درباره ماهیت فضا و زمان بود. اینشتین همچنین در سال ۱۹۱۵ مقاله‌ای درباره نظریه نسبیت عام منتشر کرد. او در این مقاله نظریه جدیدی درباره گرانش ارائه کرد که نظریه نیوتون را به عنوان حالتی خاص دربرمی‌گرفت.



شکل ۴-۲ الکترون‌ها، انرژی نور فرودی را جذب می‌کنند و از سطح فلز خارج می‌شوند.

مناسب مانند نور فرابنفش به سطحی فلزی بتابد الکترون‌هایی از آن گسیل می‌شوند (شکل ۴-۲). این پدیده فیزیکی را، اثر فوتوالکتریک و الکترون‌های جدا شده از سطح فلز را فوتوالکترون می‌نامند.

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 دامنه 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 نظریه الکترومغناطیسی ماکسول این است که شدت نور با مربع دامنه میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($I \propto E^2$). به این ترتیب انتظار می‌رود به ازای 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.

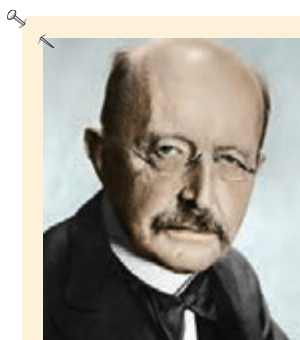
پس از نزدیک به ۲۰ سال که تلاش بسیاری از دانشمندان برای توجیه اثر فوتوالکتریک به کمک مفاهیم و قانون‌های فیزیک کلاسیک به نتیجه نرسیده بود در سال ۱۹۰۵ اینشتین توضیحی قانع‌کننده در مورد این اثر ارائه داد و جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۲۱ میلادی را به خاطر تبیین آن دریافت کرد. اینشتین در نظریه فوتوالکتریک خود با 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:

$$E = hf \quad (\text{انرژی فوتون}) \quad (۴-۱)$$

در این رابطه h ثابت پلانک نامیده می‌شود و به‌طور تجربی معلوم شده است که مقدار آن $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 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.

اگر بسامد نور تابیده شده بر سطح فلز از بسامدی موسوم به بسامد آستانه (که به جنس فلز بستگی دارد) کمتر باشد، فوتون‌ها، حداقل انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از فلز را ندارند و پدیده فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. همچنین برای نوری که فوتون‌های آن دارای حداقل انرژی لازم برای وقوع پدیده فوتوالکتریک هستند، افزایش شدت نور (با ثابت ماندن بسامد) فقط سبب افزایش تعداد فوتون‌ها و در نتیجه افزایش تعداد فوتوالکترون‌ها می‌شود، در حالی که انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها بدون تغییر می‌ماند.



ماکس پلانک (۱۹۴۷-۱۸۵۵ م.)

در سال ۱۸۸۵ دانشیار فیزیک نظری در دانشگاه کیل شد و علاوه بر تدریس، مقاله‌های مهمی درباره 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 آستانه 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 دوقلویش به دلایل متفاوتی از دنیا رفتند. پلانک در سال ۱۹۲۷، پس از حدود چهل سال سابقه دانشگاهی، از دانشگاه برلین بازنشسته شد.

۱- این نام را شیمی‌دان آمریکایی، گیلبرت لوئیس، در سال ۱۹۲۶ میلادی برای نخستین بار پیشنهاد کرد.

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 $q = -e = -1/60 \times 10^{-19} C$ ، 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:

$$|\Delta U| = |q\Delta V| = |(-1/60 \times 10^{-19} C)(1V)| = 1/60 \times 10^{-19} J$$

این مقدار انرژی را بنا به تعریف، یک الکترون ولت ($1eV = 1/60 \times 10^{-19} J$) 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 برحسب یکای eV.s نیز بیان کرد:

$$h = (6/63 \times 10^{-34} J.s) \left(\frac{1eV}{1/60 \times 10^{-19} J} \right) = 4/14 \times 10^{-15} eV.s$$

مثال ۱-۴

یک چشمه نور مرئی با توان $100 W$ ، فوتون‌هایی با طول موج $\lambda = 550 nm$ 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 ۱-۴ انرژی هر فوتون برابر است با:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

ابتدا مقدار hc را حساب می‌کنیم:

$$hc = (6/63 \times 10^{-34} J.s)(3/00 \times 10^8 m/s) = 19/9 \times 10^{-26} J.m$$

اگر J را برحسب eV و m را برحسب nm بنویسیم، خواهیم داشت:

$$hc = (19/9 \times 10^{-26} J.m) \left(\frac{1eV}{1/60 \times 10^{-19} J} \right) \left(\frac{1nm}{10^{-9} m} \right) = 1/24 \times 10^3 eV.nm$$

بنابراین در حل مسائل می‌توانیم مقدار hc را برابر $1240 eV.nm$ اختیار کنیم. خوب است این مقدار و یکای آن را به خاطر

بسپارید تا در صورت نیاز از آن استفاده کنید. به این ترتیب داریم:

$$E = \frac{1/24 \times 10^3 eV.nm}{550 nm} = 2/25 eV$$

ب) ابتدا انرژی تابش شده توسط لامپ را در هر ثانیه به دست می‌آوریم:

$$E = pt = (100 W)(1s) = 100 J = (100 J) \left(\frac{1eV}{1/60 \times 10^{-19} J} \right) = 6/25 \times 10^{20} eV$$

نسبت این انرژی به انرژی هر فوتون که در قسمت الف پیدا کردیم، شمار فوتون‌های گسیل شده از این چشمه را در هر ثانیه

$$n = \frac{6/25 \times 10^{20} eV}{2/25 eV} = 2/77 \times 10^{20}$$

به دست می‌دهد. به این ترتیب داریم:

این شمار زیاد فوتون، که در هر ثانیه از یک چشمه معمولی نور در فضای پیرامون آن گسیل می‌شود حاکی از آن است که در

زندگی روزمره آثار ناشی از این شمار بسیار زیاد فوتون برای ما ملموس نیست.

تمرین ۱-۴

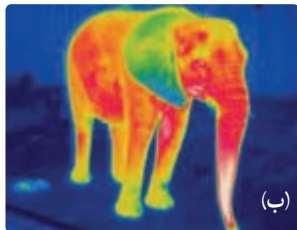
نوری با طول موج 240 nm به سطحی از جنس فلز تنگستن می‌تابد و سبب گسیل فوتوالکترون‌ها از آن می‌شود. الف) بسامد نور فرودی را پیدا کنید.

ب) اگر توان چشمه نور فرودی 5 W باشد، در هر دقیقه چه تعداد فوتون از این چشمه گسیل می‌شود؟

پ) اگر توان و در نتیجه شدت چشمه نور فرودی به نصف کاهش پیدا کند، شمار فوتون‌های گسیل شده از چشمه در هر دقیقه چه تغییری می‌کند؟



(الف)



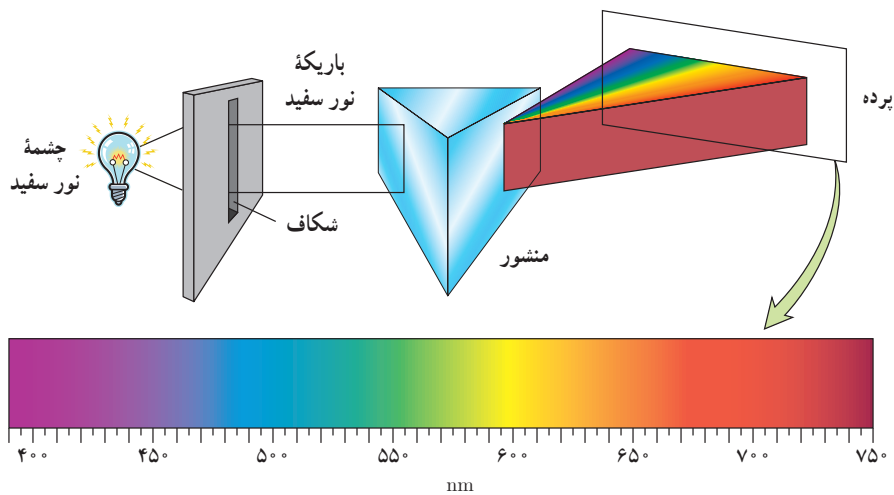
(ب)

شکل ۳-۴ الف) اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. ب) در دماهای معمولی، بیشتر تابش گسیل‌شده از سطح اجسام در ناحیه 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.

۲-۴ طیف خطی

در فیزیک ۱ دیدیم که همه اجسام در هر دمایی که باشند، از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل (نشر) می‌کنند که به آن تابش گرمایی گفته می‌شود (شکل ۳-۴). برای یک جسم جامد، نظیر رشته داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گستره پیوسته‌ای از طول موج‌هاست. به همین دلیل طیف ایجادشده در این شرایط را **طیف گسیلی پیوسته** یا به اختصار **طیف پیوسته** می‌نامند. بخشی از این طیف که در گستره مرئی طول موج‌ها واقع است در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، ناشی از برهم‌کنش قوی بین اتم‌های سازنده 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 طول موج‌های معینی است. این طیف گسسته را، معمولاً **طیف گسیلی خطی** یا به اختصار **طیف خطی** می‌نامند و طول موج‌های ایجادشده در آن، برای اتم‌های هر گاز منحصر



شکل ۴-۴ طیف گسیلی پیوسته نور سفید از رشته داغ یک لامپ روشن. در این شکل تنها بخش مرئی طیف نشان داده شده است که گستره طول موج آن از حدود 400 nm (نور بنفش) تا حدود 750 nm (نور قرمز) است.

به فرد هستند و سرخ‌های مهمی را دربارهٔ نوع و ساختار اتم‌های آن گاز به دست می‌دهند. دو نمونه آشنا از گازهای کم‌فشار و رقیق، در لامپ‌های نئون و لامپ‌های جیوه‌ای وجود دارد. شکل ۴-۵ قسمت‌های مرئی طیف‌های خطی این دو گاز را نشان می‌دهد. طول موج‌های مرئی خاصی که اتم‌های این گازها گسیل می‌کنند به تابلوهای نئونی و لامپ‌های جیوه‌ای رنگ‌های مشخصی می‌دهند.



شکل ۴-۵ طیف‌های گسیلی خطی برای نئون و جیوه

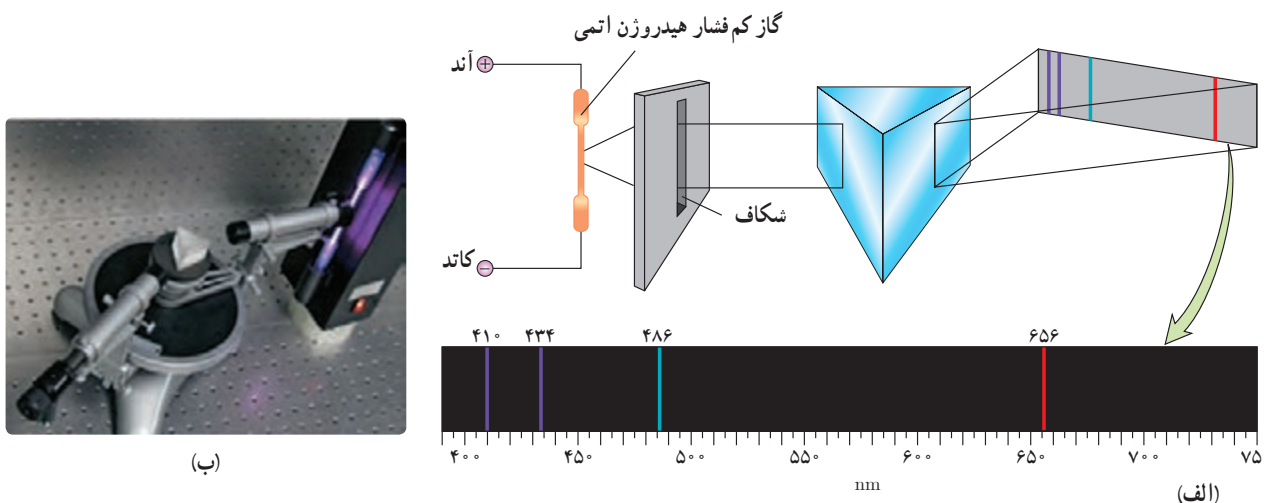


ژاکوب بالمر (۱۸۹۸-۱۸۲۵ م.)

ریاضی‌دان و فیزیک‌دان سوئیسی، در سال ۱۸۴۹ دورهٔ دکتری خود را در حوزهٔ ریاضیات در دانشگاه بازل به پایان رسانید. وی پس از پایان تحصیلات، در یک مدرسهٔ دخترانه و همچنین دانشگاه بازل مشغول به تدریس شد. مشهورترین کار بالمر در خصوص مطالعهٔ طیف اتمی گازها بود، به طوری که وی در سال ۱۸۸۵ و در سن ۶۰ سالگی موفق شد رابطه‌ای تجربی برای طیف گسیلی خطی اتم‌های هیدروژن ارائه دهد. این رابطه امروزه به نام وی معروف است. بالمر برای ارائهٔ این رابطه از داده‌های آنگستروم، فیزیک‌دان سوئدی، در خصوص اندازه‌گیری طول موج‌های طیف خطی هیدروژن اتمی در ناحیهٔ مرئی بهره گرفت.

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 کم‌فشار 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 تخلیهٔ 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 جنبهٔ تاریخی و هم از جنبهٔ نظری اهمیت خاصی دارد. طیف خطی این گاز در ناحیهٔ مرئی، شامل یک رشتهٔ منظم از خط‌هایی است که محل آنها در شکل ۴-۶ 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:

$$\lambda = (364 / 56 \text{ nm}) \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad \text{(معادلهٔ بالمر)} \quad (2-4)$$



شکل ۴-۶ الف) به کمک منشور، طول موج‌های گسیلی از گاز، از یکدیگر جدا و طیف خطی آن تشکیل شده است. ب) اسباب آزمایش تشکیل و مشاهدهٔ طیف گسیلی گازها



یوهانس رابرت ریدبرگ (۱۸۵۴-۱۹۱۹ م.) فیزیک‌دان و متخصص طیف‌سنجی، در سوئد به دنیا آمد. هنگامی که ۴ ساله بود پدرش از دنیا رفت و خانواده وی مجبور شدند با درآمد اندکی زندگی خود را سپری کنند. در سال ۱۸۷۳ دوره دبیرستان را با نمرات ممتاز در فیزیک و ریاضی به پایان رسانید و در همان سال در دانشگاه لاند ثبت نام کرد. وی در سال ۱۸۷۹ دوره دکتری خود را به پایان رساند. پس از آن به تدریس ریاضیات و فیزیک مشغول شد و در همین دوران بود که به مطالعه وزن استاندارد اتمی عناصر در جدول تناوبی مندلیف پرداخت. کار بعدی وی پژوهش درباره طیف اتمی گازها بود که به ارائه رابطه‌ای برای اصلاح معادله تجربی بالمر در خصوص طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی منجر شد. این رابطه امروزه به نام وی شناخته می‌شود. ریدبرگ در سال ۱۹۱۳ شدیداً بیمار شد و پس از یک دوره طولانی بیماری، در سال ۱۹۱۹ درگذشت.

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:

$$n = 3 \rightarrow \lambda_1 = 656/20 \text{ nm} \quad (\text{خط قرمز})$$

$$n = 4 \rightarrow \lambda_2 = 486/08 \text{ nm} \quad (\text{خط آبی})$$

$$n = 5 \rightarrow \lambda_3 = 434/00 \text{ nm} \quad (\text{خط بنفش})$$

بالمر با تأمل بیشتر روی رابطه ۲-۴، 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:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (\text{معادله ریدبرگ}) \quad (3-4)$$

که در آن R ثابت ریدبرگ و مقدار آن برابر $(\text{nm})^{-1} \cdot 10^9 \cdot 973731$ است و برای سادگی در محاسبه‌ها، مقدار آن را می‌توان $(\text{nm})^{-1} \cdot 10^7$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح مثبتی است که به ازای $n' = 2$ رابطه ۲-۴ 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 طول موج‌های 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 ۱-۴ نام این رشته‌ها، که به ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۱-۴ رشته خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطه ریدبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیه طیف
لیمان	۱۹۰۶-۱۹۱۴	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 ۲-۴

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشته بَرَاکِت ($n' = 4$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گستره طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند.

پاسخ: در رشته بَرَاکِت ($n' = 4$) و برای اولین و دومین خط طیفی به ترتیب $n = 5$ و $n = 6$ است. در این صورت با استفاده از رابطه ۳-۴ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2} \right) = R (2 / 25 \times 10^{-2}) \Rightarrow \lambda = 4077 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{6^2} \right) = R (3 / 472 \times 10^{-2}) \Rightarrow \lambda = 2642 \text{ nm}$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۳، مشاهده می‌کنیم که این خط‌های طیفی در ناحیه فروسرخ قرار دارند.

مثال ۳-۴

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 ۳-۴ 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:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{6^2} \right) = \frac{11R}{900} \Rightarrow \lambda = 7438 \text{ nm}$$

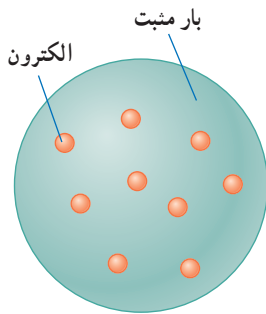
تمرین ۲-۴

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.

۳-۴ مدل اتم رادرفورد - بور



شکل ۴-۷ 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.

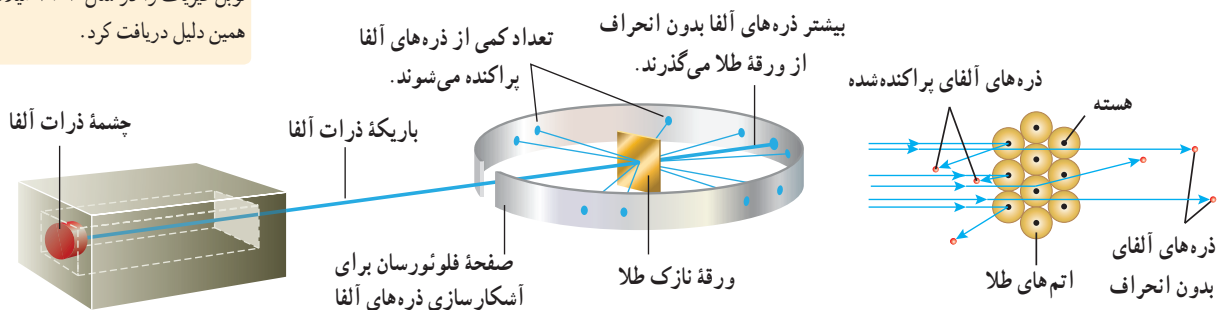


جوزف تامسون (۱۸۵۶-۱۹۴۰ م.)

یکی از فیزیک‌دانان بزرگ انگلیسی و استاد دانشگاه کمبریج بود. تامسون پس از کشف الکترون، مدیر آزمایشگاه کاوندیش شد؛ جایی که یکی از شاگردانش در آنجا ارنست رادرفورد بود. تامسون پس از چندین سال کار روی مدل اتمی، که برخی از ویژگی‌های شناخته‌شده اتم از جمله اندازه شعاع، جرم و خنثایی الکتریکی اتم را شامل می‌شد، مدلی موسوم به کیک کشمش را در اوایل قرن بیستم ارائه داد که برای چندین سال مورد پذیرش عموم دانشمندان قرار گرفت. تامسون همچنین روی ویژگی‌های رسانش الکتریکی گازها نیز کار می‌کرد و جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۰۶ میلادی به همین دلیل دریافت کرد.

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 ۴-۷).

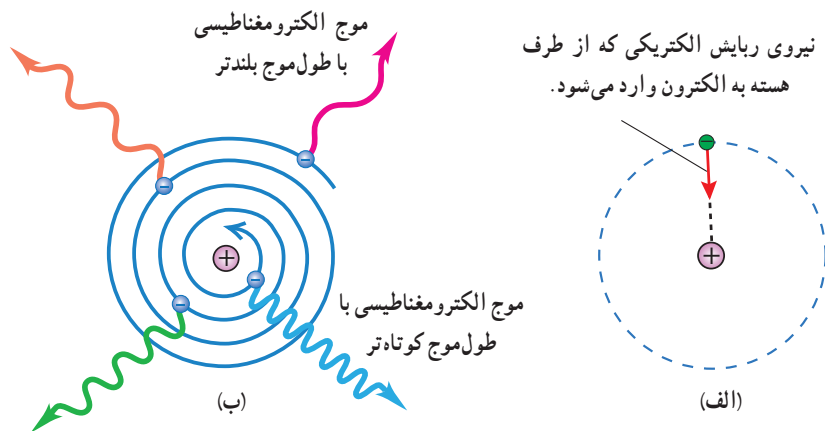
در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با بسامدهای معینی حول وضع تعادلشان نوسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از ناکامی‌های مدل تامسون این بود که بسامدهای تابش گسیل شده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود. وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی 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 هلیم که به آن ذره آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا فرو تاباندند (شکل ۴-۸). رادرفورد بنا بر 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 فلورسانس، 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 چیز پرجرمی 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 ۴-۸ آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقه نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله در یک اتاقک خلأ قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.

بنا بر مدل رادرفورد، اتم دارای یک هسته بسیار چگال و کوچک ($m \approx 10^{-15}$ 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 ۴-۹ 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 ۴-۹ ب). این نتیجه افزون بر اینکه با واقعیت ناسازگار است با طیف خطی گسیل شده توسط اتم‌ها نیز جور در نمی‌آید.



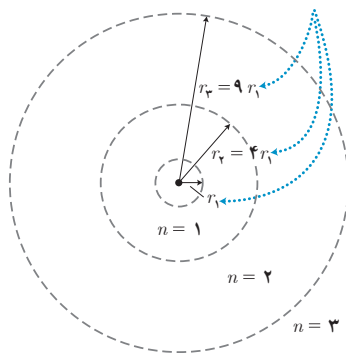
شکل ۴-۹ ناتوانی مدل اتم هسته‌ای رادرفورد در تبیین پایداری اتم. الف) اگر الکترون نسبت به هسته ساکن فرض شود بر اثر نیروی ربایش الکتریکی، روی هسته سقوط می‌کند. ب) اگر الکترون دور هسته بچرخد، طیفی پیوسته گسیل می‌کند و سرانجام روی هسته فرو می‌افتد.



ارنست رادرفورد (۱۸۷۱-۱۹۴۷ م.)

در نیوزلند متولد شد و بیشتر تحصیلات خود را در همان‌جا به انجام رساند. در ۲۴ سالگی به کمبریج رفت و کار خود را در آزمایشگاه کاوندیش زیر نظر تامسون آغاز کرد. سپس به دانشگاهی در کانادا رفت و پس از بازگشت وارد دانشگاه منچستر شد. رادرفورد در آزمایش‌هایی که به کمک 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.

شعاع مدارها با n^2 متناسب است.



شکل ۴-۱۰ 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 رادرفورد حل می‌کرد معادلهٔ ریدبرگ برای طیف خطی اتم هیدروژن را نیز نتیجه می‌داد. نظریهٔ بور با مدل اتم هسته‌ای رادرفورد، شروع می‌شد. بور با این پیشنهاد که «در مقیاس اتمی، قوانین مکانیک کلاسیک و الکترومغناطیس باید توسط قوانین دیگری جایگزین یا تکمیل شود» گامی بزرگ و جسورانه برای رفع مشکلات مدل رادرفورد برداشت. در ادامه با برخی از اصول و مفروضات مدل بور آشنا می‌شویم.

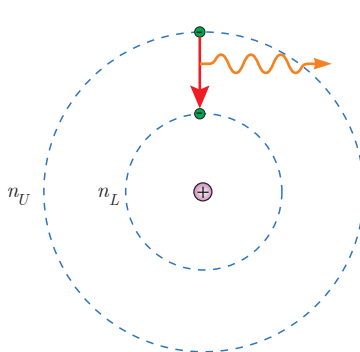
۱- مدارها و انرژی‌های الکترون‌ها در هر اتم کوانتیده‌اند؛ یعنی فقط مدارها و انرژی‌های گسستهٔ معینی مجاز هستند.

بور پس از محاسبات نسبتاً ساده‌ای نشان داد که شعاع این مدارها و انرژی الکترون برای اتم هیدروژن از رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$(4-4) \quad r_n = a_0 n^2 \quad (\text{شعاع مدارهای الکترون برای اتم هیدروژن})$$

$$(4-5) \quad E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (\text{ترازهای انرژی الکترون در اتم هیدروژن})$$

فوتون گسیل شده



شکل ۴-۱۱ بنا به مدل بور، وقتی الکترونی از مداری با انرژی بیشتر به مداری با انرژی کمتر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود.

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 (به‌ازای $n = 1$) و مقدار آن برابر $r_1 = a_0 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ 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 ۴-۱۰ 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.

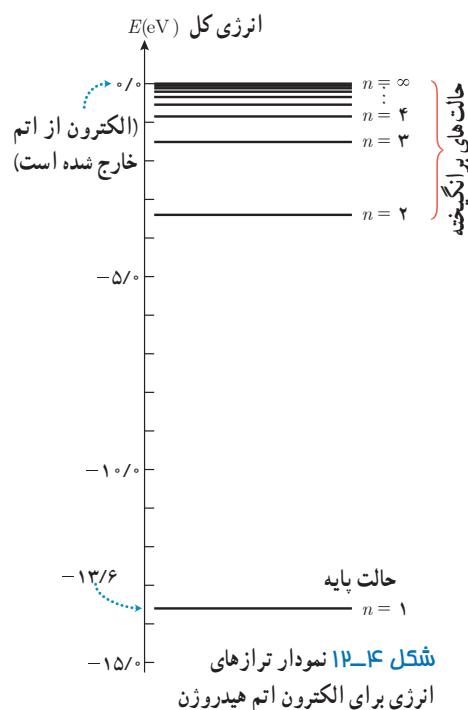
۳- الکترون می‌تواند از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_U به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_L ، یک فوتون تابش می‌شود (شکل ۴-۱۱). در این صورت انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین دو مدار اولیه و مدار نهایی

است، یعنی:

$$(4-6) \quad E_U - E_L = hf \quad (\text{معادلهٔ گسیل فوتون از اتم})$$

۱- زیر نویس U از سرحرف واژهٔ Up به معنای بالا و زیر نویس L از سرحرف واژهٔ Low به معنای پایین گرفته شده است.

نمودار ترازهای انرژی الکترون برای اتم هیدروژن: مفید است که مقادیر انرژی داده شده در معادله ۴-۵ را مانند شکل ۴-۱۲ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهیم. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n = \infty$ در معادله ۴-۵ مربوط است و دارای انرژی 0 eV است. برعکس، پایین ترین تراز انرژی مربوط به $n = 1$ است و دارای مقدار $-13/6 \text{ eV}$ 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.

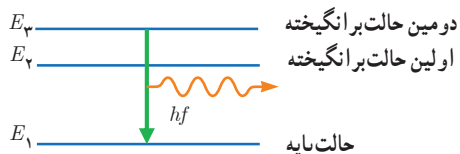


در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالا بردن الکترون از حالت پایه ($n = 1$) به بالاترین حالت برانگیخته ممکن ($n = \infty$) مقدار $13/6 \text{ eV}$ انرژی باید صرف شود. صرف این مقدار انرژی، الکترون را از اتم خارج می کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می شود. این کمترین انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه، **انرژی یونش الکترون** نامیده می شود. مقدار پیش بینی شده توسط مدل بور برای انرژی یونش اتم هیدروژن، توافق بسیار خوبی با مقدار تجربی دارد.

مثال ۴-۴

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 ۴-۵ 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 ۴-۶ داریم:

$$E_3 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_3 - E_1} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{-1/51 \text{ eV} - (-13/6 \text{ eV})} = 102 \text{ nm}$$

تمرین ۳-۴

- _____ 0 eV
 - _____ $-1/51 \text{ eV}$
 - _____ $-3/40 \text{ eV}$
 - _____ $-13/6 \text{ eV}$
- 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 $-1/51 \text{ eV}$ 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 (۱۹۶۲-۱۸۸۵ 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.

استخراج معادلهٔ ریذبرگ برای اتم هیدروژن از مدل بور: همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادلهٔ ریذبرگ 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 $۵-۴$ و $۶-۴$ ، 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:

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{۱۳/۶ \text{ eV}}{۱۲۴۰ \text{ eV} \cdot \text{nm}} = ۰/۰۱۰۹ (\text{nm})^{-1}$$

که این مقدار، با تقریب بسیار خوبی همان ثابت ریذبرگ R است که پیش از این با آن آشنا شدیم. به این ترتیب داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right)$$

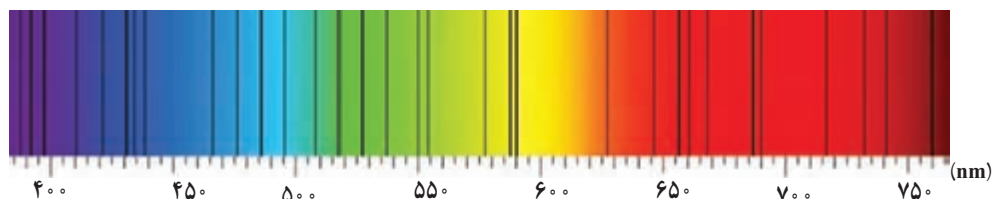
این رابطه همان معادلهٔ $۳-۴$ است که با اصلاح و بازنویسی معادلهٔ بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریذبرگ به دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطهٔ تجربی ریذبرگ را به دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_U = ۳$ به مدار $n_L = ۲$ می‌رود، طول موج فوتون گسیل شده برابر است با:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right) = ۰/۰۱۰۹ (\text{nm})^{-1} \left(\frac{1}{۲^2} - \frac{1}{۳^2} \right) \Rightarrow \lambda = ۶۶۰ \text{ nm}$$

مقدار به دست آمده به نحو چشمگیری به طول موج خط قرمز در رشتهٔ بالمر که از تجربه حاصل شده، نزدیک است.

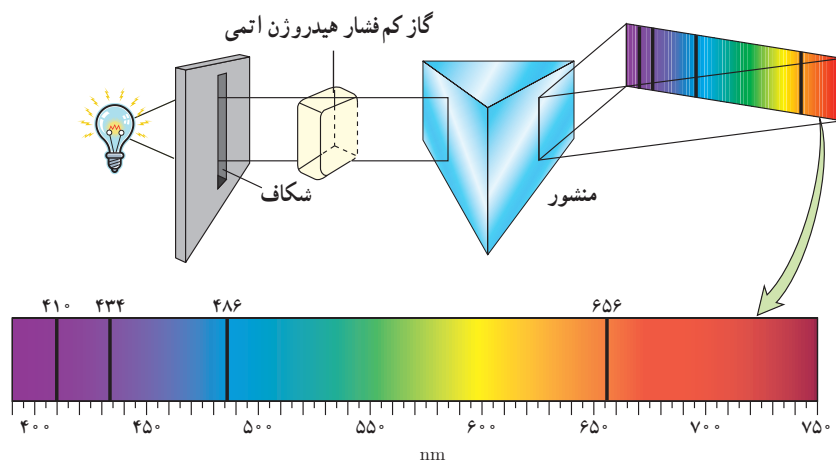
طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و مدل بور: در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانhofer، با مشاهدهٔ دقیق طیف خورشید، خط‌های تاریک نازکی را در آن کشف کرد^۱ (شکل $۴-۱۳$). این تجربه نشان می‌داد در تابشی که از خورشید گسیل می‌شود و به زمین می‌رسد بعضی از طول موج‌ها وجود ندارند. امروزه می‌دانیم بسیاری از خط‌های تاریکی که فرانhofer 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 ۴-۱۳ خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، به افتخار کشف‌کنندهٔ آن، خط‌های فرانhofer نامیده می‌شوند.



۱- از ویلیام ولاستون به‌عنوان نخستین کاشف این خط‌های تاریک نام می‌برند، ولی جوزف فرانhofer بود که این خط‌ها را به تفصیل مورد مطالعه قرار داد.

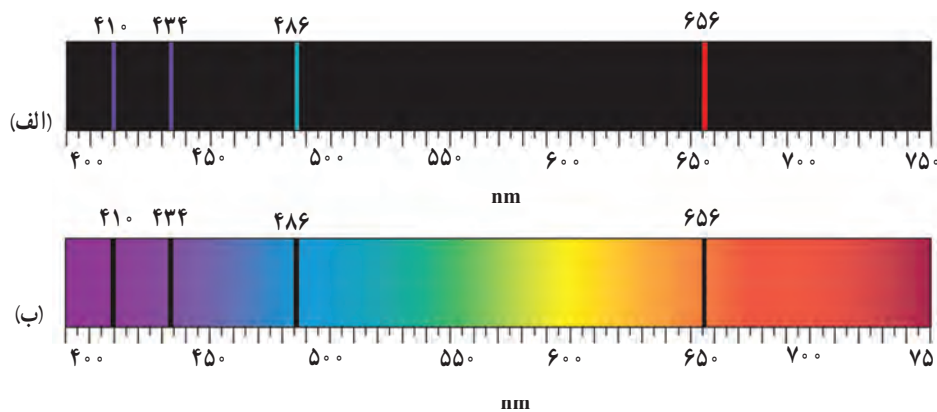
شکل ۴-۱۴ اسباب آزمایشی را به صورت طرح وار نشان می‌دهد که در آن باریکه نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم فشار هیدروژن می‌گذرد. با انجام این آزمایش بی می‌بریم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین کمان) با خط‌هایی تاریک درون آن مشاهده می‌شود که در آن بعضی از طول موج‌ها از نور سفید جذب شده‌اند.



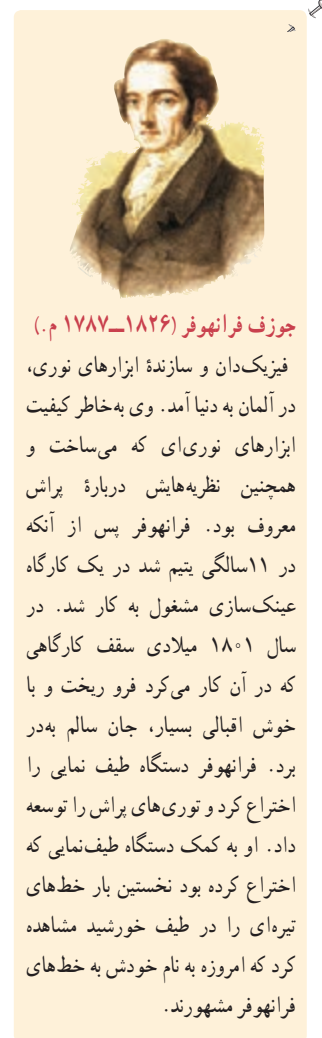
شکل ۴-۱۴ روشی برای مشاهده طیف‌های جذبی. یک چشمه نور سفید که گستره‌ای پیوسته از طول موج‌ها را تولید می‌کند، از ظرفی حاوی گاز کم فشار هیدروژن اتمی می‌گذرد و توسط منشور پاشیده می‌شود و طیف آن روی پرده تشکیل می‌شود. خط‌های تاریک روی طیف، به طول موج‌هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم‌های گاز جذب شده‌اند.

در اواسط قرن نوزدهم، آزمایش‌هایی مشابه آنچه بیان کردیم برای گازهای عناصر مختلف انجام شد. این آزمایش‌ها نشان می‌داد که اگر نور سفید از داخل گاز عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های گاز عنصر جذب شده‌اند. شکل ۴-۱۵، طیف گسیلی و طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد. مطالعه و مقایسه این دو طیف و همچنین طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که:

- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم‌های گاز هر عنصر، طول موج‌های معینی وجود دارد که از مشخصه‌های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازه کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می‌کنند.

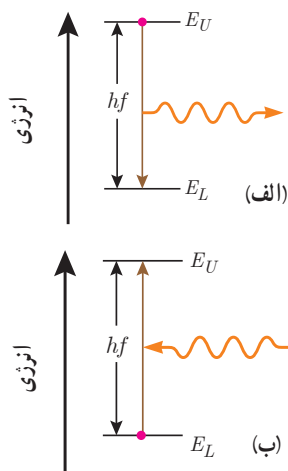


شکل ۴-۱۵ طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. الف) خط‌های روشن در طیف گسیلی معرف طول موج‌های گسیل شده و ب) خط‌های تاریک در زمینه طیف، معرف طول موج‌های جذب شده توسط اتم‌های گاز هستند.



جوزف فرانوفر (۱۷۸۷-۱۸۲۶ م.)

فیزیک‌دان و سازنده ابزارهای نوری، در آلمان به دنیا آمد. وی به‌خاطر کیفیت ابزارهای نوری‌ای که می‌ساخت و همچنین نظریه‌هایش دربارهٔ پراش معروف بود. فرانوفر پس از آنکه در ۱۱ سالگی یتیم شد در یک کارگاه عینک‌سازی مشغول به کار شد. در سال ۱۸۰۱ میلادی سقف کارگاهی که در آن کار می‌کرد فرو ریخت و با خوش اقبالی بسیار، جان سالم به‌در برد. فرانوفر دستگاه طیف‌نمایی را اختراع کرد و توری‌های پراش را توسعه داد. او به کمک دستگاه طیف‌نمایی که اختراع کرده بود نخستین بار خط‌های تیره‌ای را در طیف خورشید مشاهده کرد که امروزه به نام خودش به خط‌های فرانوفر مشهورند.



شکل ۴-۱۶ الف) فرایند گسیل فوتون
و ب) فرایند جذب فوتون توسط اتم



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 پسادکترای را در آزمایشگاه تابش^۱ و با تحقیق روی ساعت اتمی دنبال کرد. در سال ۱۹۵۸ به آزمایشگاه‌های تلفن پل^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 هریوت، موفق به ساخت اولین نمونه لیزر گازی هلیوم-نون در سال ۱۹۶۰ شد.

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 ۴-۱۶ 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 ۴-۱۶ 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 ۴-۱۴ 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 ۱-۴

آیا معادله ۴-۶ 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.

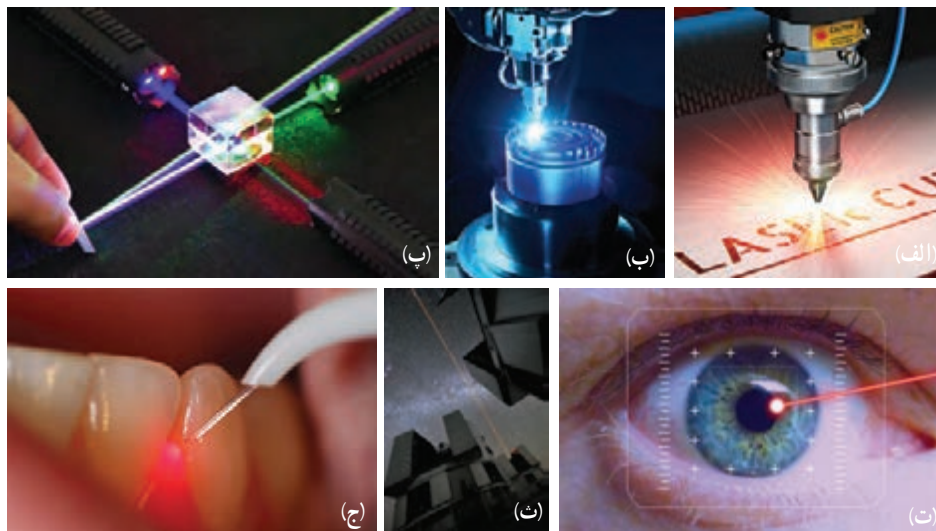
مدل بور به‌رغم موفقیت‌هایی که اشاره شد، نارسایی‌هایی نیز دارد که تنها به دو مورد از آنها اشاره می‌کنیم. این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است. همچنین این مدل نمی‌تواند متفاوت 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.

۱- Radiation Laboratory

۲- Bell Telephone Laboratories

۴-۴ 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 ۴-۱۷).

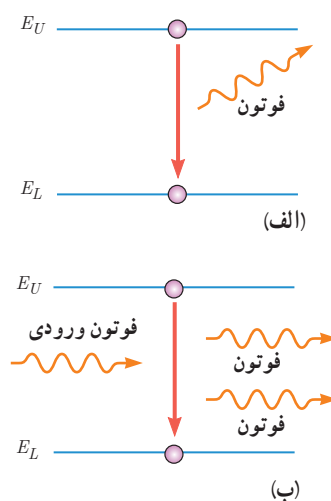


شکل ۴-۱۷ برخی از کاربردهای لیزر: (الف) در جوشکاری، (ب) در جوشکاری، (پ) در آزمایش‌های فیزیک و پژوهش‌های علمی، (ت) در چشم پزشکی، (ث) در نجوم، (ج) در دندانپزشکی

نخستین لیزر، موسوم به لیزر یاقوتی، را تفودور مایمن (۲۰۰۷-۱۹۲۷ م.) در سال ۱۹۶۰ میلادی ساخت. مدتی پس از آن و در همان سال، علی جوان و همکارانش موفق به ساخت نخستین لیزر گازی هلیوم نتون شدند.

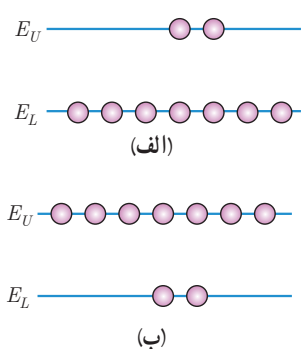
مطابق مدل اتمی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود. فرایند گسیل می‌تواند به صورت **گسیل خودبه‌خود** یا **گسیل القایی** باشد. در گسیل خودبه‌خود (شکل ۴-۱۸ الف) فوتون در جهتی کاتوره‌ای گسیل می‌شود. در حالی که در گسیل القایی (شکل ۴-۱۸ ب) که برای 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 ۴-۱۸ ب). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت می‌کند. دوم اینکه فوتون گسیل شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می‌کند. سوم اینکه فوتون گسیل شده



شکل ۴-۱۸ الف) گسیل خودبه‌خود ب) گسیل القایی

۱- واژه laser برگرفته از سرواژه‌های عبارت (light amplification by the stimulated emission of radiation) به معنای تقویت نور توسط گسیل القایی تابش است.



با فوتون ورودی همگام یا دارای همان فاز است. به این ترتیب فوتون‌هایی که باریکه لیزری را ایجاد می‌کنند هم‌سامد، هم‌جهت و هم‌فاز هستند.

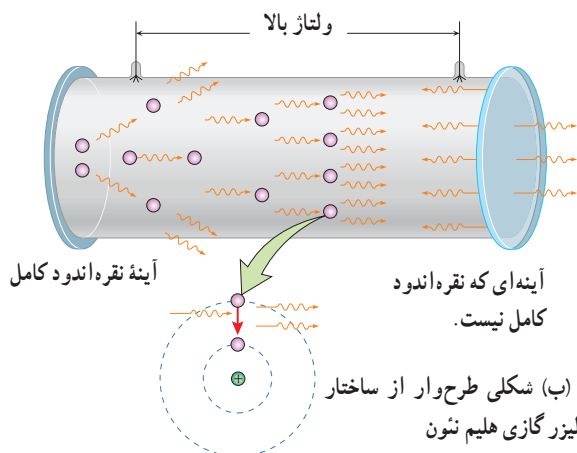
در گسیل القایی یک چشمه انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر برانگیخته کند. این انرژی می‌تواند به روش‌های متعددی از جمله درخش‌های شدید نور معمولی و یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم شود. اگر انرژی کافی به اتم‌ها داده شود، الکترون‌های بیشتری به تراز انرژی بالاتر برانگیخته خواهند شد، شرطی که به **وارونی جمعیت** معروف است (شکل ۴-۱۹).

شکل ۴-۱۹ (الف) به طور معمول و در دمای اتاق، بیشتر الکترون‌ها در تراز انرژی پایین‌تر قرار دارند. (ب) در وضعیتی که وارونی جمعیت به وجود آید بیشتر الکترون‌ها در تراز بالاتری (در مقایسه با تراز پایین‌تر) قرار دارند.

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 کم‌فشاری 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 دهند. بازده لیزرهای هلیم نئون بسیار کم و در حدود ۰/۱ تا ۰/۱ درصد است، ولی به دلیل کیفیت خوب باریکه لیزر ایجادشده، کاربرد زیادی در صنعت و فعالیت‌های علمی و آزمایشگاهی دارند.



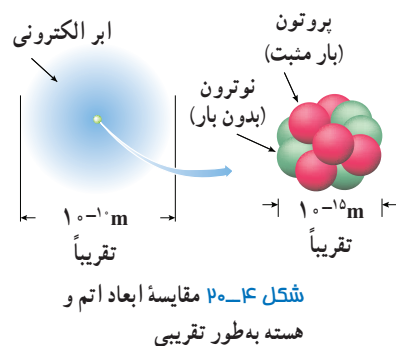
(الف) تصویری از لیزر گازی هلیم نئون

^۱ - Metastable

۴-۵ ساختار هسته

کشف پرتوزایی 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 ۴-۲).

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 ۴-۲). جرم اتم‌ها و همچنین اجزای تشکیل‌دهنده اتم را، افزون بر یکای کیلوگرم با یکای جرم اتمی نیز بیان می‌کنند.



جدول ۴-۲ برخی از ویژگی‌های فیزیکی ذرات تشکیل‌دهنده اتم

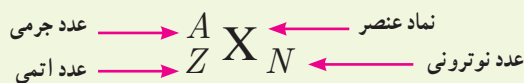
ذره	بار الکتریکی (C)	جرم	
		یکای جرم اتمی (u)*	کیلوگرم (kg)
الکترون	$-1/6 \times 10^{-19}$	$5/4858 \times 10^{-4}$	$9/109389 \times 10^{-31}$
پروتون	$+1/6 \times 10^{-19}$	۱/۰۰۷۲۷۶	$1/672622 \times 10^{-27}$
نوترون	۰	۱/۰۰۸۶۶۴	$1/674929 \times 10^{-27}$

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.

$$A = Z + N \quad (4-7)$$

تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها (عدد جرمی)
تعداد پروتون‌ها (عدد اتمی)
تعداد نوترون‌ها (عدد نوترونی)

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X ، نماد هسته به‌صورت زیر نشان داده می‌شود^۱:

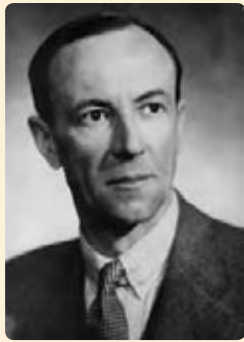


مشخص کردن N در نمادنویسی بالا ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از رابطه ۴-۷ به‌دست آورد. همچنین در بسیاری موارد Z را هم می‌توان ذکر نکرد؛ زیرا نماد شیمیایی عنصر، نشان‌دهنده مقدار Z است. برای مثال، هسته اتم آلومینیم را به‌جای ${}^{27}_{13}Al$ می‌توان به‌صورت ${}^{27}Al$ یا ${}^{27}Al$ نمایش داد.

۱- در کتاب‌های تخصصی فیزیک هسته‌ای، این نماد را نماد نوکلئید (nuclide) می‌نامند.

* در شیمی ۱ دیدید $\frac{1}{12}$ جرم اتم کربن ۱۲ را یکای جرم اتمی (atomic mass unit) می‌نامند و آن را به‌اختصار با amu یا u نشان می‌دهند. بنا به این تعریف، جرم اتم کربن ۱۲، دقیقاً برابر $12/0000000000$ است.

هانری بکرل (۱۸۵۲-۱۹۰۸ م.)
 فیزیک‌دان فرانسوی در سال ۱۸۹۲ به‌عنوان استاد موزه ملی تاریخ طبیعی پاریس انتخاب شد. وی نخستین دانشمندی است که - در سال ۱۸۹۶ و در حالی که مشغول بررسی خاصیت فسفرسانس نمک‌های اورانیم بود - پدیده پرتوزایی را کشف کرد. بکرل در سال ۱۹۰۳، به‌همراه ماری کوری و پیر کوری جایزه نوبل فیزیک را به‌خاطر کشف پرتوزایی طبیعی دریافت کرد. به افتخار فعالیت‌های وی در زمینه پرتوزایی، یکای SI برای فعالیت پرتوزایی، بکرل (Bq) نام‌گذاری شده است.



جیمز چادویک (۱۹۲۴-۱۸۹۱ 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.

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}C)، و دیگری از آنها از ۶ پروتون و ۷ نوترون (^{13}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 ۴-۳).

جدول ۴-۳ ایزوتوپ‌های مختلف چند عنصر و درصد فراوانی آنها در طبیعت

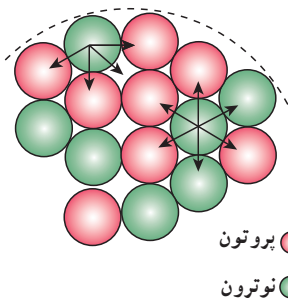
نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت	نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت
هیدروژن ۱	H	۱	۰	۹۹/۹۸۸۵	کربن ۱۳	^{13}C	۶	۷	۱/۰۷
دوتریم (هیدروژن ۲، ^2H)	D	۱	۱	۰/۰۱۱۵	کربن ۱۴	^{14}C	۶	۸	یافت نمی‌شود
تریتیم (هیدروژن ۳، ^3H)	T	۱	۲	بسیار نادر	اورانیم ۲۳۵	^{235}U	۹۲	۱۴۳	۰/۷۱۶
کربن ۱۲	^{12}C	۶	۶	۹۸/۹۳	اورانیم ۲۳۸	^{238}U	۹۲	۱۴۶	۹۹/۲۸۴

تمرین ۴-۴

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

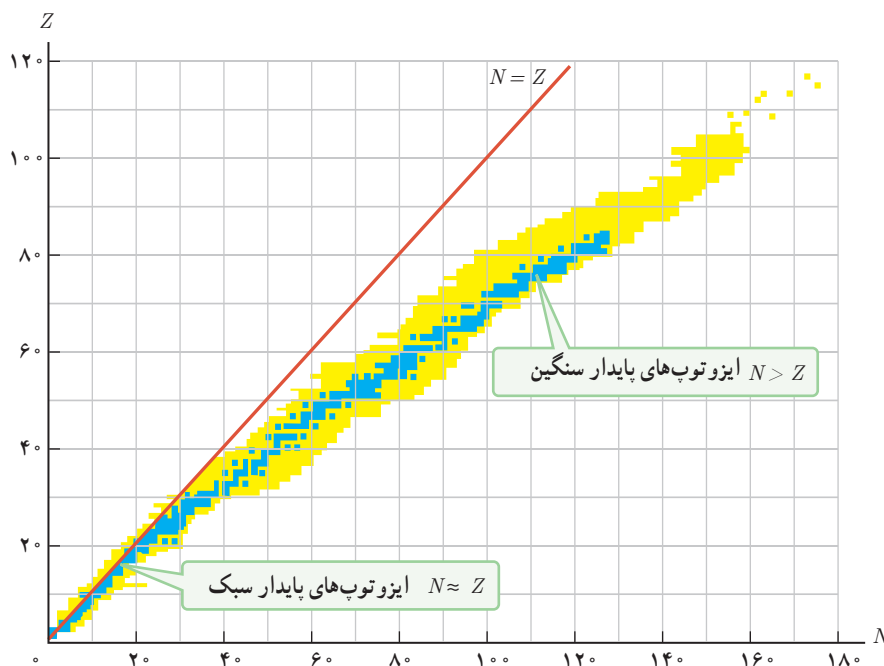
ب) ایزوتوپ قلع (Sn) با عدد نوترونی ۶۶



● پروتون
 ● نوترون

پایداری هسته: همان‌طور که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است ابعاد هسته در مقایسه با ابعاد اتم بسیار کوچک‌تر است. با وجود این، بیشتر جرم اتم (بیش از ۹۹/۹ درصد آن) در هسته متمرکز شده است. محاسبه نشان می‌دهد مرتبه بزرگی چگالی هسته 10^{14}g/cm^3 است که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (برای مقایسه توجه کنید که چگالی آب 1g/cm^3 است). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که به اندازه نیروی الکتروستاتیکی رانشی خیلی قوی بین پروتون‌های درون هسته، که بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند، توجه کنیم. در این صورت چه چیزی مانع از هم پاشیدن هسته می‌شود؟ با توجه به پایداری بسیاری از هسته‌هایی که در طبیعت وجود دارند روشن است که نوعی نیروی جاذبه باید اجزای هسته را کنار هم نگه دارد. از طرفی، جاذبه حاصل از نیروی گرانشی بین نوکلئون‌ها، چنان ضعیف است که نمی‌تواند با نیروی الکتروستاتیکی رانشی مقابله کند. این موضوع وجود نیروی جدیدی بین نوکلئون‌ها را مطرح کرد که به آن **نیروی هسته‌ای** گفته می‌شود.

نیروی هسته‌ای، کوتاه‌برد است و تنها در فاصله‌ای کوچک‌تر از ابعاد هسته اثر می‌کند (شکل ۲۱-۴). افزون بر این، نیروی هسته‌ای مستقل از بار الکتریکی است، یعنی نیروی ربایشی هسته‌ای یکسانی بین دو پروتون، دو نوترون، یا یک پروتون و یک نوترون وجود دارد. به همین دلیل از منظر نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد و دلیل نام‌گذاری آنها با نام عام نوکلئون نیز همین است. برای پایداری هسته، باید نیروی دافعه الکتروستاتیکی بین پروتون‌ها با نیروی جاذبه بین نوکلئون‌ها، که ناشی از نیروی هسته‌ای است، موازنه شده باشد. ولی به دلیل بلندبرد بودن نیروی الکتروستاتیکی، یک پروتون تمام پروتون‌های دیگر درون هسته را دفع می‌کند، در حالی که یک پروتون یا یک نوترون، فقط نزدیک‌ترین نوکلئون‌های مجاور خود را با نیروی هسته‌ای جذب می‌کند. به همین دلیل وقتی تعداد پروتون‌های درون هسته افزایش یابد، اگر هسته بخواهد پایدار باقی بماند، باید تعداد نوترون‌های درون هسته نیز افزایش یابد. شکل ۴-۲۲ نموداری از Z برحسب N را برای عنصرهای مختلف نشان می‌دهد. هسته پایدار با بیشترین تعداد پروتون ($Z = 83$)، متعلق به بیسموت (${}^{209}_{83}\text{Bi}$) است. 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.



شکل ۴-۲۲ نمودار تغییرات Z برحسب N برای هسته‌های پایدار و پرتوزا. هر نقطه آبی رنگ نشان‌دهنده یک هسته پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته‌های پرتوزای شناخته شده را نشان می‌دهند.

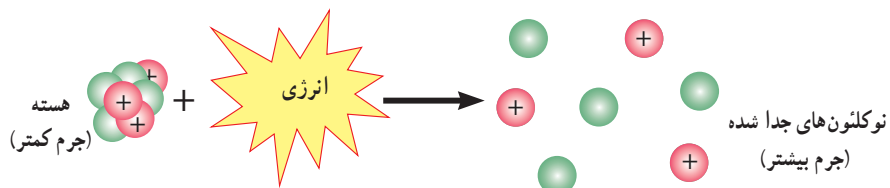
پوشش ۴-۲

هر نقطه آبی رنگ در نمودار شکل ۴-۲۲ 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 ۴-۲۳ این موضوع را به طور طرح‌وار نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل دهنده‌اش 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 تندى نور (c^2) ضرب کنیم **انرژی بستگی هسته‌ای** به دست می‌آید. توجه کنید که هرچند اختلاف جرم هسته با مجموع جرم نوکلئون‌های تشکیل دهنده 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.



شکل ۴-۲۳ انرژی‌ای معادل انرژی بستگی هسته‌ای باید تأمین شود تا هسته به نوکلئون‌های تشکیل دهنده آن تقسیم شود.

انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کواتیده‌اند 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 ${}^A_Z X$ به صورت ${}^A_Z X^*$ 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.

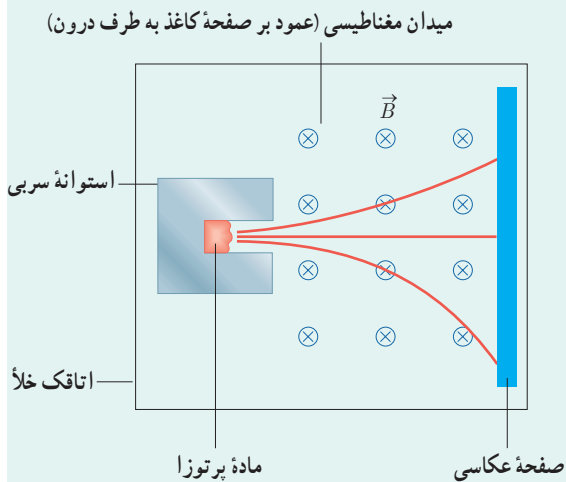
۴-۶ پرتوزایی طبیعی و نیمه عمر

همان‌طور 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 خودبه‌خود) واپاشی می‌کند، نوع معینی از ذرات یا فوتون‌های پرتوزایی آزاد می‌شوند. این فرایند واپاشی، **پرتوزایی طبیعی** نامیده می‌شود.

۱- آموزش محاسبه انرژی بستگی هسته خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

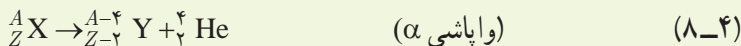
در پرتوزایی طبیعی سه نوع پرتو ایجاد می‌شود: پرتوهای آلفا (α)، پرتوهای بتا (β) و پرتوهای گاما (γ). پرتوهای α کمترین نفوذ را دارند و با ورقه نازک سربی با ضخامت ناچیز ($\approx 0.1 \text{ mm}$) متوقف می‌شوند، در حالی که پرتوهای β مسافت خیلی بیشتری را ($\approx 1 \text{ mm}$) در سرب نفوذ می‌کنند. پرتوهای γ بیشترین نفوذ را دارند و می‌توانند از ورقه‌ای سربی به ضخامت قابل ملاحظه‌ای ($\approx 100 \text{ mm}$) بگذرند. در تمام فرایندهای واپاشی پرتوزا مشاهده شده است که تعداد نوکلئون‌ها در طی فرایند واپاشی هسته‌ای پایسته است؛ یعنی تعداد نوکلئون‌ها، پیش از فرایند با تعداد نوکلئون‌ها پس از فرایند مساوی است.

پرسش ۳-۴

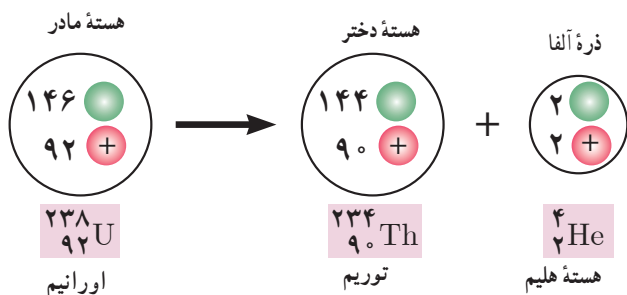


شکل روبه‌رو طرح آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان سه نوع پرتوزایی طبیعی را مشاهده کرد و به تفاوت بار و جرم پرتوها از یکدیگری برد. قطعه‌ای از ماده پرتوزا را در ته حفره باریکی در یک استوانه سربی قرار می‌دهند. استوانه را درون اتاقکی می‌گذارند و هوای درون آن را تخلیه می‌کنند. سپس یک صفحه عکاسی مقابل حفره قرار می‌دهند و میدان مغناطیسی یکنواختی درون اتاقک برقرار می‌کنند. خطوط قرمز رنگ، مسیر حرکت پرتوها را نشان می‌دهد. نوع بار پرتوها را با هم مقایسه کنید.

واپاشی α : در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هسته ${}^A_Z X$ با گسیل ذره آلفا و امی پاشد. شواهد تجربی نشان می‌دهند که پرتوهای α ، ذرات باردار مثبت از جنس هسته اتم هلیم (${}^4_2\text{He}$) هستند و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده‌اند. واپاشی α با رابطه زیر بیان می‌شود:



در این رابطه X هسته مادر و Y هسته دختر نامیده می‌شود. شکل ۴-۲۴، مثالی از واپاشی آلفا، برای اورانیم ۲۳۸ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۴-۲۴ در واپاشی α یک هسته مادر ناپایدار، ذره α گسیل می‌کند و هسته متفاوتی (هسته دختر) به وجود می‌آید.



عکسی تاریخی از خانواده‌ای که همه آنها نوبل گرفتند.

ماری کوری (۱۸۶۷-۱۹۳۴ م.)

پیر کوری (۱۸۵۴-۱۹۰۶ م.)

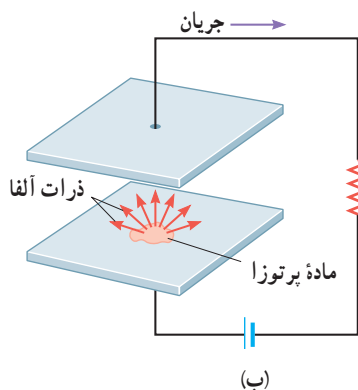
ایرن کوری (۱۸۹۷-۱۹۵۶ م.)

ماری کوری فیزیک‌دان و شیمی‌دان 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 (به‌طور 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.

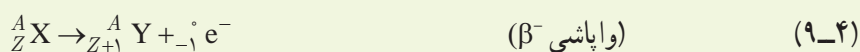
ذره‌های آلفا، سنگین‌اند و بار مثبت دارند. بُرد این ذره‌ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۱ تا ۲ سانتی‌متر) و یا با عبور از لایه‌ای نازک از مواد جذب می‌شوند. اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند. بنابراین، باید مراقب بود که مواد آلفازا هرگز وارد بدن نشوند.

فناوری و کاربرد: واپاشی آلفا و آشکارسازهای دود

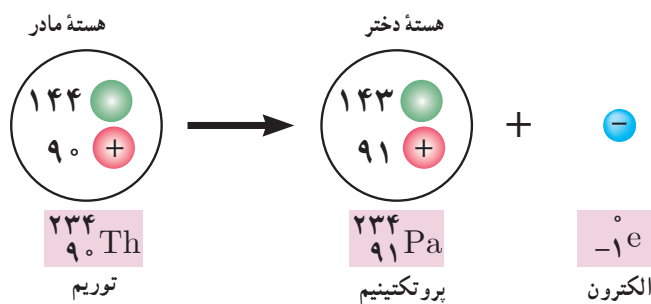
یکی از کاربردهای گسترده واپاشی α در آشکارسازهای دود است (شکل الف). شکل ب، مدار و بخش اصلی یک آشکارساز دود را نشان می‌دهد. دو صفحه کوچک و موازی فلزی در فاصله حدود یک سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. مقدار اندکی ماده پرتوزا را که ذرات α گسیل می‌کند در وسط یکی از صفحه‌ها می‌گذارند. ذرات α با مولکول‌های 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 مدار 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 ۴-۲۵ مثالی از واپاشی β^- ، برای توریم $^{234}_{90}\text{Th}$ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۴-۲۵ واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذره β^- گسیل می‌شود.



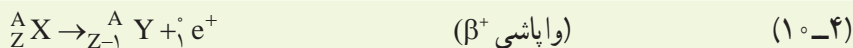
چی ان - شی تونگ وو (۱۹۱۲-۱۹۹۷ م.)

را از زمرهٔ برجسته‌ترین فیزیک‌دان‌های قرن بیستم می‌دانند که در ۱۹۱۲ در شهری در حوالی شانگهای چین به دنیا آمد. آزمایش‌های پیشگامانه‌ای که در مورد واپاشی بتا و برهم‌کنش‌های هسته‌ای انجام داد، زمینهٔ لازم را برای توسعهٔ مدل‌های جدید فیزیک زیراتمی فراهم کرد. وی نظریهٔ واپاشی بتا را که توسط فرمی ارائه شده بود به‌طور تجربی به تأیید رساند. چی ان - شی تونگ اولین زنی بود که در سال ۱۹۷۵ میلادی به سمت رئیس انجمن فیزیک آمریکا برگزیده شد. زندگی فوق‌العادهٔ او را با شعری قدیمی به زبان چینی توصیف می‌کنند: «اگرچه راهی طولانی و پر فراز و نشیب در پیش دارم، قاطعانه می‌خواهم تا انتهای آن را ببیمایم.»

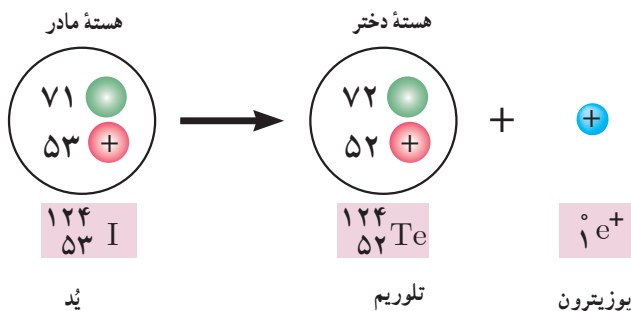
تمرین ۴-۵

لوتیم ($^{176}_{71}\text{Lu}$) عنصر پرتوزایی است که با گسیل بتای منفی، واپاشی می‌کند. معادلهٔ 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، ذرهٔ گسیل شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار $-e$ حامل بار $+e$ است. به این الکترون مثبت، پوزیترون می‌گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می‌شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می‌دهد این است که یکی از پروتون‌های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می‌شود. فرایند واپاشی β^+ با رابطهٔ زیر بیان می‌شود^۱.



شکل ۴-۲۶ مثالی از واپاشی β^+ ، برای ید $^{124}_{53}\text{I}$ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.

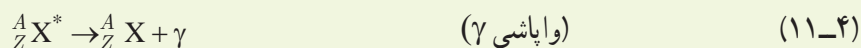


شکل ۴-۲۶ واپاشی β^+ وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار، به نوترون و پوزیترون تبدیل شود. پوزیترون به صورت ذره β^+ گسیل می‌شود.

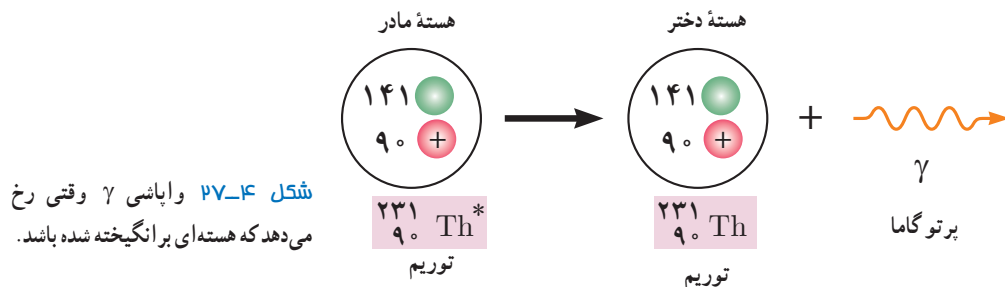
۱- در واپاشی β^+ ، ذره‌ای دیگر به نام نوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^A_Z X \rightarrow ^A_{Z-1} Y + ^0_{+1} e^+ + \bar{\nu}$). همچنین در واپاشی β^- ، ذره‌ای دیگر به نام پادنوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^A_Z X \rightarrow ^A_{Z+1} Y + ^0_{-1} e^- + \nu$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

ایزوتوپ (^{15}O) با گسیل پوزیترون، واپاشی می‌کند. معادلهٔ این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

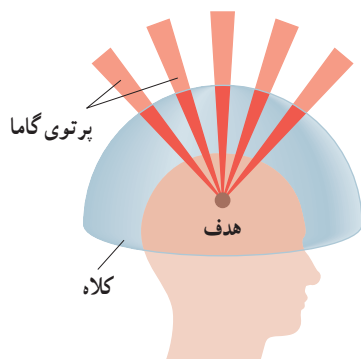
واپاشی γ : اغلب هسته‌ها پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته قرار می‌گیرند و با گسیل فوتون‌های پر انرژی (پرتو گاما) به حالت پایه می‌رسند. در این فرایند، Z و A تغییر نمی‌کنند؛ بلکه هستهٔ برانگیخته که با علامت * مشخص شده است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد. واپاشی γ با رابطهٔ زیر بیان می‌شود.



شکل ۴-۲۷ مثالی از واپاشی γ ، برای توریم ۲۳۱ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



جراحی با پرتوهای گاما



(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.

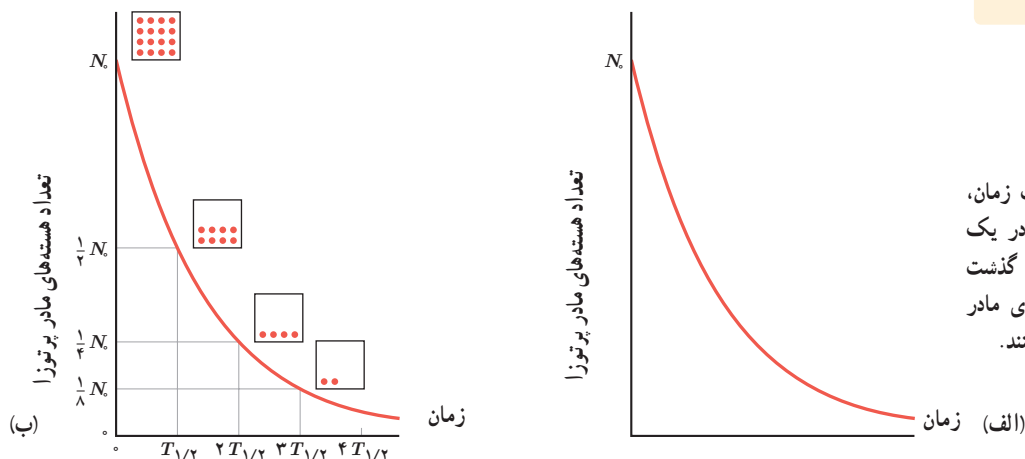
جراحی با پرتوهای گاما، روش پزشکی نویدبخشی است که در سال‌های اخیر برای درمان مشکلات خاصی در مغز، از جمله تخریب غده‌های خوش‌خیم و سرطانی و نیز رفع نقص‌ها در رگ‌های خونی استفاده می‌شود. در این روش که از هیج چاقویی استفاده نمی‌شود، از باریکه‌های بسیار متمرکز و توانمندی از پرتوهای گاما که متوجه غده و نقص در رگ‌ها می‌شود بهره می‌گیرند. پرتوهای γ توسط چشمهٔ 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 این رو 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.

نیمه عمر: 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.



روزالیند یالو (۱۹۱۱-۲۰۱۱ م.) فیزیک‌دان آمریکایی، پس از دریافت دکترای فیزیک هسته‌ای، در زمینه کاربرد ایزوتوپ‌های پرتوزا در پزشکی تحقیق کرد. وی روش ایمنی‌سنجی تابشی را ابداع کرد، که در آن از ردیاب‌های پرتوزا برای اندازه‌گیری مقادیر کم مواد در خون یا سایر شماره‌ها استفاده می‌شود. اهمیت این روش با اعطای جایزه نوبل پزشکی در سال ۱۹۷۷ به وی بیشتر مشخص شد.

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 برحسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۴-۲۸ 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 برسد (شکل ۴-۲۸ ب). برخی از ایزوتوپ‌ها مانند اورانیم ^{238}U ، دارای نیمه‌عمری در حدود سن زمین (۴/۵ میلیارد سال) هستند. این عناصر منشأ پرتوزایی طبیعی در محیط پیرامون ما هستند.



شکل ۴-۲۸ الف) با گذشت زمان، تعداد هسته‌های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می‌یابد. ب) با گذشت هر نیمه‌عمر، نیمی از هسته‌های مادر پرتوزای باقی‌مانده واپاشی می‌کنند.

مثال ۴-۵

در حادثه انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، ^{131}I (۱۳۱)، یکی از ایزوتوپ‌هایی بود که وارد محیط زیست شد. این ایزوتوپ، فرار 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 محیط زیست باقی مانده بود؟

پاسخ: نیمه‌عمر ایزوتوپ ^{131}I برابر ۸ روز است و ۴۰ روز را معادل ۵ نیمه‌عمر ^{131}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 محیط زیست 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:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (\text{تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده}) \quad (۱۲-۴)$$

که در آن n از رابطه $\frac{t}{T_{1/2}}$ به دست می‌آید^۱.

تمرین ۴-۷

پس از گذشت ۹ روز، تعداد هسته‌های پرتوزای یک نمونه، به $\frac{1}{8}$ تعداد موجود در آغاز کاهش یافته است. نیمه عمر (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 نیمه عمر 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.

۴-۱ 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 هلیم 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؟

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

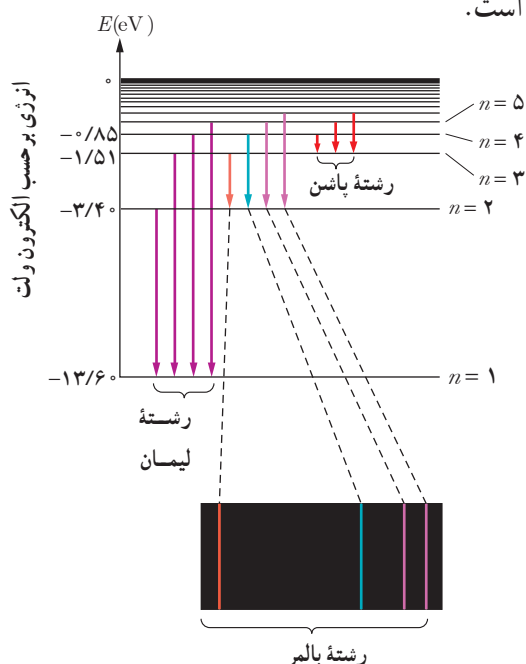
پ) کاهش شدت نور فرودی در بسامدهای بزرگ‌تر از بسامد آستانه

۴-۲ و ۴-۳ طیف خطی و مدل اتم رادرفورد - بور

۷. 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.

۸. شکل زیر سه رشته طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را روی نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد که بر اساس مدل اتمی بور رسم شده است.



الف) منظور از $n=1$ و انرژی -13.6eV 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.

۱۱. 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:

$$\Delta E(4 \rightarrow 2) = \Delta E(4 \rightarrow 3) + \Delta E(3 \rightarrow 2)$$

$$\Delta E(4 \rightarrow 1) = \Delta E(4 \rightarrow 2) + \Delta E(2 \rightarrow 1)$$

۱۲. 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؟

۴-۴ لیزر

۱۳. شکل زیر فرایند ایجاد باریکه لیزر را به طور طرح‌وار در ۴ مرحله نشان می‌دهد.

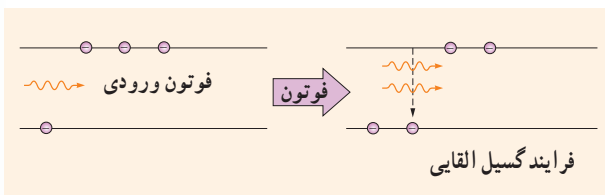
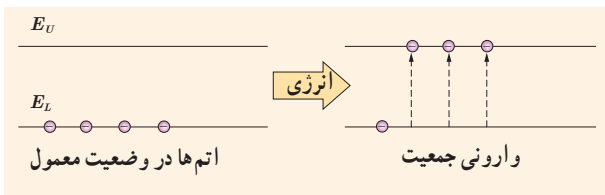
الف) منظور از عبارت «اتم‌ها در وضعیت معمول» چیست؟

ب) نقش انرژی داده‌شده چیست و معمولاً این انرژی چگونه تأمین می‌شود؟

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 پایین‌تر ایجاد می‌شوند چه ویژگی‌های مشترکی دارند؟



۴. 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 فلوئورسانسی است. آزمایش نشان می‌دهد در پدیده فلوئورسانسی طول‌موج‌های گسیل‌یافته معمولاً برابر همان طول‌موج نور فرودی یا بزرگ‌تر از آن است. این پدیده را چگونه به کمک مدل بور می‌توانید تبیین کنید؟

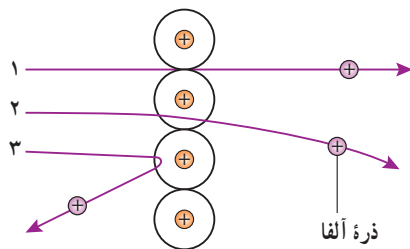
۱۰. مبنای مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که از پراکندگی ذره‌های آلفا توسط یک ورقه نازک طلا به دست آمده بود (شکل الف).

الف) توضیح دهید چرا بیشتر ذره‌های آلفا مانند ذره‌های ۱ و ۲ یا اصلاً منحرف نمی‌شوند یا به مقدار کمی منحرف می‌شوند.

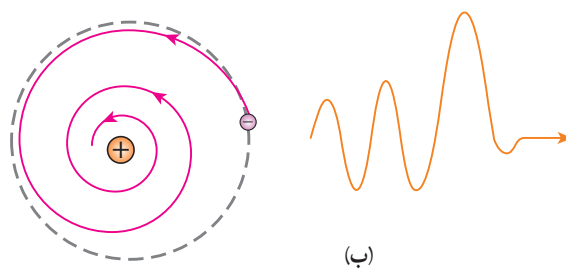
ب) تنها تعداد بسیار کمی از ذره‌ها مانند ذره ۳ منحرف می‌شوند. این امر چه نکته‌ای را درباره ساختار اتم طلا نشان می‌دهد؟

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؟



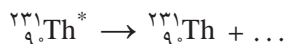
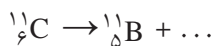
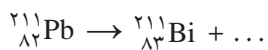
(الف)



(ب)

۴-۶ پرتوزایی طبیعی و نیمه عمر

۱۹. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان دهنده یک یا چند ذره α ، β^+ یا β^- است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.



۲۰. هسته دختر به دست آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به صورت

${}^A_Z\text{X}$ مشخص کنید.

الف) ${}_{94}^{242}\text{Pu}$ واپاشی α انجام دهد.

ب) سدیم ${}_{11}^{24}\text{Na}$ واپاشی β^- انجام دهد.

پ) نیتروژن ${}_{7}^{13}\text{N}$ واپاشی β^- انجام دهد.

ت) ${}_{8}^{15}\text{O}$ واپاشی β^+ انجام دهد.

۲۱. سرب ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ 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 ${}^A_Z\text{X}$ مشخص کنید.

۲۲. نپتونیم ${}_{93}^{237}\text{Np}$ ایزوتوپی است که در راکتورهای هسته‌ای

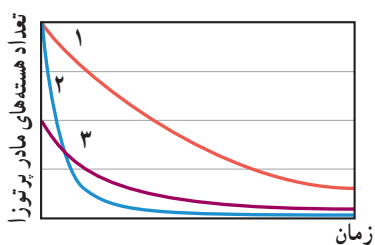
تولید می‌شود. این ایزوتوپ ناپایدار است و واپاشی آن از طریق

گسیل ذرات α ، β^- ، α ، α صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام

این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هسته نهایی چقدر است؟

۲۳. شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزای سه

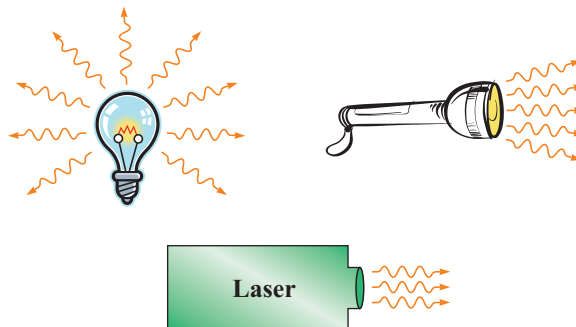
نمونه را برحسب زمان نشان می‌دهد. نیمه عمر این سه نمونه را با هم مقایسه کنید.



۱۴. 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 می‌شود که هیچ‌گاه به طور مستقیم به باریکه نور ایجادشده توسط لیزر نگاه نکنید؟



۴-۵ ساختار هسته

۱۵. تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان 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 $1.6 \times 10^{-16}\text{m}$ و $1.67 \times 10^{-27}\text{kg}$)

در نظر بگیرید.

۱۶. برای ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ مطلوب است:

الف) تعداد نوکلئون‌ها ب) تعداد نوترون‌ها

پ) بار الکتریکی خالص هسته

۱۷. 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) ${}_{78}^{195}\text{X}$ ب) ${}_{16}^{32}\text{X}$ پ) ${}_{29}^{61}\text{X}$

۱۸. آیا می‌توان ایزوتوپ ${}_{6}^{12}\text{X}$ را با روش شیمیایی از ایزوتوپ

${}_{6}^{13}\text{X}$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ ${}_{6}^{14}\text{Y}$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح

دهید.

موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ است.

وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر 5730 سال رو به کاهش می‌گذارد.

کربن ۱۴ موجود در یک نمونه زغال قدیمی، $1/56$ درصد (معادل $\frac{1}{67}$) مقدار عادی کربن ۱۴ موجود در زغالی است که

تازه تولید شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

۲۵. نیمه‌عمر بیسموت ۲۱۲ حدود 60 دقیقه است. پس از

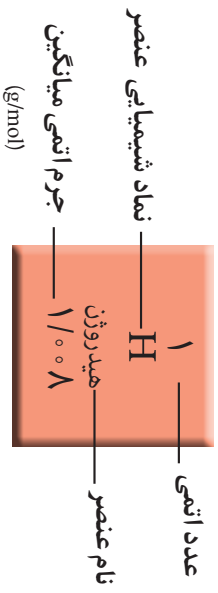
گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه، در نمونه‌ای از

این بیسموت، باقی می‌ماند؟

۲۴. هنگامی که نیتروژن جو زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ با آهنگ ثابتی در لایه‌های فوقانی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ۱۲ که به طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به ازای هر 10000 میلیارد اتم پایدار کربن ۱۲، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ۱۴ از این طریق وارد جو می‌شود.

اتم‌های کربن جوّی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فتوسنتز و تنفس، به نحو کاتوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به طوری که اتم‌های کربن هر

جدول دوره‌های عناصر



H هیدروژن ۱/۰۰۸	He هلیوم ۴/۰۰۳																																																																																
Li لیتیم ۶/۹۴	Be بریلیم ۹/۰۰۱	B بور ۱۰/۰۸۰	C کربن ۱۲/۰۰۱	N نیتروژن ۱۴/۰۰۱	O اکسیژن ۱۶/۰۰۰	F فلور ۱۹/۰۰۰	Ne نون ۲۰/۰۱۸	Na سدیم ۲۲/۹۹	Mg منیزیم ۲۴/۳۰۱	Al آلومینیم ۲۶/۹۸	Si سیلیسیم ۲۸/۰۸۶	P فسفر ۳۰/۹۷	S گوگرد ۳۲/۰۶	Cl کلر ۳۵/۴۵	Ar آرگن ۳۹/۹۵	K پتاسیم ۳۹/۰۹۸	Ca کلسیم ۴۰/۰۷۸	Sc اسکاندیم ۴۴/۹۶	Ti تیتانیم ۴۷/۸۷	V وانادیم ۵۰/۹۴	Cr کروم ۵۲/۰۰۰	Mn منگنز ۵۴/۹۴	Fe آهن ۵۵/۸۵	Co کوبالت ۵۸/۹۳	Ni نیکل ۵۸/۶۹	Cu مس ۶۳/۵۵	Zn روی ۶۵/۳۹	Ga گالیم ۶۹/۷۲	Ge ژرمانیم ۷۲/۶۴	As آرستیک ۷۴/۹۲	Se سدیم ۷۸/۹۶	Br برم ۷۹/۹۰	Kr کریپتون ۸۳/۸۰																																																
Rb روبی듐 ۸۵/۴۷	Sr استرانسیم ۸۷/۶۲	Y یتریم ۸۸/۹۱	Zr زیرکونیم ۹۱/۲۲	Nb نیوبیم ۹۲/۹۱	Mo مولیبدیم ۹۵/۹۴	Tc تکنسیم —	Ru روثنیم ۱۰۱/۱۰۱	Rh روندیم ۱۰۱/۲۹	Pd پالادیم ۱۰۶/۴۰	Ag نقره ۱۰۷/۹	Cd کادمیم ۱۱۲/۴۰	In ایندیم ۱۱۴/۸۰	Sn قلع ۱۱۸/۷	Sb آنتیموان ۱۲۱/۸	Te تلوریم ۱۲۷/۶۰	I ید ۱۲۶/۹	Xe زنون ۱۳۱/۳	Cs سزیم ۱۳۲/۹	Ba باریم ۱۳۷/۳	Lu لوئیسیم ۱۷۵/۰۰	Hf هافنیم ۱۷۸/۵	Ta تانتال ۱۸۰/۹	W تنگستن ۱۸۳/۸۰	Re رنتیم ۱۸۶/۲	Os اوسمیم ۱۹۰/۲	Ir ایریدیم ۱۹۲/۲۰	Pt پلاتین ۱۹۵/۰۱	Au طلا ۱۹۷/۰	Hg جیوه ۲۰۰/۶	Tl تالیم ۲۰۴/۳۰	Pb سرب ۲۰۷/۲	Bi بیسموت ۲۰۸/۰	Po پولونیم [۲۰۹]	At استانتین [۲۱۰]	Rn رادیون [۲۲۲]	Fr فرانسیم [۲۲۳]	Ra رادیوم [۲۲۶]	Lr لوئرسیوم [۲۶۱]	Rf رفرکتوریم [۲۶۱]	Db دبلیوم [۲۶۸]	Sg سیگماگیم [۲۷۱]	Bh بهرلیوم [۲۷۲]	Hs هاسیم [۲۷۷]	Mt میتنیم [۲۷۶]	Ds داوستانیوم [۲۸۱]	Rg روگنبرگیم [۲۸۰]	Cn کونیرنیم [۲۸۷]	Nh نیوهام [۲۸۶]	Ho هولمیوم [۲۸۹]	Er اریتم [۲۹۰]	Tm تولیم [۲۹۱]	Md مداولیم [۲۹۸]	No نوبلیوم [۲۹۹]	La لائانان ۱۳۸/۹۰	Ce سزیم ۱۴۰/۰	Pr پراسمیدیم ۱۴۰/۹۰	Nd نیئودیم ۱۴۴/۲	Pm پرومتیم [۱۴۵]	Sm ساماریوم ۱۵۰/۴	Eu اورونیوم ۱۵۲/۰	Gd گادولیم ۱۵۷/۳	Tb تربیم ۱۵۸/۹	Dy دیسمیورونیوم ۱۶۲/۵	Ho هولمیوم ۱۶۴/۹	Er اریتم ۱۶۷/۳	Tm تولیم ۱۶۸/۹	Yb ایتربیوم ۱۷۳/۰	Ac اکتیونیوم [۲۲۷]	Th تورنیوم [۲۳۲]	Pa پروکتینیوم [۲۳۱]	U اورانیوم [۲۳۸]	Np نپتونیم [۲۳۷]	Pu پلوتونیوم [۲۴۴]	Au آمریسیوم [۲۴۳]	Cm کوریوم [۲۴۷]	Bk برکلیم [۲۴۷]	Cf کالیفرنیم [۲۵۱]	Es ایشتینیم [۲۵۲]	Fm فرمنیم [۲۵۷]	Md مداولیم [۲۵۸]	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

Resultant vector	بردار برآیند
Position vector	بردار مکان
Interaction	برهم کنش
Frequency	بسامد (فرکانس)
Threshold frequency	بسامد آستانه
Resonance frequency	بسامد تشدید
Angular frequency	بسامد زاویه‌ای
Extremely low frequency (ELF)	بسامدهای فوق پایین
Loudspeaker	بلندگو
Loudness	بلندی صوت

پ

Trough	پاستیغ موج
Collor dispersion	پاشندگی رنگی
Stable	پایدار
Atom stability	پایداری اتم
Radioactivity	یرتوزایی
Refracted ray	یرتوی شکسته
Incident ray	یرتوی فرودی (تابیده)
Gamma ray	یرتوی گاما
Echo	پژواک

ت

Thermal radiation	تابش گرمایی
Sinusoidal function	تابع سینوسی
Fiber optic	تار نوری
Mass – energy conversion	تبدیل جرم – انرژی
Pulse	تپ
Energy level	تراز انرژی
Intensity level	تراز شدت صوت (تراز صوتی)
Ripple tank	تشت موج
Resonance	تشدید
Momentom	تکانه

الف

Threshold of pain	آستانه دردناکی
Threshold of hearing	آستانه شنوایی
Disturbance	آشفتگی
Detection	آشکارسازی
Pendulum	آونگ
Simple pendulum	آونگ ساده
Plane mirror	آینه تخت
Doppler effect	اثر دوپلر
Photoelectric effect	اثر فوتوالکتریک
Microwave oven	اجاق میکروموج
Vibration	ارتعاش
Pitch	ارتفاع صوت
Friction	اصطکاک
Superposition principle	اصل برهم نهی
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 (هم مکان)

ب

Reflection	بازتاب
Specular reflection	بازتاب آینه‌ای (منظم)
Diffuse reflection	بازتاب پخشنده (نامنظم)
Total internal reflection	بازتاب داخلی کلی
Excitation	برانگیختگی

	د		Monochromatic	تکفام
Amplitude		دامنه	Speed	تندی
Valley		دره موج	Speed of propagation	تندی انتشار
Period		دوره تناوب	Terminal speed	تندی حدی
Tuning fork		دیپازون	Instantaneous speed	تندی لحظه‌ای
Dynamics		دینامیک	Average speed	تندی متوسط

	ذ		ث	
Beta particle		ذره بتا	Planck constant	ثابت پلانک
			Rydberg constant	ثابت ریدبرگ
			Spring constant	ثابت فنر

	ر		ج	
Series of lines		رشته خطوط	Displacement	جاب‌جایی
Lyman series		رشته لیمان	Wavefront	جبهه موج

	س		چ	
Crest		ستیع موج	Atomic mass	جرم اتمی
Oasis mirage		سراب (سراب آبیگیر)	Direction	جهت

Velocity		سرعت	Source	چشمه
Initial velocity		سرعت اولیه	Linear mass density	چگالی خطی جرم
Instantaneous velocity		سرعت لحظه‌ای		
Average velocity		سرعت متوسط		

	ش		ح	
Metastable		شبه پایدار	Motion with constant acceleration	حرکت با شتاب ثابت
Acceleration		شتاب	Motion along a straight line	حرکت بر خط راست
Gravity acceleration		شتاب گرانشی	Accelerating motion	حرکت تندشونده
Instantaneous acceleration		شتاب لحظه‌ای	Periodic motion	حرکت دوره‌ای
Average acceleration		شتاب متوسط	Decelerating motion	حرکت کندشونده
Intensity		شدت	Simple Harmonic Motion	حرکت هماهنگ ساده
Refraction		شکست	Uniform motion	حرکت یکنواخت

	خ			
Antinode		شکم موج	Normal	خط عمود
Slope		شیب خط		

ق

Snell's Law	قانون اسنل
General law of reflection	قانون بازتاب عمومی
General law of refraction	قانون شکست عمومی
Wave train	قطار موج
Peak	قله موج
Newton's laws	قوانین نیوتون

ک

Mass defect	کاستی جرم
Focal point	کانون (نقطه کانونی)
Focus	کانونی شدن (کردن)

گ

Transition	گذار
Node	گره موج
Emission	گسیل
Stimulated emission	گسیل القایی
Spontaneous emission	گسیل خودبه خود

ل

Inertia	لختی
---------	------

م

Satellite	ماهواره
Medium	محیط
Fundamental mode	مد اصلی
Nuclear atom model	مدل اتم هسته ای
The Bohr model	مدل بور
The Thomson model	مدل تامسون
The Rutherford model	مدل رادرفورد
Maxwell equations	معادله های ماکسول
Air resistance	مقاومت هوا

ص

Sound	صوت
-------	-----

ض

Coefficient of static friction	ضریب اصطکاک ایستایی
Coefficient of kinetic friction	ضریب اصطکاک جنبشی
Refraction index	ضریب شکست

ط

Wavelength	طول موج
Spectrum	طیف
Atomic spectrum	طیف اتمی
Absorption spectrum	طیف جذبی
Line spectrum	طیف خطی
Emission spectrum	طیف گسیلی (نشری)
Spectroscope	طیف نما
Spectroscopy	طیف نمایی

ع

Transmission	عبور
Atomic number	عدد اتمی
Quantum number	عدد کوانتومی
Snapshot	عکس (تصویر) لحظه ای

ف

Ultraviolet	فرابنفش
Ultrasound	فراصوت
Infrared	فروسرخ
Subsonic	فروصوت
Spring	فنر
Atomic physics	فیزیک اتمی
Nuclear physics	فیزیک هسته ای

Damped oscillation	نوسان میرا	Echolocation	مکان یابی پژواکی
Oscillograph	نوسان نگار	Skip zone	منطقه ردشوندگی
Oscillogram	نوسان نگاشت	Standing wave	موج ایستاده
Driven oscillation	نوسان واداشته	Travelling wave	موج پیشرونده
Nucleon	نوکلئون	Plane wave	موج تخت
Force	نیرو	Sinusoidal wave	موج سینوسی
Friction force	نیروی اصطکاک	Sound wave	موج صوتی
Net force	نیروی خالص	Longitudinal wave	موج طولی
Normal force	نیروی عمودی سطح	Transverse wave	موج عرضی
Elastic force	نیروی کشسانی	Spherical wave	موج کروی
String force	نیروی کشش طناب	Seismic wave	موج لرزه ای
Gravitational force	نیروی گرانشی	Mechanical wave	موج مکانیکی
Drag force	نیروی مقاومت شاره (پس کشی)	Controls road	میله های کنترل
Nuclear force	نیروی هسته ای		
Half life	نیمه عمر		

و

Decay	واپاشی
Population inversion	وارونی جمعیت
Reaction	واکنش
Chain reaction	واکنش زنجیری
Weight	وزن
Equilibrium state	وضع تعادل
High voltage	ولتاژ بالا

ه

Nucleus	هسته
Stable nucleus	هسته پایدار
Unstable nucleus	هسته ناپایدار
Harmonic	هماهنگ
In – Phase	همفاز
Homogeneous	همگن

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
Neutrino	نوترینو
Visible light	نور مرئی
Oscillation	نوسان
Periodic oscillation	نوسان دوره ای
Vibration generator	نوسان ساز
Oscillator	نوسانگر

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 , Johnwiley.
17. Inquiry into Physics, Vern J. Ostdieck and Donald J. Bord, 8th edition, 2018, Cengage Learning.
18. College Physics, Nicholas J. Giardono, 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 فلاحی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹، مؤسسه نشر علوم نوین.
- ۲- مبانی فیزیک، جلد‌های اول تا سوم ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک 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 سبرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و همکاران، انتشارات فاطمی ۱۳۷۶.
- ۴- آشنایی با فیزیک هسته‌ای کنت. کرین، ترجمه منیژه رهبر و بهرام معلمی، مرکز 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 کاتل 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 به‌عنوان 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 نوناگشت، 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 - رشته علوم تجربی کد ۱۱۲۲۴۴

ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت	ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت
۱	علیرضا کاشفی	البرز	۲۹	حیدر شکری	شهرستان‌های تهران
۲	بهاره فخرایی	کردستان	۳۰	اسدالله رفیعی	آذربایجان شرقی
۳	رضا عابدی منش	شهر تهران	۳۱	نقیسه عیسی‌لو	آذربایجان غربی
۴	حسین هادوی	یزد	۳۲	سیده فاطمه کمالی کارسالاری	مازندران
۵	سید ایمان بنی‌هاشم	خراسان رضوی	۳۳	مرضیه رستمی	هرمزگان
۶	ناهید دلپیشه	ایلام	۳۴	مرضیه مختاریان	سمنان
۷	فاطمه قلی‌زاده	خراسان جنوبی	۳۵	حشمت کاکا	ایلام
۸	مهدی شیروانی	خراسان شمالی	۳۶	محمدرضا ناصری	سمنان
۹	غفار الفتی	کرمانشاه	۳۷	رحیم بخشنده	اردبیل
۱۰	جلال صبری	خراسان رضوی	۳۸	فاطمه سادات کریمی دیوکلاهی	قم
۱۱	فریبا جهانگیری	آذربایجان غربی	۳۹	رضا ملکی	قزوین
۱۲	فتح‌اله دویرانی	زنجان	۴۰	توحید گنج	اردبیل
۱۳	هدیه منوچهری	شهر تهران	۴۱	قاسم خسروبیگی	مرکزی
۱۴	مصطفی خسروی	فارس	۴۲	مجید راسخ	گیلان
۱۵	اشرف رفیعی	اصفهان	۴۳	حمیده هزاره مقدم	سیستان و بلوچستان
۱۶	غیاث سلیمانی	خوزستان	۴۴	محمدعلی سبک‌بار	خوزستان
۱۷	علی انصاری اصل	البرز	۴۵	عمید عقیلی‌نژاد	گلستان
۱۸	مولود رضایی بی‌غم	همدان	۴۶	رحمان لایق‌نژاد	کهگیلویه و بویراحمد
۱۹	مجید توکلی دستجردی	اصفهان	۴۷	محمد عبدالمالکی	همدان
۲۰	محمدرضا رسولی	خراسان جنوبی	۴۸	امیر علیخانی	البرز
۲۱	عبداله درویشی نخل ابراهیمی	هرمزگان	۴۹	طیبه شفیعی	بوشهر
۲۲	رقیه مؤمنی طارمسری	گیلان	۵۰	زریر زمانی	کهگیلویه و بویراحمد
۲۳	اشرف کارخانه	مرکزی	۵۱	فرشته کریمی گفتار	کرمان
۲۴	محمدرضا خاکپور	قزوین	۵۲	محمدرضا عباسی	کرمانشاه
۲۵	طاهره پوردهقان	شهرستان‌های تهران	۵۳	خشایار بازیاری	بوشهر
۲۶	مدیحه نامور	خراسان شمالی	۵۴	احمد کمالیان‌فر	فارس
۲۷	محبوبه آیت‌اللهی	یزد	۵۵	ابوالفضل دین‌محمدی	زنجان
۲۸	جهانگیر بهمنی	کردستان			