

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

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

فهرست

فهرست

۱ حرکت بر خط راست

۱ حرکت بر خط راست

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



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



۲۷ دینامیک

۲۷ دینامیک

- 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
- برسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ۵۰



- 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
- برسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲ ۵۰



۵۳ نوسان و امواج

۵۳ نوسان و امواج

- 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
- برسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ۸۹



- 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
- برسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳ ۸۹



۹۵

آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای

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



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

۹۵

آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای

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



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

بخش فیزیک جدید، از میاحث فیزیک اتمی (شامل اثر فوتوالکتریک و فوتون، طیف خطی، مدل‌های اتمی و لیزر) و فیزیک هسته‌ای (شامل ساختار هسته و پرتوهای 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

مهارت‌های 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 برش‌های 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 به‌گونه‌ای 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 بیاموزن 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 به‌صورت امتحان نهایی برگزار می‌شود، ضروری است رویکرد جدید کتاب درسی در ارزشیابی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

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

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

بخش فیزیک جدید، از میاحث فیزیک اتمی (شامل اثر فوتوالکتریک و فوتون، طیف خطی، مدل‌های اتمی و لیزر) و فیزیک هسته‌ای (شامل ساختار هسته و پرتوهای 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

مهارت‌های 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 برش‌های 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 به‌گونه‌ای 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 بیاموزن 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 به‌صورت امتحان نهایی برگزار می‌شود، ضروری است رویکرد جدید کتاب درسی در ارزشیابی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

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

ردیف	انتظارهای عملکردی
۱	طراحی آزمایش، تحلیل و تفسیر آزمایش
۲	اجرای آزمایش، ثبت داده‌ها، نتیجه‌گیری و ارائه گزارش
۳	تجزیه و تحلیل داده‌ها، رسم نمودار، نتیجه‌گیری از داده‌ها، پیش‌بینی و...
۴	انجام تحقیق و جمع‌آوری اطلاعات (طراحی، اجرا، ثبت داده‌ها، تجزیه و تحلیل، ارائه گزارش)
۵	مشارکت و تعامل در فرایند آموزش (انجام فعالیت‌های عملی و آزمایشگاهی، مشارکت در بحث‌های گروهی، کنجکاری علمی و طرح پرسش‌های مفهومی)
۶	پاسخ به پرسش‌های مفهومی در حیطه‌های مختلف، دانش، کاربرد، استدلال و قضاوت
۷	توانایی حل مسئله و برش‌های 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 درهای 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 معنی‌تقسیم 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 رمزیننه 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 یا ما همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی کند. همچنین این گروه از دریافت پیشنهادها و اصلاحی‌های دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان عزیز همچون همیشه استقبال می‌کند.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری



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 درهای 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 معنی‌تقسیم 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 رمزیننه 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 یا ما همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی کند. همچنین این گروه از دریافت پیشنهادها و اصلاحی‌های دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان عزیز همچون همیشه استقبال می‌کند.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری





فصل



حرکت بر خط راست



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

بخش ها

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



فصل



حرکت بر خط راست



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

بخش ها

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

شکل ۱: حرکت بر خط راست

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



شکل ۱: حرکت بر خط راست

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



فعالیت ۱-۱

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

فعالیت ۱-۱

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

$$v_{av} = \frac{l}{\Delta t} \quad (۱-۱) \quad \text{(تندی متوسط)}$$

$$\vec{v}_{av} = \frac{\vec{d}}{\Delta t} \quad (۲-۱) \quad \text{(سرعت متوسط)}$$

همان‌طور که دیده می‌شود تندی متوسط، کمیتی نرده‌ای و سرعت متوسط، کمیتی برداری^۱ است و یکای SI آنها، متر بر ثانیه (m/s) است که می‌توان آنها را برحسب یکاهای دلخواه دیگری مانند کیلومتر بر ساعت (km/h) نیز بیان کرد.

۱- تا بخش باین^{۱۱} در ندهای تندی متوسط و سرعت متوسط از واژه انگلیسی average به معنای متوسط گرفته شده است.
 ۲- آموزش مسافتی که دانش‌آموزان را در محاسبه \vec{d} و \vec{v}_{av} درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحه ۱۱۱ با فضای ۱۱۱ می‌کند خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

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

$$v_{av} = \frac{l}{\Delta t} \quad (۱-۱) \quad \text{(تندی متوسط)}$$

$$\vec{v}_{av} = \frac{\vec{d}}{\Delta t} \quad (۲-۱) \quad \text{(سرعت متوسط)}$$

همان‌طور که دیده می‌شود تندی متوسط، کمیتی نرده‌ای و سرعت متوسط، کمیتی برداری^۱ است و یکای SI آنها، متر بر ثانیه (m/s) است که می‌توان آنها را برحسب یکاهای دلخواه دیگری مانند کیلومتر بر ساعت (km/h) نیز بیان کرد.

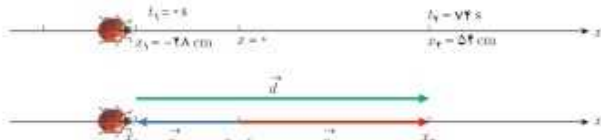
۱- تا بخش باین^{۱۱} در ندهای تندی متوسط و سرعت متوسط از واژه انگلیسی average به معنای متوسط گرفته شده است.
 ۲- آموزش مسافتی که دانش‌آموزان را در محاسبه \vec{d} و \vec{v}_{av} درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحه ۱۱۱ با فضای ۱۱۱ می‌کند خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

شکل ۱: حرکت بر خط راست

سوال ۲-۱

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

$$\vec{v}_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \vec{i} = \frac{5\text{cm} - (-2\text{cm})}{7\text{s} - 0\text{s}} \vec{i} = (1/1 \text{ cm/s}) \vec{i}$$

نمونه ۱-۱

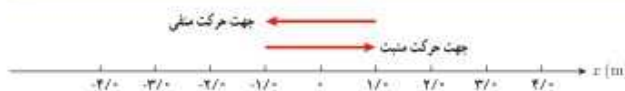
جدول زیر را کامل کنید. فرض کنید هر چهار متحرک در مدت زمان $4/0\text{s}$ فاصله بین مکان آغازین و مکان پایانی را طی می‌کنند.

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

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

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

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



شکل ۱: حرکت بر خط راست

سوال ۲-۱

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

$$\vec{v}_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \vec{i} = \frac{5\text{cm} - (-2\text{cm})}{7\text{s} - 0\text{s}} \vec{i} = (1/1 \text{ cm/s}) \vec{i}$$

نمونه 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
متحرک A $(-2/0\text{m}) \vec{i}$	$(6/4\text{m}) \vec{i}$		
	$(-2/5\text{m}) \vec{i}$	$(-5/6\text{m}) \vec{i}$	
	$(4/0\text{m}) \vec{i}$	$(4/6\text{m}) \vec{i}$	
متحرک D $(-1/4\text{m}) \vec{i}$			$(2/4\text{m}/0) \vec{i}$

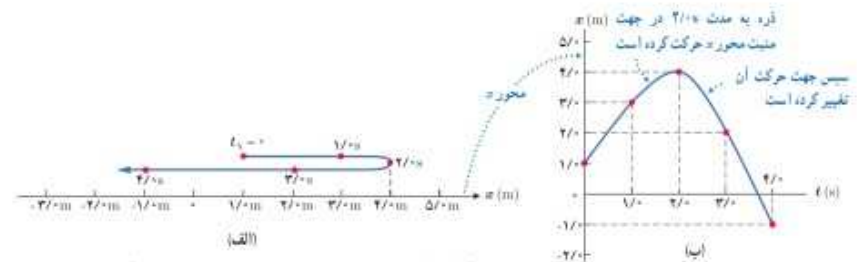
از آنجا که در ادامه این فصل، تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، جابه‌جایی متحرک را به جای بردار \vec{d} به صورت Δx و سرعت متوسط را به جای بردار \vec{v}_{av} به صورت رابطه زیر در حل مسئله‌ها به کار می‌بریم. در این صورت علامت‌های جبری Δx و v_{av} جهت جابه‌جایی و سرعت متوسط را نشان می‌دهند. اگر متحرک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

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

شکل ۳-۱ مکانی که روی یک محور تعیین می‌شود بر حسب یکای طول. اگر اینجا متر نشانه گذاری می‌شود در جهت تا بی‌نهایت ادامه دارد. نام محور، در اینجا، 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 ۱۴-الف نشان داده شده است، توجه کنید. این ذره در لحظه $t_1=0$ در مکان $x_1=1/0$ m، در لحظه $t_2=1/0$ s در مکان $x_2=3/0$ m قرار دارد و به همین ترتیب در لحظه‌های دیگر در مکان‌های دیگر. اگر بخواهیم نمودار مکان-زمان حرکت این ذره را رسم کنیم، ابتدا هر یک از محورهای مکان و زمان را با مقیاسی مناسب منبسط می‌کنیم. سپس نقاطی از نمودار را که مربوط به هر یک از زمان‌ها و مکان‌های داده شده است، در صفحه $x-t$ مشخص می‌کنیم و با وصل کردن این نقاط به هم، به وسیله یک منحنی (خم) هموار، نمودار مکان-زمان را همانند شکل ۱۴-ب رسم می‌کنیم.

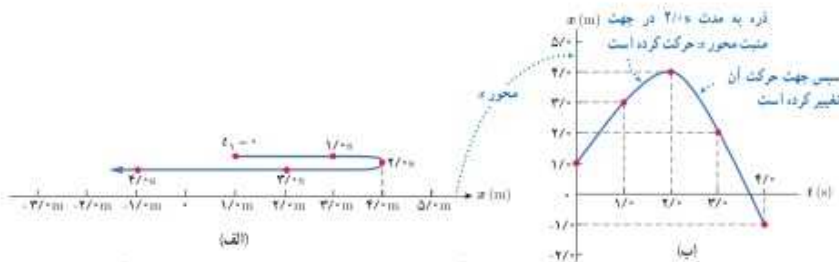


شکل ۱۴-الف) مسیر حرکت ذره در امتداد محور x . ب) نمودار مکان-زمان متحرک

مثال ۳-۱

شکل رویه‌رو نمودار مکان-زمان مورچه‌ای را نشان می‌دهد که در راستای محور x در حرکت است.
الف) در کدام بازه زمانی مورچه در جهت محور x حرکت می‌کند؟
ب) در کدام بازه زمانی مورچه در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟
ج) در کدام بازه‌های زمانی مورچه ایستاده است؟
د) در کدام لحظه‌هایی فاصله مورچه از مبدأ 3 cm است؟
ه) در کدام بازه زمانی فاصله مورچه از مبدأ محور بیشترین مقدار است؟
و) جابه‌جایی و سرعت متوسط مورچه را در بازه زمانی $t=4/0$ s تا $t=8/0$ s پیدا کنید.
ز) پاسخ: الف) در بازه زمانی $t=0/0$ تا $t=4/0$ s، زیرا در این بازه، x همواره در حال افزایش است.
ب) در بازه زمانی $t=4/0$ s تا $t=6/0$ s، زیرا در این بازه، x همواره در حال کاهش است.
ج) در بازه‌های زمانی $t=0/0$ تا $t=1/0$ s و $t=12/0$ s تا $t=14/0$ s و $t=18/0$ s تا $t=19/0$ s.
د) در لحظه‌های $t=6/0$ s و $t=12/0$ s.
ه) در بازه زمانی $t=8/0$ s تا $t=12/0$ s.
و) $\Delta x = x_2 - x_1 = 4\text{ cm} - 2\text{ cm} = 2\text{ cm}$
 $v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2\text{ cm}}{8/0\text{ s} - 4/0\text{ s}} = 5/0\text{ cm/s}$
علامت مثبت نشان می‌دهد که مورچه در جهت مثبت محور x جابه‌جا شده است.

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 ۱۴-الف نشان داده شده است، توجه کنید. این ذره در لحظه $t_1=0$ در مکان $x_1=1/0$ m، در لحظه $t_2=1/0$ s در مکان $x_2=3/0$ m قرار دارد و به همین ترتیب در لحظه‌های دیگر در مکان‌های دیگر. اگر بخواهیم نمودار مکان-زمان حرکت این ذره را رسم کنیم، ابتدا هر یک از محورهای مکان و زمان را با مقیاسی مناسب منبسط می‌کنیم. سپس نقاطی از نمودار را که مربوط به هر یک از زمان‌ها و مکان‌های داده شده است، در صفحه $x-t$ مشخص می‌کنیم و با وصل کردن این نقاط به هم، به وسیله یک منحنی (خم) هموار، نمودار مکان-زمان را همانند شکل ۱۴-ب رسم می‌کنیم.

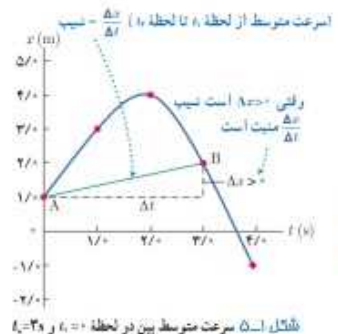


شکل ۱۴-الف) مسیر حرکت ذره در امتداد محور x . ب) نمودار مکان-زمان متحرک

مثال ۳-۱

شکل رویه‌رو نمودار مکان-زمان مورچه‌ای را نشان می‌دهد که در راستای محور x در حرکت است.
الف) در کدام بازه زمانی مورچه در جهت محور x حرکت می‌کند؟
ب) در کدام بازه زمانی مورچه در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟
ج) در کدام بازه‌های زمانی مورچه ایستاده است؟
د) در کدام لحظه‌هایی فاصله مورچه از مبدأ 3 cm است؟
ه) در کدام بازه زمانی فاصله مورچه از مبدأ محور بیشترین مقدار است؟
و) جابه‌جایی و سرعت متوسط مورچه را در بازه زمانی $t=4/0$ s تا $t=8/0$ s پیدا کنید.
ز) پاسخ: الف) در بازه زمانی $t=0/0$ تا $t=4/0$ s، زیرا در این بازه، x همواره در حال افزایش است.
ب) در بازه زمانی $t=4/0$ s تا $t=6/0$ s، زیرا در این بازه، x همواره در حال کاهش است.
ج) در بازه‌های زمانی $t=0/0$ تا $t=1/0$ s و $t=12/0$ s تا $t=14/0$ s و $t=18/0$ s تا $t=19/0$ s.
د) در لحظه‌های $t=6/0$ s و $t=12/0$ s.
ه) در بازه زمانی $t=8/0$ s تا $t=12/0$ s.
و) $\Delta x = x_2 - x_1 = 4\text{ cm} - 2\text{ cm} = 2\text{ cm}$
 $v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2\text{ cm}}{8/0\text{ s} - 4/0\text{ s}} = 5/0\text{ cm/s}$
علامت مثبت نشان می‌دهد که مورچه در جهت مثبت محور x جابه‌جا شده است.

شکل ۱: حرکت بر خط راست



تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان - زمان : دوباره به نمودار شکل ۱-۴ که پاره‌خط بین دو نقطه دلخواه آن مطابق شکل ۵-۱ رسم شده است توجه کنید. همان‌طور که از درس ریاضی می‌دانید نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ برای شیب پاره‌خطی است که دو نقطه A و B را به هم وصل می‌کند. از سوی دیگر با توجه به رابطه ۴-۱ می‌دانیم که این نسبت برابر سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی t_1 تا t_2 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان برابر شیب پاره‌خطی است که نقاط نظیر آن دو لحظه در نمودار مکان - زمان را به یکدیگر وصل می‌کند.

شکل ۵-۱: سرعت متوسط بین دو لحظه $t_1 = 2s$ و $t_2 = 3s$

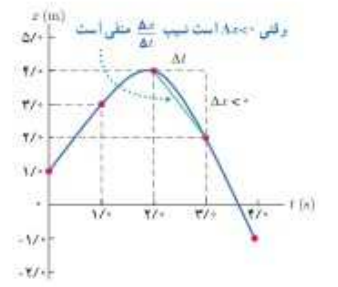
مثال ۴-۱

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

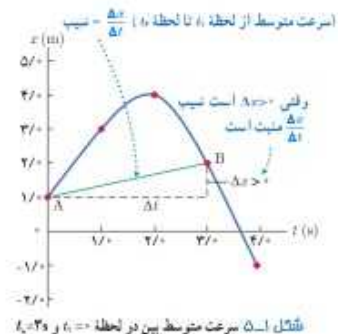
پاسخ : از رابطه ۴-۱ داریم :

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

علامت منفی $v_{\text{متوسط}}$ نشان می‌دهد که شیب خط واصل بین این دو نقطه از نمودار مکان - زمان، منفی است. توجه کنید که بدون محاسبه $v_{\text{متوسط}}$ نیز، با توجه به فهم هندسی‌ای که از منفی بودن شیب خط واصل دو نقطه نمودار داریم، می‌توانستیم به منفی بودن $v_{\text{متوسط}}$ پی ببریم.



شکل ۱: حرکت بر خط راست



تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان - زمان : دوباره به نمودار شکل ۱-۴ که پاره‌خط بین دو نقطه دلخواه آن مطابق شکل ۵-۱ رسم شده است توجه کنید. همان‌طور که از درس ریاضی می‌دانید نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ برای شیب پاره‌خطی است که دو نقطه A و B را به هم وصل می‌کند. از سوی دیگر با توجه به رابطه ۴-۱ می‌دانیم که این نسبت برابر سرعت متوسط متحرک در بازه زمانی t_1 تا t_2 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان برابر شیب پاره‌خطی است که نقاط نظیر آن دو لحظه در نمودار مکان - زمان را به یکدیگر وصل می‌کند.

شکل ۵-۱: سرعت متوسط بین دو لحظه $t_1 = 2s$ و $t_2 = 3s$

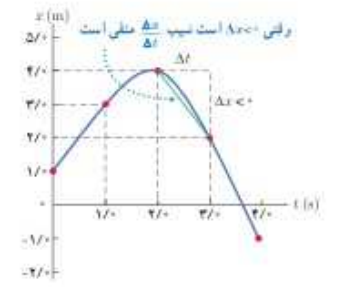
مثال ۴-۱

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

پاسخ : از رابطه ۴-۱ داریم :

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

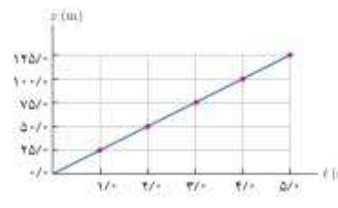
علامت منفی $v_{\text{متوسط}}$ نشان می‌دهد که شیب خط واصل بین این دو نقطه از نمودار مکان - زمان، منفی است. توجه کنید که بدون محاسبه $v_{\text{متوسط}}$ نیز، با توجه به فهم هندسی‌ای که از منفی بودن شیب خط واصل دو نقطه نمودار داریم، می‌توانستیم به منفی بودن $v_{\text{متوسط}}$ پی ببریم.



مثال ۵-۱

نمودار مکان - زمان موتورسواری که بر خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/s$ تا $1/0s$ ، $1/0s$ تا $2/0s$ ، $2/0s$ تا $4/0s$ ، $4/0s$ تا $5/0s$ محاسبه کنید. نتایج به دست آمده را با هم مقایسه و تفسیر کنید.

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



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

بازه زمانی $0/s$ تا $1/0s$

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

بازه زمانی $2/0s$ تا $4/0s$

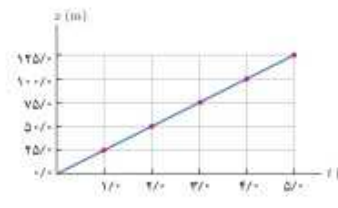
$$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{125/0 \text{ m} - 25/0 \text{ m}}{5/0 \text{ s} - 1/0 \text{ s}} = 25 \text{ m/s}$$

بازه زمانی $1/0s$ تا $5/0s$

مثال ۵-۱

نمودار مکان - زمان موتورسواری که بر خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/s$ تا $1/0s$ ، $1/0s$ تا $2/0s$ ، $2/0s$ تا $4/0s$ ، $4/0s$ تا $5/0s$ محاسبه کنید. نتایج به دست آمده را با هم مقایسه و تفسیر کنید.

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



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

بازه زمانی $0/s$ تا $1/0s$

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

بازه زمانی $2/0s$ تا $4/0s$

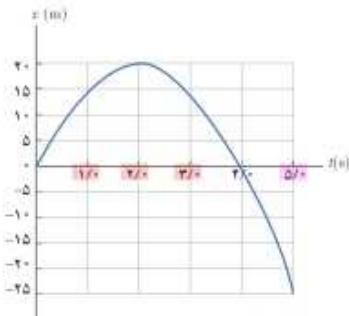
$$v_{\text{متوسط}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{125/0 \text{ m} - 25/0 \text{ m}}{5/0 \text{ s} - 1/0 \text{ s}} = 25 \text{ m/s}$$

بازه زمانی $1/0s$ تا $5/0s$

تیزتر، #

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

مثال ۶ -



شکل روبه رو، نمودار مکان - زمان خودرویی را نشان می دهد که روی خط راست حرکت می کند.
الف) با استفاده از داده های روی شکل، سرعت متوسط خودرو را در هر یک از بازه های زمانی ۰/۱s تا ۰/۲s، ۰/۲s تا ۰/۳s، ۰/۳s تا ۰/۴s تا ۰/۵s، ۰/۴s تا ۰/۵s، ۰/۵s تا ۰/۶s حساب کنید.
ب) در کدام یک از این بازه های زمانی، سرعت متوسط در جهت محور x و در کدام یک در خلاف جهت محور x است؟

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

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

بازه زمانی ۰/۱s تا ۰/۲s

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

بازه زمانی ۰/۲s تا ۰/۳s

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

بازه زمانی ۰/۳s تا ۰/۴s

$$v_{\text{مت}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-20\text{ m} - 20\text{ m}}{5/10\text{ s} - 4/10\text{ s}} = -40\text{ m/s}$$

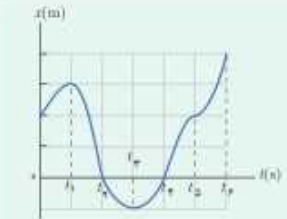
بازه زمانی ۰/۴s تا ۰/۵s

$$v_{\text{مت}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-20\text{ m} - 0\text{ m}}{5/10\text{ s} - 4/10\text{ s}} = -20\text{ m/s}$$

بازه زمانی ۰/۵s تا ۰/۶s

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

پرسش ۳ -

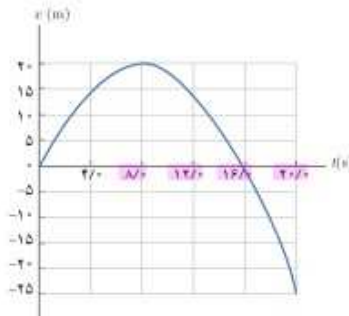


با توجه به نمودار مکان - زمان شکل روبه رو به پرسش های زیر پاسخ دهید:
الف) متحرک چند بار از مبدأ مکان عبور می کند؟
ب) در کدام بازه های زمانی متحرک در حال دور شدن از مبدأ است؟
ب) در کدام بازه های زمانی متحرک در حال نزدیک شدن به مبدأ است؟
ت) جهت حرکت چند بار تغییر کرده است؟ در چه لحظه های؟
ث) چاه جایی کل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

تیزتر، #

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

مثال ۶ -



شکل روبه رو، نمودار مکان - زمان موتورسواری را نشان می دهد که روی خط راست حرکت می کند.
الف) با استفاده از داده های روی شکل، سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه های زمانی ۰/۱s تا ۰/۲s، ۰/۲s تا ۰/۳s، ۰/۳s تا ۰/۴s تا ۰/۵s، ۰/۴s تا ۰/۵s، ۰/۵s تا ۰/۶s حساب کنید.
ب) در کدام یک از این بازه های زمانی، سرعت متوسط در جهت محور x و در کدام یک در خلاف جهت محور x است؟

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

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

بازه زمانی ۰/۱s تا ۰/۲s

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

بازه زمانی ۰/۲s تا ۰/۳s

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

بازه زمانی ۰/۳s تا ۰/۴s

$$v_{\text{مت}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-20\text{ m} - 20\text{ m}}{5/10\text{ s} - 4/10\text{ s}} = -40\text{ m/s}$$

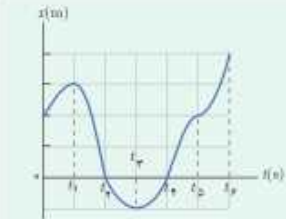
بازه زمانی ۰/۴s تا ۰/۵s

$$v_{\text{مت}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-20\text{ m} - 0\text{ m}}{5/10\text{ s} - 4/10\text{ s}} = -20\text{ m/s}$$

بازه زمانی ۰/۵s تا ۰/۶s

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

پرسش ۳ -



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

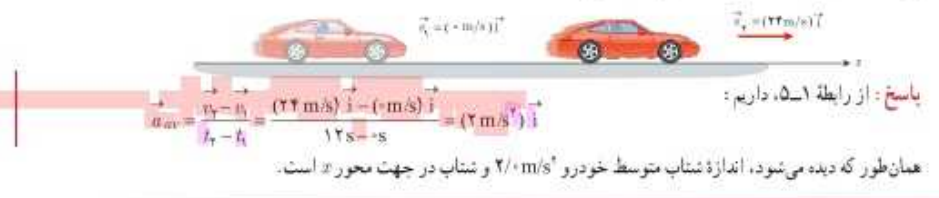
شکل ۱: حرکت بر خط راست

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

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

مثال ۱-۸

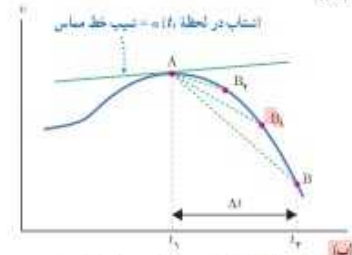
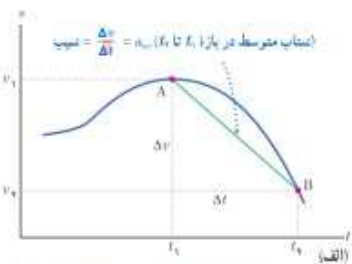
خودرویی از حال سکون در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند. پس از $12s$ ، سرعت خودرو به $24m/s$ در جهت محور x می‌رسد. شتاب متوسط خودرو را در این بازه زمانی به دست آورید.



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 موازی بین نقطه‌های A و B ، به خط مماس بر نمودار در نقطه A میل می‌کند. در این حالت، شیب خط مماس برابر شتاب متحرک در لحظه t_1 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که: شتاب در هر لحظه دلخواه t_1 برابر شیب خط مماس بر نمودار سرعت-زمان در آن لحظه است. در کتاب‌های فیزیک برای سادگی، شتاب لحظه‌ای را شتاب می‌نامند و آن را با 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 مسافتی که دانش‌آموزان را در محاسبه $a_{av} = \Delta v / \Delta t$ در گزینش برداری دو یا سه بعدی، در صفحه ۱۰۰ یا فضای ۱۰۱ می‌کند خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

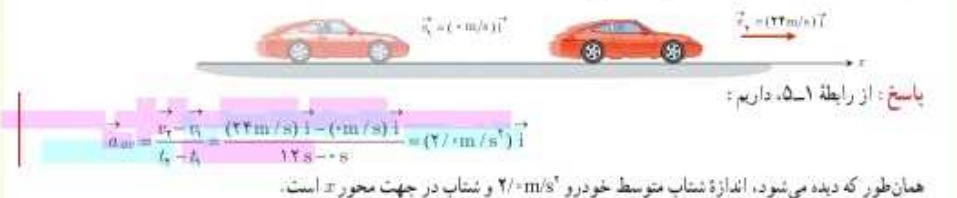
شکل ۱: حرکت بر خط راست

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

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

مثال ۱-۸

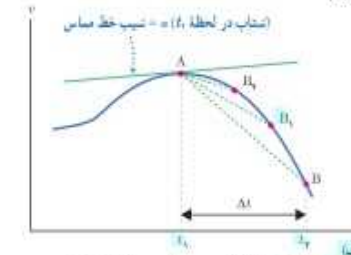
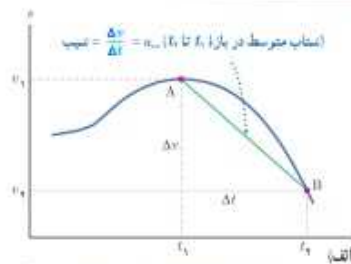
خودرویی از حال سکون در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند. پس از $12s$ ، سرعت خودرو به $24m/s$ در جهت محور x می‌رسد. شتاب متوسط خودرو را در این بازه زمانی به دست آورید.



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 موازی بین نقطه‌های A و B ، به خط مماس بر نمودار در نقطه A میل می‌کند. در این حالت، شیب خط مماس برابر شتاب متحرک در لحظه t_1 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که: شتاب در هر لحظه دلخواه t_1 برابر شیب خط مماس بر نمودار سرعت-زمان در آن لحظه است. در کتاب‌های فیزیک برای سادگی، شتاب لحظه‌ای را شتاب می‌نامند و آن را با نماد a نشان می‌دهند.

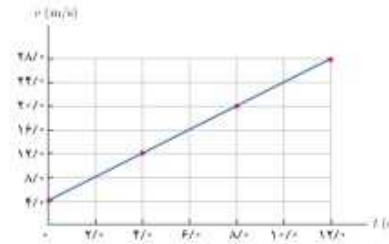


شکل ۹-۱ الف) شتاب متوسط بین دو لحظه t_1 و t_2 (ب) شتاب متحرک در لحظه t_1

۱- آموزش مسافتی که دانش‌آموزان را در محاسبه $a_{av} = \Delta v / \Delta t$ در گزینش برداری دو یا سه بعدی، در صفحه ۱۰۰ یا فضای ۱۰۱ 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 $0/0s$ تا $12/0s$ ، مطابق شکل روبه‌رو است. شتاب متوسط موتورسوار و جهت آن را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/0s$ تا $4/0s$ ، $4/0s$ تا $8/0s$ ، $8/0s$ تا $10/0s$ و $10/0s$ تا $12/0s$ 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:



$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{20 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}}{4 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 0/0 \text{ s تا } 4/0 \text{ s}$$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{40 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}}{8 \text{ s} - 4 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 4/0 \text{ s تا } 8/0 \text{ s}$$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{60 \text{ m/s} - 40 \text{ m/s}}{10 \text{ s} - 8 \text{ s}} = 10 \text{ m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 8/0 \text{ s تا } 10/0 \text{ s}$$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{60 \text{ m/s} - 60 \text{ m/s}}{12 \text{ s} - 10 \text{ s}} = 0 \text{ m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 10/0 \text{ s تا } 12/0 \text{ s}$$

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.

پوشش 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 و t_5 تعیین کنید.



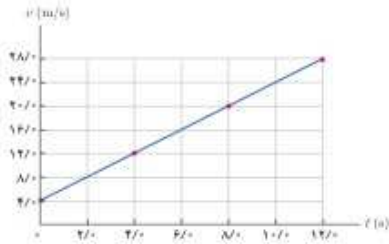
تمرین ۱-۴

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



مثال ۱-۹

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



$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{20 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}}{4 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 0/0 \text{ s تا } 4/0 \text{ s}$$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{40 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}}{8 \text{ s} - 4 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 4/0 \text{ s تا } 8/0 \text{ s}$$

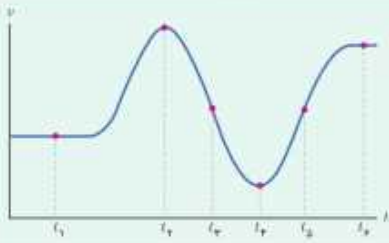
$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{60 \text{ m/s} - 40 \text{ m/s}}{10 \text{ s} - 8 \text{ s}} = 10 \text{ m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 8/0 \text{ s تا } 10/0 \text{ s}$$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{60 \text{ m/s} - 60 \text{ m/s}}{12 \text{ s} - 10 \text{ s}} = 0 \text{ m/s}^2 \quad \text{بازه زمانی } 10/0 \text{ s تا } 12/0 \text{ s}$$

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.

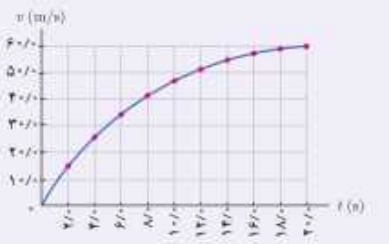
پوشش ۱-۶

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 و t_5 تعیین کنید.

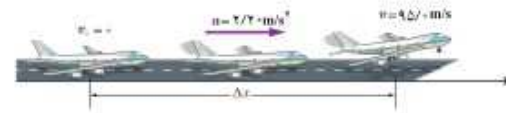


تمرین ۱-۴

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



مثال ۱۱



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

- الف) چه مدت طول می‌کشد تا هواپیما به شرایط برخاستن برسد؟
- ب) سرعت متوسط هواپیما در این بازه زمانی چقدر است؟
- پ) جابه‌جایی هواپیما در این مدت چقدر است؟

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

$$v = at + v_0 \Rightarrow 95/0 \text{ m/s} = (2/5 \text{ m/s}^2)t + 0/0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 47.5 \text{ s}$$

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

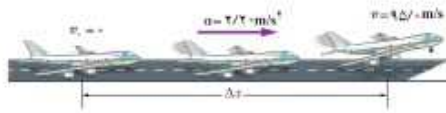
ب)

$$v_{av} = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{0/0 \text{ m/s} + 95/0 \text{ m/s}}{2} = 47.5 \text{ m/s}$$

پ) از رابطه ۸-۱ داریم:

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v_{av} \Delta t = (47.5 \text{ m/s})(47.5 \text{ s}) = 2260.6 \text{ m}$$

مثال ۱۱



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

- الف) چه مدت طول می‌کشد تا هواپیما به شرایط برخاستن برسد؟
- ب) سرعت متوسط هواپیما در این بازه زمانی چقدر است؟
- پ) جابه‌جایی هواپیما در این مدت چقدر است؟

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

$$v = at + v_0 \Rightarrow 95/0 \text{ m/s} = (2/5 \text{ m/s}^2)t + 0/0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 47.5 \text{ s}$$

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

ب)

$$v_{av} = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{0/0 \text{ m/s} + 95/0 \text{ m/s}}{2} = 47.5 \text{ m/s}$$

پ) از رابطه ۸-۱ داریم:

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v_{av} \Delta t = (47.5 \text{ m/s})(47.5 \text{ s}) = 2260.6 \text{ m}$$

تمرین 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 $t = 4/0$ چقدر است؟ ب) سرعت متوسط متحرک و جابه‌جایی آن در بازه زمانی صفر تا $t = 4/0$ چقدر است؟ پ) نمودار سرعت - زمان این متحرک را رسم کنید.

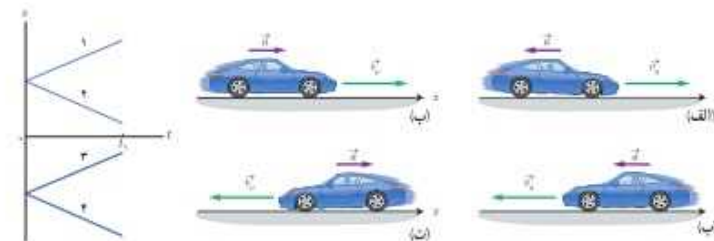
تمرین ۸

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 $t = 4/0$ چقدر است؟ ب) سرعت متوسط متحرک و جابه‌جایی آن در بازه زمانی صفر تا $t = 4/0$ چقدر است؟ پ) نمودار سرعت - زمان این متحرک را رسم کنید.

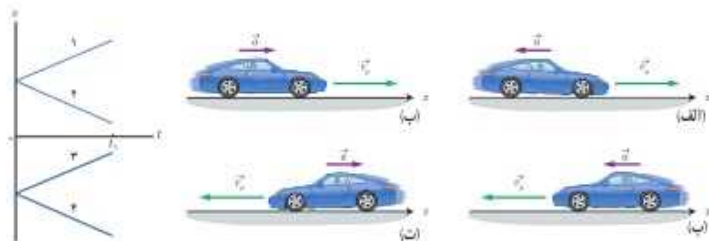
فعالیت ۲

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 $v-t$ در محدوده زمانی نشان داده شده روی نمودارها، توصیف می‌شود؟ همچنین توضیح دهید تندی کدام خودرو در حال افزایش (حرکت تندشونده) و تندی کدام خودرو در حال کاهش (حرکت کندشونده) است.



فعالیت ۲

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 $v-t$ در محدوده زمانی نشان داده شده روی نمودارها، توصیف می‌شود؟ همچنین توضیح دهید تندی کدام خودرو در حال افزایش (حرکت تندشونده) و تندی کدام خودرو در حال کاهش (حرکت کندشونده) است.



شکل ۱۳: حرکت بر خط راست

معادله مکان - زمان در حرکت با شتاب ثابت: اگر جسمی که با شتاب ثابت و در امتداد محور x حرکت می‌کند در $t=0$ در مکان x_0 دارای سرعت v_0 باشد، در این صورت از رابطه‌های ۴-۱ و ۴-۲ داریم:

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

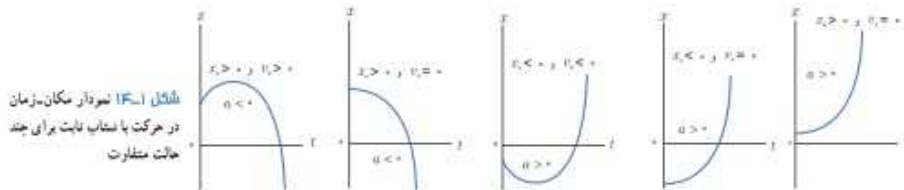
با قرار دادن رابطه ۴-۱ در معادله بالا داریم:

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

با ساده‌سازی این رابطه خواهیم داشت:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \quad (۱۳-۱) \quad (\text{معادله مکان - زمان در حرکت با شتاب ثابت})$$

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 ۱۳-۱ نمودار $x-t$ را برای چند حالت مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۳-۱ نمودار مکان-زمان در حرکت با شتاب ثابت برای چند حالت مختلف

شکل ۱۳: حرکت بر خط راست

معادله مکان - زمان در حرکت با شتاب ثابت: اگر جسمی که با شتاب ثابت و در امتداد محور x حرکت می‌کند در $t=0$ در مکان x_0 دارای سرعت v_0 باشد، در این صورت از رابطه‌های ۴-۱ و ۴-۲ داریم:

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

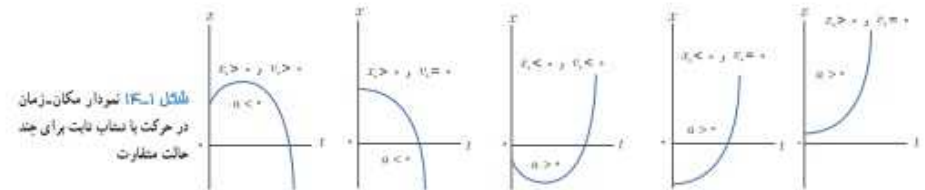
با قرار دادن رابطه ۴-۱ در معادله بالا داریم:

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

با ساده‌سازی این رابطه خواهیم داشت:

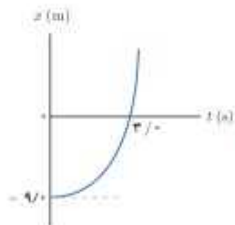
$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \quad (۱۳-۱) \quad (\text{معادله مکان - زمان در حرکت با شتاب ثابت})$$

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 ۱۳-۱ نمودار $x-t$ را برای چند حالت مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۳-۱ نمودار مکان-زمان در حرکت با شتاب ثابت برای چند حالت مختلف

مثال ۱۲-۱



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. ج) جابه‌جایی متحرک را در بازه زمانی صفر تا $3/0$ پیدا کنید. د) 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 $3/0$ حساب کنید و نتیجه را با قسمت ب مقایسه کنید. ه) سرعت متوسط متحرک را در بازه زمانی صفر تا $3/0$ پیدا کنید.

پاسخ: الف) شیب خط چین مماس بر منحنی در $t = 0/0$ برابر صفر است و نشان‌دهنده این است که سرعت متحرک در این

لحظه صفر است ($v = 0/0$ m/s). با توجه به داده‌های روی نمودار و معادله ۱۳-۱ داریم:

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

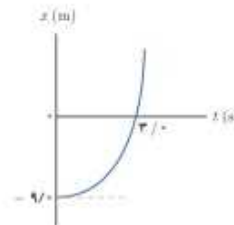
$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow 0 = \frac{1}{2}a(3/0)^2 + 0 + (-9/m) \Rightarrow a = 2/0 \text{ m/s}^2$$

ب) از معادله ۱۳-۱ داریم:

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

نمودار این معادله در شکل روبه‌رو رسم شده است.

مثال ۱۲-۱



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. ج) جابه‌جایی متحرک را در بازه زمانی صفر تا $3/0$ پیدا کنید. د) 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 $3/0$ حساب کنید و نتیجه را با قسمت ب مقایسه کنید. ه) سرعت متوسط متحرک را در بازه زمانی صفر تا $3/0$ پیدا کنید.

پاسخ: الف) شیب خط چین مماس بر منحنی در $t = 0/0$ برابر صفر است و نشان‌دهنده این است که سرعت متحرک در این

لحظه صفر است ($v = 0/0$ m/s). با توجه به داده‌های روی نمودار و معادله ۱۳-۱ داریم:

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

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

ب) از معادله ۱۳-۱ داریم:

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

نمودار این معادله در شکل روبه‌رو رسم شده است.

تیزتر، #

ب) با توجه به نمودار مکان-زمان، جابه‌جایی متحرک در بازه زمانی $(0/s, 3/s)$ برابر $9/m$ است. $\Delta x = 9 - (-9/m) = 18/m$ است.
 ت) سطح بین منحنی سرعت و محور زمان در نمودار سرعت-زمان، برابر $9/m$ است. $(\frac{1}{2} \times 6/0 m/s)(3/0 s) = 9/m$ است که با نتیجه قسمت ب سازگار است.

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

ث) از رابطه $v = at$ داریم: $v_{avr} = \frac{(v_i + v_f)}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می‌رسد. توجه کنید که می‌توانستیم سرعت متوسط در این بازه زمانی را از رابطه $v_{avr} = \frac{(v_i + v_f)}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می‌رسد.

تمرین ۱۱

خودرویی با سرعت $180 km/h$ در امتداد مسیری مستقیم از چهارراهی می‌گذرد تندی آن با شتاب $1/0 m/s^2$ 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_i ، سرعت v_f ، شتاب a متحرک استفاده کرد. برای به دست آوردن این معادله از رابطه‌های $v = at$ و $x = \frac{1}{2}at^2$ شروع می‌کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام به دست آوردن معادله مکان-زمان دیدیم می‌توان نوشت:

$$x = \left(\frac{v_i + v_f}{2}\right)t + x_i$$

با به دست آوردن t از معادله $v = at$ و قرار دادن آن در رابطه بالا داریم:

$$x = \left(\frac{v_i + v_f}{2}\right)\left(\frac{v_f - v_i}{a}\right) + x_i$$

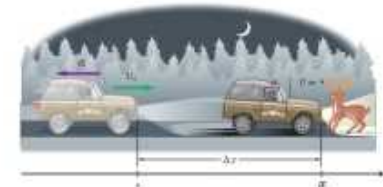
در این صورت داریم:

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

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

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

مثال ۱۳



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

الف) خودرو در چه فاصله‌ای از گوزن متوقف می‌شود؟

ب) چه مدت طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟

تیزتر، #

ب) با توجه به نمودار مکان-زمان، جابه‌جایی متحرک در بازه زمانی $(0/s, 3/s)$ برابر $9/m$ است. $\Delta x = 9 - (-9/m) = 18/m$ است.
 ت) سطح بین منحنی سرعت و محور زمان در نمودار سرعت-زمان، برابر $9/m$ است. $(\frac{1}{2} \times 6/0 m/s)(3/0 s) = 9/m$ است که با نتیجه قسمت ب سازگار است.

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

ث) از رابطه $v = at$ داریم: $v_{avr} = \frac{(v_i + v_f)}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می‌رسد. توجه کنید که می‌توانستیم سرعت متوسط در این بازه زمانی را از رابطه $v_{avr} = \frac{(v_i + v_f)}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می‌رسد.

تمرین ۹

خودرویی با سرعت $180 km/h$ در امتداد مسیری مستقیم از چهارراهی می‌گذرد تندی آن با شتاب $1/0 m/s^2$ 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_i ، سرعت v_f ، شتاب a متحرک استفاده کرد. برای به دست آوردن این معادله از رابطه‌های $v = at$ و $x = \frac{1}{2}at^2$ شروع می‌کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام به دست آوردن معادله مکان-زمان دیدیم می‌توان نوشت:

$$x = \left(\frac{v_i + v_f}{2}\right)t + x_i$$

با به دست آوردن t از معادله $v = at$ و قرار دادن آن در رابطه بالا داریم:

$$x = \left(\frac{v_i + v_f}{2}\right)\left(\frac{v_f - v_i}{a}\right) + x_i$$

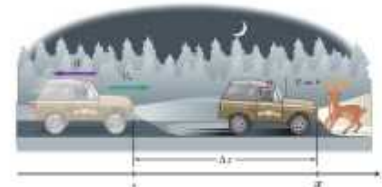
در این صورت داریم:

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

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

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

مثال ۱۳



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

الف) خودرو در چه فاصله‌ای از گوزن متوقف می‌شود؟

ب) چه مدت طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟

تیزیک ۳

در لحظه $t_1 = 2\text{ s}$ داریم:

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

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

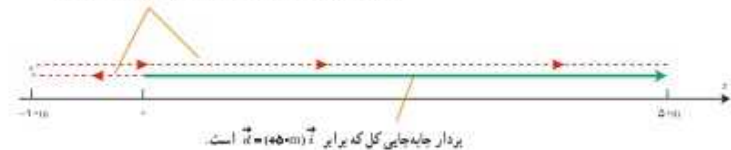
$$\Delta x = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)\Delta t = \left(\frac{2/0\text{ m/s} + 0}{2}\right)(1\text{ s}) \Rightarrow \Delta x = 1\text{ m}$$

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.

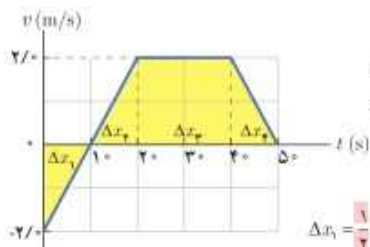


(ث) در شکل زیر جابه‌جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان حرکت نشان داده شده است.

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



بردار جابه‌جایی کل که برابر $\vec{x} = (5\text{ m})\hat{i}$ 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.

تیزیک ۳

در لحظه $t_1 = 2\text{ s}$ داریم:

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

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

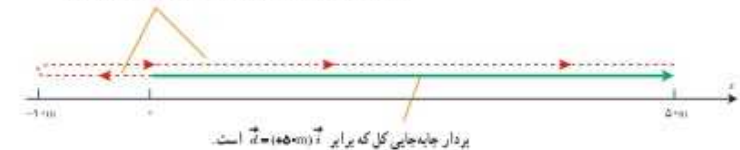
$$\Delta x = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)\Delta t = \left(\frac{2/0\text{ m/s} + 0}{2}\right)(1\text{ s}) \Rightarrow \Delta x = 1\text{ m}$$

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.

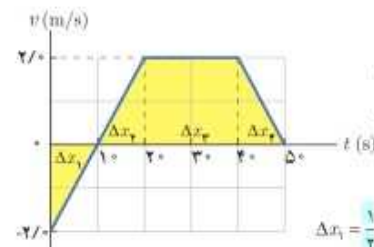


(ث) در شکل زیر جابه‌جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان حرکت نشان داده شده است.

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



بردار جابه‌جایی کل که برابر $\vec{x} = (5\text{ m})\hat{i}$ 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.

۲

فصل

دینامیک



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 مکانه و قانون دوم نیوتون
- ۴-۲ نیروی گرانشی

۲

فصل

دینامیک



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 مکانه و قانون دوم نیوتون
- ۴-۲ نیروی گرانشی

شکل ۱۲، دینامیک

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

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

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

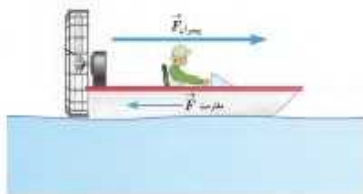
یکای SI نیرو، نیوتون است. یک نیوتون برابر با مقدار نیروی خالصی است که به جسمی به جرم یک کیلوگرم، شتابی برابر یک متر بر مربع ثانیه می‌دهد.

نسبت و آرون دارد.

و یا

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

مثال ۱۲-۱



نیروی موتور یک قایق موتوری که جرم آن با سرشتیش 400 kg است، به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در بازه زمانی معینی، همواره نیروی افقی خالص 800 N به طرف جلو بر قایق وارد می‌شود. 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؟

ب) چقدر طول می‌کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به 15.0 m/s برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه‌جا می‌شود؟

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

$$a = \frac{F_{net}}{m} = \frac{800 \text{ N}}{400 \text{ kg}} = 2.0 \text{ N/kg} = 2.0 \text{ m/s}^2$$

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

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

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

$$F_{مقاومت} = 500 \text{ N}$$

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

$$v = at + v_0 \Rightarrow 15.0 \text{ m/s} = (2.0 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 7.5 \text{ s}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(15.0 \text{ m/s})^2 - (0 \text{ m/s})^2}{2(2.0 \text{ m/s}^2)} = 56.25 \text{ m}$$

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

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

شکل ۱۲، دینامیک

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

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

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

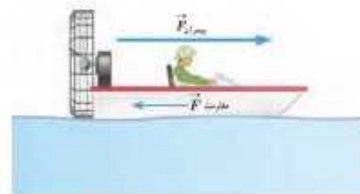
یکای SI نیرو، نیوتون است. یک نیوتون برابر با مقدار نیروی خالصی است که به جسمی به جرم یک کیلوگرم، شتابی برابر یک متر بر مربع ثانیه می‌دهد.

نسبت و آرون دارد.

و یا

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

مثال ۱۲-۲



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

ب) چقدر طول می‌کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به 15.0 m/s برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه‌جا می‌شود؟

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

$$a = \frac{F_{net}}{m} = \frac{800 \text{ N}}{400 \text{ kg}} = 2.0 \text{ N/kg} = 2.0 \text{ m/s}^2$$

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

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

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

$$F_{مقاومت} = 500 \text{ N}$$

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

$$v = at + v_0 \Rightarrow 15.0 \text{ m/s} = (2.0 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 7.5 \text{ s}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{(15.0 \text{ m/s})^2 - (0 \text{ m/s})^2}{2(2.0 \text{ m/s}^2)} = 56.25 \text{ m}$$

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

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

شماره ۱۲، دینامیک

مثال ۳-۲



دو شخص به جرم‌های $75/6 \text{ kg}$ و $50/6 \text{ kg}$ با کشش‌های جرخ‌دار در یک سطح مسطح و صاف روی‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی $100/6 \text{ N}$ 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}) هم‌اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند (\vec{F}_{21}). یا انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

$$F_{12} = -F_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = 100/6 \text{ N}$$

$$a_2 = \frac{F_{12}}{m_2} = \frac{(100/6 \text{ N}) \hat{i}}{50/6 \text{ kg}} = (2/6 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \hat{i} = (2/6 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \hat{i}$$

$$a_1 = \frac{F_{21}}{m_1} = \frac{-(100/6 \text{ N}) \hat{i}}{75/6 \text{ kg}} = -(1/37 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \hat{i} = -(1/37 \text{ m/s}^2) \hat{i}$$

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

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 ۳-۲). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف زمین شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود (حرکت سقوط آزاد)، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم:

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

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

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



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

شماره ۱۲، دینامیک

مثال ۳-۲



دو شخص به جرم‌های $75/6 \text{ kg}$ و $50/6 \text{ kg}$ با کشش‌های جرخ‌دار در یک سطح مسطح و صاف روی‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی $100/6 \text{ N}$ 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}) هم‌اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند (\vec{F}_{21}). یا انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

$$F_{12} = -F_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = 100/6 \text{ N}$$

$$a_2 = \frac{F_{12}}{m_2} = \frac{(100/6 \text{ N}) \hat{i}}{50/6 \text{ kg}} = (2/6 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \hat{i} = (2/6 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \hat{i}$$

$$a_1 = \frac{F_{21}}{m_1} = \frac{-(100/6 \text{ N}) \hat{i}}{75/6 \text{ kg}} = -(1/37 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \hat{i} = -(1/37 \text{ m/s}^2) \hat{i}$$

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

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 ۳-۲). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف زمین شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود (حرکت سقوط آزاد)، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم:

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

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

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



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

توجه داریم که جهت وزن و شتاب گرانشی همواره به طرف زمین (مرکز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است. اما وزن آن طبق رابطه $W = mg$ به مقدار g در آن مکان بستگی دارد. مثلاً اگر جرم شخصی 60 kg باشد، در محلی که $g = 9.80\text{ N/kg}$ است، وزن آن 588 N و در بالونی که در ارتفاع زیاد حرکت می‌کند و در آن ارتفاع $g = 9.76\text{ N/kg}$ است وزن آن تقریباً 586 N است. شتاب جاذبه در سطح زمین تقریباً 9.8 N/kg است.

تمرین ۱-۲

الف) وزن قطعه‌ای طلا به جرم 100 گرم را روی سطح زمین بدست 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 بدست آورید و با هم مقایسه کنید. ($g_{\text{سیاره}} = 9.8\text{ N/kg}$ ، $g_{\text{ماه}} = 1.6\text{ N/kg}$ ، $g_{\text{مریخ}} = 3.7\text{ N/kg}$)

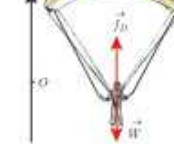
توجه کنید، حتی اگر جسم در حال سقوط آزاد نباشد باز هم نیروی وزن (W) بر آن وارد می‌شود. مثلاً بر یک چترپاز قبل از پرش، در حال سقوط و حتی هنگام رسیدن به زمین، نیروی وزن وارد شده و از رابطه $W = mg$ به دست می‌آید.

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 (مائع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شماره نیروی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن نیروی مقاومت شماره می‌گویند و معمولاً آن را با 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. همان‌طور که می‌دانیم اگر جسم در هوا حرکت کند، به این نیرو، نیروی مقاومت هوا می‌گویند.

مثال ۲-۲

چترپازی به جرم 60 kg مدتی پس از یک پرش آزاد، چترش را باز می‌کند. ناگهان نیروی مقاومت هوا به 1140 N افزایش می‌یابد. شتاب چترپاز را در این لحظه بدست 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 چترپاز در این حالت می‌توانیم بنویسیم:



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

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

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید شتاب چترپاز در این حالت 9 m/s^2 و رو به بالا، یعنی در خلاف جهت حرکت آن است. پس به تدریج تندی چترپاز کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی مقاومت هوا نیز کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن هم‌اندازه شده و نیروهای وارد بر چترپاز متوازن شوند. پس از این چترپاز با تندی ثابتی موسوم به تندی حدی، به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک چترپاز نوعی حدود 5 m/s و برای فطرات باران حدود 7 m/s است.

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

۲- سرواز Drag به معنای (پس کشی) است.

توجه داریم که جهت وزن و در نتیجه شتاب گرانشی همواره به طرف زمین (مرکز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است. اما وزن آن طبق رابطه $W = mg$ به مقدار g در آن مکان بستگی دارد. مثلاً اگر جرم شخصی 60 kg باشد، در محلی که $g = 9.80\text{ N/kg}$ است، وزن آن 588 N و در بالونی که در ارتفاع زیاد حرکت می‌کند و در آن ارتفاع $g = 9.76\text{ N/kg}$ است تقریباً 586 N است. شتاب جاذبه در سطح زمین تقریباً 9.8 N/kg است.

تمرین ۱-۲

الف) وزن قطعه‌ای طلا به جرم 100 گرم را روی سطح زمین بدست 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 بدست آورید و با هم مقایسه کنید. ($g_{\text{سیاره}} = 9.8\text{ N/kg}$ ، $g_{\text{ماه}} = 1.6\text{ N/kg}$ ، $g_{\text{مریخ}} = 3.7\text{ N/kg}$)

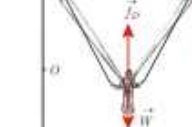
توجه کنید، حتی اگر جسم در حال سقوط آزاد نباشد باز هم نیروی وزن (W) بر آن وارد می‌شود. مثلاً بر یک چترپاز قبل از پرش، در حال سقوط و حتی هنگام رسیدن به زمین، نیروی وزن وارد شده و از رابطه $W = mg$ به دست می‌آید.

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 (مائع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شماره نیروی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن نیروی مقاومت شماره می‌گویند و معمولاً آن را با 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. همان‌طور که می‌دانیم اگر جسم در هوا حرکت کند، به این نیرو، نیروی مقاومت هوا می‌گویند.

مثال ۲-۲

چترپازی به جرم 60 kg مدتی پس از یک پرش آزاد، چترش را باز می‌کند. ناگهان نیروی مقاومت هوا به 1140 N افزایش می‌یابد. شتاب چترپاز را در این لحظه بدست 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 چترپاز در این حالت می‌توانیم بنویسیم:



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

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

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

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

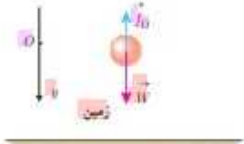
۲- سرواز Drag به معنای (پس کشی) است.

فصل ۲، دینامیک

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

مثال ۲-۲

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 برای ما حاصل‌ضرب جرم در شتاب است. نیروی مقاومت هوا را با f_D و وزن را با W نشان می‌دهیم و برای بررسی ساده‌تر حرکت گوی‌ها، جهت مثبت محور y را به طرف پایین انتخاب می‌کنیم:



$$W - f_D = ma \Rightarrow a = \frac{W - f_D}{m} = \frac{mg - f_D}{m} = g - \frac{f_D}{m}$$

یعنی با در نظر گرفتن مقاومت هوا، هر چه m بیشتر باشد، شتاب حرکت بیشتر است. در نتیجه $a_2 > a_1$ است.

طبق رابطه سرعت-جابجایی می‌توانیم بنویسیم:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2a\Delta y \Rightarrow v_2^2 - v_1^2 = 2ab \Rightarrow v_2 = \sqrt{2ab} \Rightarrow v_2 > v_1$$

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

نمونه ۲-۲

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

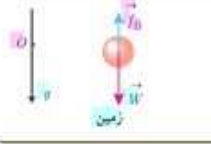


شکل ۲-۷ نیروهای وارد بر لپ‌تاپ متوازن‌اند.

فصل ۲، دینامیک

مثال ۲-۲

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



پاسخ: (الف) بر این گوی‌ها، دو نیروی وزن و مقاومت هوا وارد می‌شود. طبق قانون دوم نیوتون، نیروی خالص وارد بر گوی برابر با حاصل‌ضرب جرم در شتاب است. نیروی مقاومت هوا را با f_D و وزن را با W نشان می‌دهیم و برای بررسی ساده‌تر حرکت گوی‌ها، جهت مثبت محور y را به طرف پایین انتخاب می‌کنیم:

$$W - f_D = ma \Rightarrow a = \frac{W - f_D}{m} = \frac{mg - f_D}{m} = g - \frac{f_D}{m}$$

یعنی با در نظر گرفتن مقاومت هوا، هر چه m بیشتر باشد، شتاب حرکت بیشتر است. در نتیجه $a_2 > a_1$ است.

$$mg - f_D = ma, a = 0 \Rightarrow f_D = mg$$

(ب) در حالتی که گوی‌ها به تندی حدی می‌رسند:

$$m_2 > m_1 \Rightarrow f_{D2} > f_{D1}$$

می‌دانیم هرچه قدر تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شاره نیز بیشتر است. بنابراین

$$v_2 > v_1$$

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

نمونه ۲-۲

اگر در مثال ۲-۲ از مقاومت هوا صرف‌نظر 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. بر لپ‌تاپ ساکن روی میز افقی چه نیروهایی وارد می‌شود؟ با توجه به اینکه نیروی وزن بر لپ‌تاپ وارد می‌شود، چه نیرویی سبب خنثی شدن آن و سکون جسم می‌شود؟



شکل ۲-۷ نیروهای وارد بر لپ‌تاپ متوازن‌اند.

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

همان‌طور که می‌دانیم نیروهای وارد بر جسم ساکن، متوازن‌اند، بنابراین در این حالت باید یک نیروی هم‌اندازه و در خلاف جهت وزن از طرف میز (سطح) بر لپ‌تاپ وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، نیروی عمودی سطح (کنیکه گاه) 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 شدیم.

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 (کنیکه گاه) 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 شدیم.

فصل ۲، دینامیک

(ب)

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

جهت شتاب رو به پایین است.

$$F_N = (60 \cdot 10 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} - 2 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 468 \text{ N}$$

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

(ت) وقتی کابلی 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.

پرسش ۲-۶

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

الف) آسانسور به طرف بالا شروع به حرکت کند.

ب) آسانسور به طرف پایین شروع به حرکت کند.

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

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 سطحی که بسیار هموار به نظر می‌آید، ناهمواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارند که سبب اصطکاک می‌شوند.

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

فصل ۲، دینامیک

(ب)

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

جهت شتاب رو به پایین است.

$$F_N = (60 \cdot 10 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} - 2 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) = 468 \text{ N}$$

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

(ت) وقتی کابلی 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.

پرسش ۲-۶

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

الف) آسانسور به طرف بالا شروع به حرکت کند.

ب) آسانسور به طرف پایین شروع به حرکت کند.

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

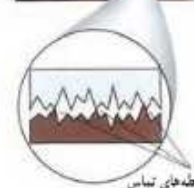
اصطکاک بین دو جسم به جنس سطح دو جسم، و زبری و نرمی آنها و... بستگی دارد؛ مثلاً اصطکاک بین کفش و سطح زمین به جنس زیره کفش و سطحی که روی آن حرکت می‌کنیم بستگی دارد.

نیروی اصطکاک بین دو جسم به علت ناهمواری‌های محل تماس دو جسم ایجاد می‌شود (شکل ۲-۱۰). حتی سطحی که بسیار هموار به نظر می‌آید، ناهمواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارند که سبب اصطکاک می‌شوند.

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

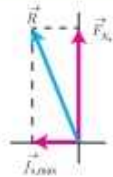
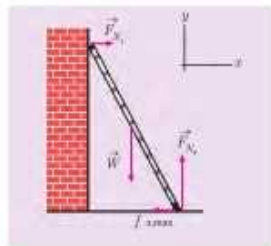


شکل ۲-۹ نیروی اصطکاک ایستایی در خلاف جهت هل دادن به وجود آمده است.



شکل ۲-۱۰

فیزیک ۳



یک دستگاه مختصات انتخاب می‌کنیم. در آستانه حرکت، زردبان همچنان در حال تعادل است. بنابراین نیروی خالص در راستای قائم و افقی صفر است.

$$F_{Nv} - W = 0 \Rightarrow F_{Nv} = W = mg = (20 \cdot 10 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 196 \text{ N}$$

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

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

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

که بزرگی آن برابر است با

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

با برآیند نیروهای افقی وارد بر زردبان صفر است؛ پس:

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

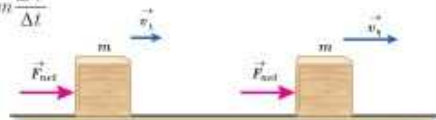
در نبود نیروی اصطکاک بین زردبان و دیوار، نیروی F_{Nv} همان نیروی وارد از دیوار به زردبان است.

۳-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون

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

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

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



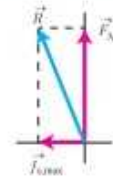
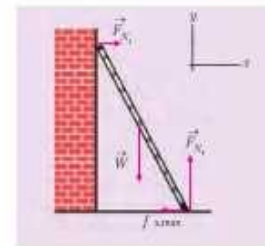
شکل ۱۸-۷ سرعت جسم تحت تأثیر نیروی خالص ثابت \vec{F}_{net} از \vec{v}_i به \vec{v}_f می‌رسد.

با فرض ثابت بودن جرم جسم (m) می‌توانیم جرم را در کنار سرعت (v) قرار دهیم.

$$\vec{F}_{net} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$$

حاصل ضرب جرم جسم (m) در سرعت آن (\vec{v}) ، تکانه جسم نامیده می‌شود و آن را با \vec{p} نشان می‌دهیم.

فیزیک ۳



یک دستگاه مختصات انتخاب می‌کنیم. در آستانه حرکت، زردبان همچنان در حال تعادل است. بنابراین نیروی خالص در راستای قائم و افقی صفر است.

$$F_{Nv} - W = 0 \Rightarrow F_{Nv} = W = mg = (20 \cdot 10 \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg}) = 196 \text{ N}$$

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

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

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

که بزرگی آن برابر است با

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

با برآیند نیروهای افقی وارد بر زردبان صفر است؛ پس:

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

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

۳-۲ تکانه و قانون دوم نیوتون

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

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

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



شکل ۱۸-۷ سرعت جسم تحت تأثیر نیروی خالص ثابت \vec{F}_{net} از \vec{v}_i به \vec{v}_f می‌رسد.

با فرض ثابت بودن جرم جسم (m) می‌توانیم جرم را در کنار سرعت (v) قرار دهیم.

$$\vec{F}_{net} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$$

حاصل ضرب جرم جسم (m) در سرعت آن (\vec{v}) ، تکانه جسم نامیده می‌شود و آن را با \vec{p} نشان می‌دهیم.

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

تیزیک ۳



- ۱-۲ و ۲-۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص**
- سیبی را در نظر بگیرید که به شاخهٔ درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.
 - الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟
 - دانش‌آموزی به جرم 50 kg روی یک ترازوی فتری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ ($g=9.8\text{ N/kg}$)
 - الف) آسانسور ساکن است.
 - ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
 - ب) 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.
 - 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.
 - راندۀ خودرویی که با سرعت 72 km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت 20 m متوقف می‌شود.
 - الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟
 - ب) از لحظهٔ ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟
 - ب) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
 - جرم خودرو را 1200 kg در نظر بگیرید.
 - جتریبازی از یک بالگرد تقریباً ساکنی که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌برد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت جتریباز را از لحظهٔ برش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.
 - دو گوی هم‌اندازه را که جرم یکی دو برابر دیگری است ($m_1=2m_2$) از بالای برجی به ارتفاع h به‌طور هم‌زمان رها می‌کنیم. با فرض اینکه نیروی مقاومت هوا در طی حرکت دو گوی ثابت و یکسان باشد، تندی برخورد کدام گوی با زمین بیشتر است؟ چرا؟



پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

تیزیک ۳



- ۱-۲ و ۲-۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص**
- سیبی را در نظر بگیرید که به شاخهٔ درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.
 - الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟
 - دانش‌آموزی به جرم 50 kg روی یک ترازوی فتری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ ($g=9.8\text{ N/kg}$)
 - الف) آسانسور ساکن است.
 - ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.
 - ب) 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.
 - 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.
 - راندۀ خودرویی که با سرعت 72 km/h در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت 20 m متوقف می‌شود.
 - الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟
 - ب) از لحظهٔ ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟
 - ب) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
 - جرم خودرو را 1200 kg در نظر بگیرید.
 - جتریبازی از یک بالگرد تقریباً ساکنی که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌برد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت جتریباز را از لحظهٔ برش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.
 - در شکل صفحهٔ بعد، نیروی F_1 به بزرگی 200 N بر جمعه وارد شده است. اما جمعه همچنان ساکنی است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم F_2 که جمعه را به زمین می‌فشارد از صفر



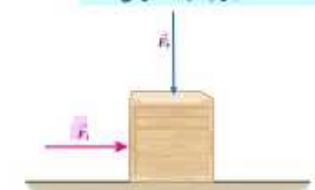
مسئله ۱۲، دینامیک

الف) آسانسور ساکن است.

ب) آسانسور با سرعت ثابت $2/0 \text{ m/s}$ رو به پایین در حرکت است.
 ب) آسانسور با شتاب ثابت $2/0 \text{ m/s}^2$ از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.
 ت) آسانسور با شتاب ثابت $2/0 \text{ m/s}^2$ از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

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

۱۱۲. در شکل زیر، 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 F_2 که جعبه را به زمین می فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت های زیر چگونه تغییر می کنند؟



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه
 ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه
 ب) اندازه پیشینه نیروی اصطکاک ایستایی

ت) نیروی خالص وارد بر جسم
 ۱۱۴. می خواهیم به جسمی که جرم آن $5/0 \text{ kg}$ است، شتاب $2/0 \text{ m/s}^2$ بدهیم. در هر یک از حالت های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف نظر می شود.



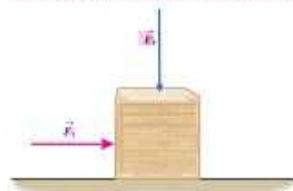
الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
 ب) زمان واکنش راننده ای $0/6 \text{ s}$ است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18 m را طی می کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

ب) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از $5/ \text{ s}$ متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
 ت) وقتی خودرو ترمز می کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را 1500 kg فرض کنید.

۱۱۴. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 220 N و 280 N است.



شروع به افزایش کند، کمیت های زیر چگونه تغییر می کنند؟



الف) اندازه نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه
 ب) اندازه نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه
 ب) اندازه پیشینه نیروی اصطکاک ایستایی
 ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۱۱۳. می خواهیم به جسمی که جرم آن $5/0 \text{ kg}$ است، شتاب $2/0 \text{ m/s}^2$ بدهیم. در هر یک از حالت های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف نظر می شود.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
 ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک $0/2$ به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.

ب) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.
 ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.
 ۱۱۴. قطعه جوی را با سرعت افقی $1/0 \text{ m/s}$ روی سطحی افقی برتاب می کشیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین جوب و سطح $0/2$ است.

الف) جوب پس از بیمودن چه مسافتی می ایستد؟
 ب) اگر از یک قطعه جوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه جوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت برتاب شود، مسافت بیموده شده آن چند برابر می شود؟

۱۱۵. وزنه ای به جرم $2/0 \text{ kg}$ را به انتهای فتری به طول 12 cm که ثابت آن 20 N/cm است می بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می کنیم. طول فنر را در حالت های الف تا ت محاسبه کنید.

مسئله ۱۲، دینامیک

الف) آسانسور ساکن است.
 ب) آسانسور با سرعت ثابت $2/0 \text{ m/s}$ رو به پایین در حرکت است.
 ب) آسانسور با شتاب ثابت $2/0 \text{ m/s}^2$ از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.
 ت) آسانسور با شتاب ثابت $2/0 \text{ m/s}^2$ از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

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



الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
 ب) زمان واکنش راننده ای $0/6 \text{ s}$ است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18 m را طی می کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.

ب) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از $5/ \text{ s}$ متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
 ت) وقتی خودرو ترمز می کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را 1500 kg فرض کنید.

۱۱۴. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 220 N و 280 N است.



۳

فصل



نوسان و امواج



عمل لیتوتریسی (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 لیتوتریسی 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 ارتزی 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

۳

فصل



نوسان و امواج



عمل لیتوتریسی (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 لیتوتریسی 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 ارتزی 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

فیزيک، ۳۳



شکل ۳۳- الف) ضربان قلب انسان، ب) تاب خوردن، پ) بالا و پایین رفتن سر نشینان کنشی، ت) زمین لرزه، نمونه‌هایی از نوسان هستند.

دتهای ما بر از نوسان است. ضربان قلب انسان، تاب خوردن، بالا و پایین رفتن سر نشینان کنشی روی امواج خروشان دریا و زمین لرزه نمونه‌هایی از این دست هستند (شکل ۳۳-۱). 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 پدیده تشدید و سیس یا 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 به‌خصوص کاربردهای فراوان در علوم طبیعی دارند.

۳-۱ نوسان دوره‌ای

نوسان‌ها می‌توانند دوره‌ای یا غیر دوره‌ای باشند؛ مثلاً شکل ۳-۲ تصویری از ضربانگ (ریت) قلب یک شخص را نشان می‌دهد که در هر دقیقه ۶۵ بار می‌زند. نقش‌های این تصویر به‌طور منظم دقیقاً تکرار می‌شوند، که به آن **جرخه (سیکل) نوسان** گفته می‌شود. چنین نوسان‌هایی را که هر **جرخه** آن در دوره‌های دیگر تکرار شود **نوسان‌های دوره‌ای** می‌نامند. مدت زمان یک **جرخه**، **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 $\frac{1}{92}$ ثانیه است.

و نوار



شکل ۳۳- ب) نمونه‌ای از نمودار الکترو قلب نگاره (نوار قلب) یک شخص

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

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{بسامد}) \quad (۳-۱)$$

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

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

پوشی ۳-۱

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

۱- Electro Cardio Gram (ECG)

فیزيک، ۳۳



شکل ۳۳- الف) ضربان قلب انسان، ب) تاب خوردن، پ) بالا و پایین رفتن سر نشینان کنشی، ت) زمین لرزه، نمونه‌هایی از نوسان هستند.

دتهای ما بر از نوسان است. ضربان قلب انسان، تاب خوردن، بالا و پایین رفتن سر نشینان کنشی روی امواج خروشان دریا و زمین لرزه نمونه‌هایی از این دست هستند (شکل ۳۳-۱). 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 پدیده تشدید و سیس یا 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 به‌خصوص کاربردهای فراوان در علوم طبیعی دارند.

۳-۱ نوسان دوره‌ای

نوسان‌ها می‌توانند دوره‌ای یا غیر دوره‌ای باشند؛ مثلاً شکل ۳-۲ تصویری از ضربانگ (ریت) قلب یک شخص را نشان می‌دهد که در هر دقیقه ۶۵ بار می‌زند. نقش‌های این تصویر به‌طور منظم دقیقاً تکرار می‌شوند، که به آن **جرخه (سیکل) نوسان** گفته می‌شود. چنین نوسان‌هایی را که هر **جرخه** آن در دوره‌های دیگر تکرار شود **نوسان‌های دوره‌ای** می‌نامند. مدت زمان یک **جرخه**، **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 $\frac{1}{92}$ ثانیه است.



شکل ۳۳- ب) نمونه‌ای از نمودار الکترو قلب نگاره (نوار قلب) یک شخص

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

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{بسامد}) \quad (۳-۱)$$

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

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

پوشی ۳-۱

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

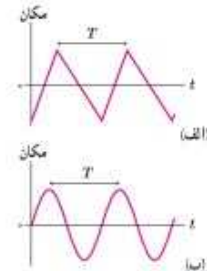
۱- Electro Cardio Gram (ECG)

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

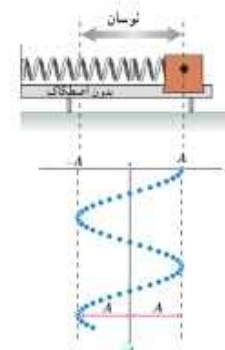
فصل ۳، نوسان و امواج

۲-۳ حرکت هماهنگ ساده

در بخش پیش با نموداری از یک نوسان دوره‌ای آشنا شدیم. شکل ۲-۳، دو نمونه دیگر از نوسان‌های دوره‌ای را با رسم نمودار مکان-زمان آنها نشان می‌دهد. هر دوی این نوسان‌ها دوره‌ای هستند، ولی نوسان شکل ۲-۳ ب، به طور سینوسی^۱ رخ داده است. به نوسان‌های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (SHM) گفته می‌شود. حرکت هماهنگ ساده، مبنای 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 ۲-۳ ج، جسم متصل به فنری را نشان می‌دهد که روی سطح افقی بدون اصطکاک قرار گرفته است. اگر جسم به اندازه چند سانتی‌متر کشیده و سپس رها شود، به جلو و عقب نوسان خواهد کرد. اگر مکان جسم را در بازه‌های زمانی متوالی و یکسان ثبت کنیم به نموداری سینوسی می‌رسیم که در این شکل نشان داده شده است. در این شکل جسم بین $x = +A$ و $x = -A$ به جلو و عقب می‌رود که در آن A دامنه حرکت است. به عبارتی دامنه حرکت، بیشینه فاصله جسم از نقطه تعادل است. توجه کنید که دامنه، فاصله بین دو انتهای مسیر نیست.



شکل ۲-۳ نمودار مکان-زمان برای دو نمونه از نوسان دوره‌ای



همان‌طور که دیدیم، در حرکت هماهنگ ساده نمودار مکان-زمان، نموداری سینوسی است. یعنی مکان (با 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:

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

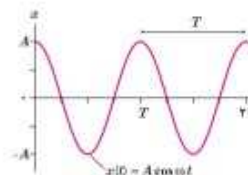
در این رابطه ω بسامد زاویه‌ای نوسانگر نامیده می‌شود و برابر است با:

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

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

توجه کنید که در رابطه ۲-۳، شناسه تابع کسینوس (یعنی m) برحسب رادیان است. شکل ۲-۳ د، نموداری از این تابع را نشان می‌دهد. اگر به حرکت سامانه جرم-فنر شکل ۲-۳ توجه کنید درمی‌یابید که وقتی نوسانگر در $x = \pm A$ است، سرعت آن برابر با صفر است. به این نقطه‌ها اصطلاحاً نقطه‌های بازگشت^۲ 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، $v = +v_{\text{max}}$ یا $v = -v_{\text{max}}$ خواهد بود.^۳ اگرچه روابط ۲-۳ و ۳-۲ و بحث کوانته که درباره سرعت نوسانگر انجام دادیم برای سامانه جرم-فنر بود، ولی برای هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای (از جمله آونگ ساده) برقرار است.

شکل ۲-۳ سامانه جرم و فنر. نمونه نمایی از یک حرکت هماهنگ ساده است.

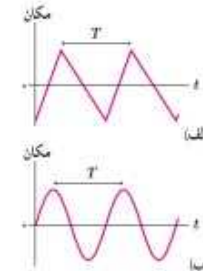


شکل ۲-۳ د نمودار مکان-زمان برای حرکت هماهنگ ساده

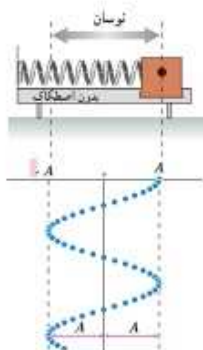
۱- Simple Harmonic Motion. به طور عمومی به همه تابع‌های سینوسی و کسینوسی، تابع سینوسی می‌گویند.
 ۲- Turning Points. ورسی روابط سرعت-زمان و سرعت-مکان در حرکت هماهنگ ساده، خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید در ارزشیابی این درس مورد پیش قرار گیرد.
 ۳- ورسی روابط سرعت-زمان و سرعت-مکان در حرکت هماهنگ ساده، خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید در ارزشیابی این درس مورد پیش قرار گیرد.

۲-۳ حرکت هماهنگ ساده

در بخش پیش با نموداری از یک نوسان دوره‌ای آشنا شدیم. شکل ۲-۳، دو نمونه دیگر از نوسان‌های دوره‌ای را با رسم نمودار مکان-زمان آنها نشان می‌دهد. هر دوی این نوسان‌ها دوره‌ای هستند، ولی نوسان شکل ۲-۳ ب، به طور سینوسی^۱ رخ داده است. به نوسان‌های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (SHM) گفته می‌شود. حرکت هماهنگ ساده، مبنای 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 ۲-۳ ج، جسم متصل به فنری را نشان می‌دهد که روی سطح افقی بدون اصطکاک قرار گرفته است. اگر جسم به اندازه چند سانتی‌متر کشیده و سپس رها شود، به جلو و عقب نوسان خواهد کرد. اگر مکان جسم را در بازه‌های زمانی متوالی و یکسان ثبت کنیم به نموداری سینوسی می‌رسیم که در این شکل نشان داده شده است. در این شکل جسم بین $x = +A$ و $x = -A$ به جلو و عقب می‌رود که در آن A دامنه حرکت است. به عبارتی دامنه حرکت، بیشینه فاصله جسم از نقطه تعادل است. توجه کنید که دامنه، فاصله بین دو انتهای مسیر نیست.



شکل ۲-۳ نمودار مکان-زمان برای دو نمونه از نوسان دوره‌ای



همان‌طور که دیدیم، در حرکت هماهنگ ساده نمودار مکان-زمان، نموداری سینوسی است. یعنی مکان (با 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:

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

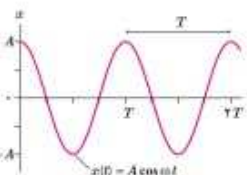
در این رابطه ω بسامد زاویه‌ای نوسانگر نامیده می‌شود و برابر است با:

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

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

توجه کنید که در رابطه ۲-۳، شناسه تابع کسینوس (یعنی m) برحسب رادیان است. شکل ۲-۳ د، نموداری از این تابع را نشان می‌دهد. اگر به حرکت سامانه جرم-فنر شکل ۲-۳ توجه کنید درمی‌یابید که وقتی نوسانگر در $x = \pm A$ است، سرعت آن برابر با صفر است. به این نقطه‌ها اصطلاحاً نقطه‌های بازگشت^۲ 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، $v = +v_{\text{max}}$ یا $v = -v_{\text{max}}$ خواهد بود.^۳ اگرچه روابط ۲-۳ و ۳-۲ و بحث کوانته که درباره سرعت نوسانگر انجام دادیم برای سامانه جرم-فنر بود، ولی برای هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای (از جمله آونگ ساده) برقرار است.

شکل ۲-۳ سامانه جرم و فنر. نمونه نمایی از یک حرکت هماهنگ ساده است.



شکل ۲-۳ د نمودار مکان-زمان برای حرکت هماهنگ ساده

۱- Simple Harmonic Motion. به طور عمومی به همه تابع‌های سینوسی و کسینوسی، تابع سینوسی می‌گویند.
 ۲- Turning Points. ورسی روابط سرعت-زمان و سرعت-مکان در حرکت هماهنگ ساده، خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید در ارزشیابی این درس مورد پیش قرار گیرد.
 ۳- ورسی روابط سرعت-زمان و سرعت-مکان در حرکت هماهنگ ساده، خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید در ارزشیابی این درس مورد پیش قرار گیرد.

تمرین ۳-۳

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از، 0.4m ، 0.9m ، 1.6m ، 2.5m ، 3.6m . فرض کنید میله دستخوش نوسان‌هایی افقی با بسامد زاویه‌ای در گستره 2 rad/s تا 4 rad/s شود. 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).

پوش ۳-۳

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 پارچا 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 ۳-۱۱ با برتاب سنگ در آب، فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.

هر گاه در ناحیه‌ای از یک محیط کثنسان، ارتعاشی به‌وجود آید، موجب پدیده آمدن ارتعاش‌های بی‌دری دیگری می‌شود که از محل شروع ارتعاش دور و دورترند و به این ترتیب آنچه که **موج مکانیکی** می‌نامند، به‌وجود می‌آید. معمولاً موج‌ها را به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: **موج‌های مکانیکی و موج‌های الکترومغناطیسی**. موج‌های مکانیکی - مانند موج‌های روی سطح آب (شکل ۳-۱۱) 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 فتر بلند کشیده شده‌ای را به سرعت به چپ و راست تکان دهید، موجی مطابق شکل در طول فتر منتشر می‌شود که به آن **تپ** می‌گویند. اگر سر آزاد فتر 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 فتر موجب



شکل ۳-۱۱ تپ‌های ایجاد موج در یک فتر بلند کشیده.

تمرین ۳-۳

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از، 0.4m ، 0.9m ، 1.6m ، 2.5m ، 3.6m . فرض کنید میله دستخوش نوسان‌هایی افقی با بسامد زاویه‌ای در گستره 2 rad/s تا 4 rad/s شود. 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).

پوش ۳-۳

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 پارچا 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 ۳-۱۱ با برتاب سنگ در آب، فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.

هر گاه در ناحیه‌ای از یک محیط کثنسان، ارتعاشی به‌وجود آید، موجب پدیده آمدن ارتعاش‌های بی‌دری دیگری می‌شود که از محل شروع ارتعاش دور و دورترند و به این ترتیب آنچه که **موج مکانیکی** می‌نامند، به‌وجود می‌آید. معمولاً موج‌ها را به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: **موج‌های مکانیکی و موج‌های الکترومغناطیسی**. موج‌های مکانیکی - مانند موج‌های روی سطح آب (شکل ۳-۱۱) و موج‌های صوتی - برای انتشار خود به یک محیط مادی نیاز دارند و موج‌های الکترومغناطیسی - مانند نور مرئی، موج‌های رادیویی و تلویزیونی، میکروموج و پرتوهای X -

برای انتشار خود به محیط مادی نیاز ندارند، اما در محیط مادی نیز می‌توانند منتشر شوند.

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

اگر مانند شکل ۳-۱۱ یک سر فتر بلند کشیده شده‌ای را به سرعت به چپ و راست تکان دهید، موجی مطابق شکل در طول فتر منتشر می‌شود که به آن **تپ** می‌گویند. اگر سر آزاد فتر 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 فتر موجب



شکل ۳-۱۱ تپ‌های ایجاد موج در یک فتر بلند کشیده.

مثال ۳-۵

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تخت موج شکل ۱۶-۳ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دوره تناوب $1/10$ s در تنشی به عمق $2/5$ cm نوسان کند، فاصله بین دو برآمدگی مجاور 50 cm و اگر در تنشی به عمق $3/5$ cm نوسان کند، این فاصله 60 cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تخت در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ: فاصله دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دوره تناوب موج برابر با دوره تناوب نوسان‌های جسمه موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطه ۹-۳ به دست می‌آوریم.



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

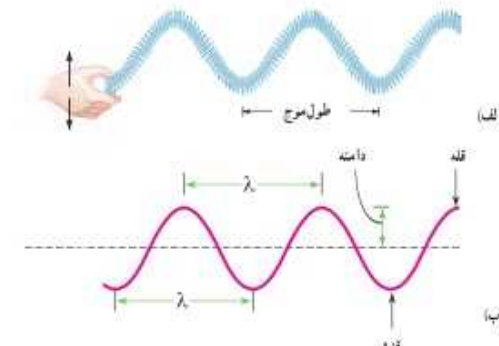
$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{50 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 500 \text{ m/s}$$

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

$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{60 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 600 \text{ m/s}$$

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

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



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

مثال ۳-۵

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تخت موج شکل ۱۶-۳ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دوره تناوب $1/10$ s در تنشی به عمق $2/5$ cm نوسان کند، فاصله بین دو برآمدگی مجاور 50 cm و اگر در تنشی به عمق $3/5$ cm نوسان کند، این فاصله 60 cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تخت در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ: فاصله دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دوره تناوب موج برابر با دوره تناوب نوسان‌های جسمه موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطه ۹-۳ به دست می‌آوریم.



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

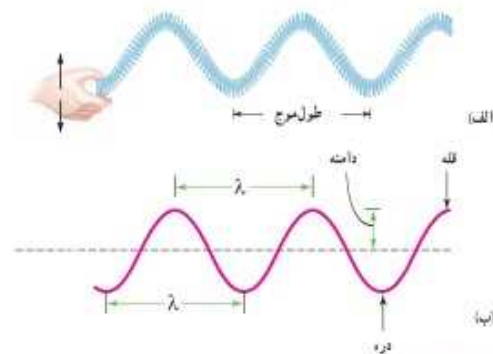
$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{50 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 500 \text{ m/s}$$

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

$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{60 \text{ m}}{1/10 \text{ s}} = 600 \text{ m/s}$$

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

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



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

تصویر ۳-۴



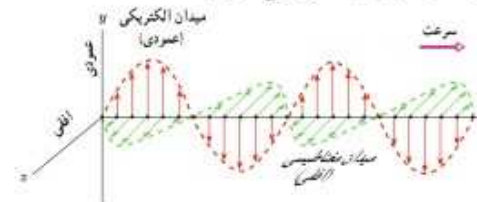
در سازه‌های زهی همانند تار، گمانچه و گیتار با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت 0.628m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار 0.8g و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار 2.22g است. تارها تحت کششی برابر 226N قرار دارند. تندی انتشار موج در هر یک از این دو تار چقدر است؟



جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱-۱۸۷۹ م.) در شهر ادینبورگ اسکاتلند زاده شد. جیمز در دوران دانشجویی آموزی بسیار کنجگوار بود و به ساختن اسباب‌ها و دستگاه‌های فنی خیلی علاقه داشت و به‌رغم هم‌وزن‌ها به این کار شوق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت تکریمی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی حلقه‌های سیم‌رازل 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 دستگاه‌های ممانه رادیو، تلویزیون، رادار و غیره گشود که هنگی و اساس امواج الکترومغناطیسی کار می‌کنند.

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

امواج الکترومغناطیسی: در کتاب فیزیک ۲ آموختیم که بار الکتریکی، میدان الکتریکی ایجاد می‌کند و جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اگر بارهای الکتریکی ساکن باشند، میدان الکتریکی حاصل از آنها با زمان تغییر نمی‌کند. به همین ترتیب اگر جریان الکتریکی ثابت باشد، میدان مغناطیسی حاصل از آن ثابت و بدون تغییر می‌شود. امواج الکترومغناطیسی از رابطه متقابل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌وجود می‌آیند. یعنی هر تغییری در میدان الکتریکی در هر نقطه از فضا، میدان مغناطیسی متغیری ایجاد می‌کند و این میدان مغناطیسی متغیر، خود میدان الکتریکی متغیری به‌وجود می‌آورد. این رابطه متقابل میدان‌ها سبب انتقال نوسان‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از یک نقطه فضا به نقاط دیگر و یا همان انتشار موج الکترومغناطیسی می‌شود. ایجاد میدان الکتریکی به علت تغییر میدان مغناطیسی همان‌القای 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 نانی از تغییرات هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشد. شکل ۳-۲، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمه تولید موج نشان می‌دهد.



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

تصویر ۳-۳



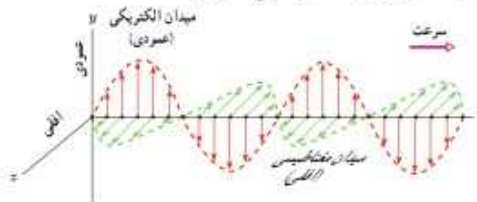
در سازه‌های زهی همانند تار، گمانچه و گیتار با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت 0.628m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار 0.8g و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار 2.22g است. تارها تحت کششی برابر 226N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر است؟



جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱-۱۸۷۹ م.) در شهر ادینبورگ اسکاتلند زاده شد. جیمز در دوران دانشجویی آموزی بسیار کنجگوار بود و به ساختن اسباب‌ها و دستگاه‌های فنی خیلی علاقه داشت و به‌رغم هم‌وزن‌ها به این کار شوق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت تکریمی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی حلقه‌های سیم‌رازل 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 دستگاه‌های ممانه رادیو، تلویزیون، رادار و غیره گشود که هنگی و اساس امواج الکترومغناطیسی کار می‌کنند.

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 همان‌القای 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 نانی از تغییرات هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشد. شکل ۳-۲، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمه تولید موج نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳: 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.

نمونه ۳-۴



طول آنتن یک گوشی تلفن همراه فدیسی معمولاً $\frac{1}{4}$ طول موج دریافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر $\frac{1}{4} \text{cm}$ باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می کند تعیین کنید.

تفاوت ۳-۴



مطابق شکل روبه‌رو یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظه تخلیه هوای نشسته‌ای 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؟

نمونه ۳-۵



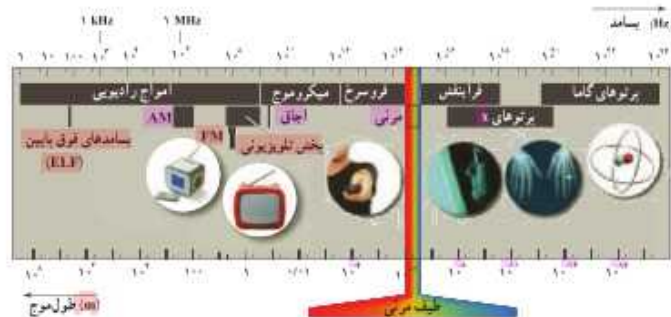
طول آنتن یک گوشی تلفن همراه فدیسی معمولاً $\frac{1}{4}$ طول موج دریافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر $\frac{1}{4} \text{cm}$ باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می کند تعیین کنید.

تفاوت ۳-۴

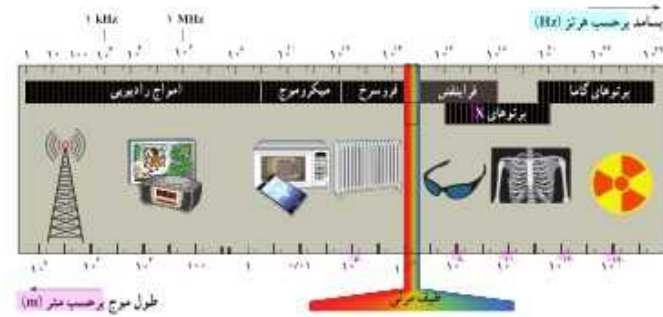


مطابق شکل روبه‌رو یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظه تخلیه هوای نشسته‌ای آویزان کنید. با برقراری تماس با گوشی، صدای آن را خواهید شنید. ولی با به کار افتادن پمپ تخلیه هوا، صدا به تدریج ضعیف و سرانجام خاموش می‌شود، در حالی که امواج الکترومغناطیسی همچنان به گوشی می‌رسند. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

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 به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل ذرات محیط، بلکه به‌صورت 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 ۱۵۰ میلیون کیلومتری از زمین قرار دارد، توان امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از خورشید که به سطح زمین می‌رسد، تقریباً 1000 میلیون گیگاوات است. جالب است که بدانید مرتبه بزرگی توان تولیدی یک نیروگاه هسته‌ای، ۱ گیگاوات است. طیف امواج الکترومغناطیسی: امروزه طیف وسیعی از امواج الکترومغناطیسی را می‌شناسیم. این طیف شامل امواج رادیویی، میکروموج، فرسوخ، طیف نور مرئی، فرابنفش، پرتوهای X و پرتوهای گاما است، که از کمترین بسامد تا بیشترین بسامد گسترده شده‌اند (شکل ۳-۲۲). 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.



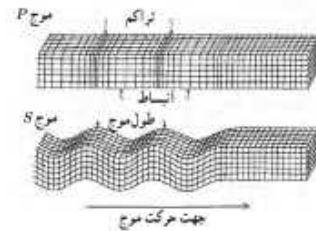
شکل ۳-۲۲ طیف امواج الکترومغناطیسی



شکل ۳-۲۳ طیف امواج الکترومغناطیسی

مثال ۸-۳

امواج لرزه‌ای موج‌های مکانیکی‌ای هستند که از لایه‌های زمین عبور می‌کنند. یکی از منشأهای مهم امواج لرزه‌ای، زمین‌لرزه‌ها هستند. دو نوع از امواج لرزه‌ای، امواج اولیه^۱ P و امواج ثانویه^۲ S هستند. امواج P، امواجی طولی و امواج S، امواجی عرضی هستند. معمولاً تندی موج‌های P در حدود ۴/۵ km/s و تندی موج‌های S در حدود ۳/۲ km/s است. یک دستگاه لرزه‌نگار^۳ موج‌های P و S حاصل از یک زمین‌لرزه را ثبت می‌کند. فرض کنید نخستین امواج P، ۴/۱۰ 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 بی‌مورد 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:

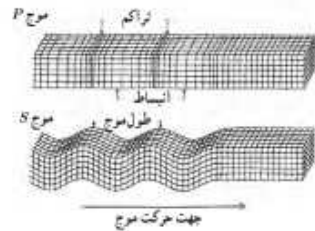
$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v_s} - \frac{\Delta x}{v_p} = \frac{(v_p - v_s) \Delta x}{v_s v_p}$$

$$\Delta x = \frac{v_s v_p}{v_p - v_s} \Delta t = \frac{(4/5 \text{ km/s})(3/2 \text{ km/s})}{(3/2 - 4/5 \text{ km/s})} (3/10 \times 60 \text{ s}) = 1/9 \times 10^3 \text{ km}$$

و از آنجا Δx را به دست می‌آوریم.

مثال ۸-۳

امواج لرزه‌ای موج‌های مکانیکی‌ای هستند که از لایه‌های زمین عبور می‌کنند. یکی از منشأهای مهم امواج لرزه‌ای، زمین‌لرزه‌ها هستند. دو نوع از امواج لرزه‌ای، امواج اولیه^۱ P و امواج ثانویه^۲ S هستند. امواج P، امواجی طولی و امواج S، امواجی عرضی هستند. معمولاً تندی موج‌های P در حدود ۴/۵ km/s و تندی موج‌های S در حدود ۳/۲ km/s است. یک دستگاه لرزه‌نگار^۳ موج‌های P و S حاصل از یک زمین‌لرزه را ثبت می‌کند. فرض کنید نخستین امواج P، ۴/۱۰ 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 بی‌مورد 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:

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

$$\Delta x = \frac{v_s v_p}{v_p - v_s} \Delta t = \frac{(4/5 \text{ km/s})(3/2 \text{ km/s})}{(3/2 - 4/5 \text{ km/s})} (3/10 \times 60 \text{ s}) = 1/9 \times 10^3 \text{ km}$$

و از آنجا Δx را به دست می‌آوریم.

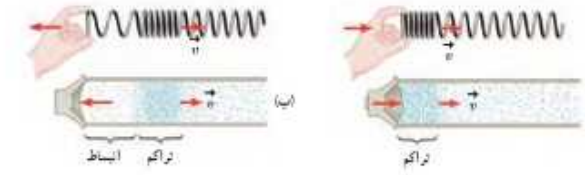
موج صوتی: صوت یک موج طولی است که توسط جسمی مرتعش از قبیل سیم گیتار، تارهای صوتی حنجره انسان، دیابازون، و یا پوسته‌های مرتعشی مانند صفحه مرتعش (دیافراگم) یک بلندگو، تولید می‌شود، که اصطلاحاً به اینها جسمه صوت گفته می‌شود. وقتی یک جسمه صوت مرتعش می‌شود، معمولاً صوت ایجادشده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. افزون بر این، صوت فقط در محیط‌های مادی مانند گاز، مایع، یا جامد می‌تواند ایجاد و منتشر شود. امواج صوتی به دلیل طبیعت طولی خود، مثل موج طولی ایجاد شده در یک فنر کشیده، در مقایسه با بازشدگی‌ها و جمع‌شدگی‌های فنر، از مجموعه‌ای از تراکم‌ها و انبساط‌ها تشکیل شده‌اند؛ مثلاً با ارتعاش دیافراگم یک بلندگو، موجی صوتی ایجاد می‌شود. حرکت رو به بیرون دیافراگم، هوای جلوی آن را متراکم می‌کند. این تراکم که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود مشابه ناحیه جمع‌شدگی در یک فنر کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳-۲۴ الف). پس از تولید یک ناحیه متراکم، دیافراگم حرکتش



شکل ۳-۲۴ الف) با حرکت رو به بیرون دیافراگم، یک تراکم ایجاد می‌شود. ب) با حرکت رو به داخل دیافراگم، یک انبساط ایجاد می‌شود. این تراکم و انبساط نتیجه به جمع‌شدگی و بازشدگی در یک فنر بلند است.

- ۱- Seismic Waves
- ۲- Primary Waves
- ۳- Secondary Waves
- ۴- Seismograph

شکل ۳-۲۴ ب) با حرکت رو به بیرون دیافراگم، یک تراکم ایجاد می‌شود. ب) با حرکت رو به داخل دیافراگم، یک انبساط ایجاد می‌شود. این تراکم و انبساط نتیجه به جمع‌شدگی و بازشدگی در یک فنر بلند است.



- ۱- Seismic Waves
- ۲- Primary Waves
- ۳- Secondary Waves
- ۴- Seismograph

شکل ۳۳، نوسان و امواج



ارتعاش یک مولکول هوا

شکل ۳۳-۲۵ 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 ناحیه پازندگی 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).

پوش ۳-۶

الف) چگونه ایجاد صوت توسط دیاپازون را توضیح دهید.

ب) به نظر شما چه ساز و کاری موجب صدای وزوز حشرات هنگام پرواز می‌شود؟

تندی انتشار صوت نیز مانند هر موج مکانیکی دیگری با رابطه $v = f\lambda$ به بسامد و طول موج مربوط می‌شود و به ویژگی‌های فیزیکی محیط بستگی دارد.

اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که عموماً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، گرچه استثنائاتی نیز وجود دارد. جدول ۳-۱ تندی صوت را در تعدادی از گازها، مایع‌ها و جامدها نشان می‌دهد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تندی صوت افزون بر جنس محیط به دمای بستگی دارد و از این رو معمولاً تندی صوت در مواد، همراه با دمای متناظر آنها نوشته می‌شود.

فعالیت ۳-۶

اندازه‌گیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس^۱ متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری کند. وقتی چکش را به صفحه فلزی بکوبیم، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست میکروفون نزدیک‌تر و سپس میکروفون دورتر را متأثر می‌سازند. اختلاف فاصله میکروفون‌ها از محل برخورد چکش با صفحه فلزی را اندازه می‌گیریم، با استفاده از زمان‌سنج می‌توانیم تأخیر زمانی بین دریافت صوت توسط دو میکروفون را ثبت کنیم. اکنون با استفاده از رابطه $v = \Delta x / \Delta t$ می‌توانیم تندی صوت را در هوا بیابیم. در صورتی که این اسباب را در مدرسه دارید با استفاده از آن، تندی صوت را در هوا اندازه بگیرید.



^۱Fast timer

شکل ۳۳، نوسان و امواج



ارتعاش یک مولکول هوا

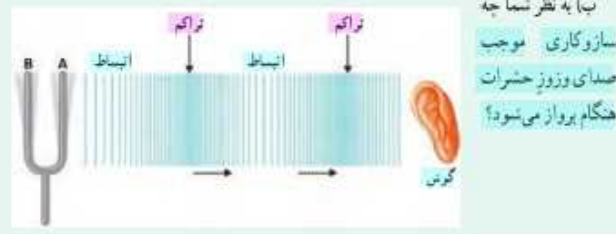
شکل ۳۳-۲۵ در حالی که موج از بلندگو به سمت شنونده حرکت می‌کند، مولکول‌های هوا در جای خود نوسان می‌کنند.

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 ناحیه پازندگی 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).

پوش ۳-۶

الف) چگونه ایجاد صوت توسط دیاپازون را توضیح دهید.

ب) به نظر شما چه ساز و کاری موجب صدای وزوز حشرات هنگام پرواز می‌شود؟



تندی انتشار صوت نیز مانند هر موج مکانیکی دیگری با رابطه $v = f\lambda$ به بسامد و طول موج مربوط می‌شود و به ویژگی‌های فیزیکی محیط بستگی دارد.

اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که عموماً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، گرچه استثنائاتی نیز وجود دارد. جدول ۳-۱ تندی صوت را در تعدادی از گازها، مایع‌ها و جامدها نشان می‌دهد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تندی صوت افزون بر جنس محیط به دمای بستگی دارد و از این رو معمولاً تندی صوت در مواد، همراه با دمای متناظر آنها نوشته می‌شود.

فعالیت ۳-۶

اندازه‌گیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل صفحه بعد 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.

^۱Fast timer

جدول ۳-۱ تندی صوت در محیط‌های مختلف

محیط	تندی (m/s)
گازها ^۱	
هوا (۰°C)	۳۳۱
هوا (۲۰°C)	۳۴۳
هلیوم (۰°C)	۹۶۵
هیدروژن (۰°C)	۱۲۸۲
مایع‌ها	
متیل الکل (۲۵°C)	۱۱۲۲
آب (۰°C)	۱۴۰۲
آب (۲۰°C)	۱۴۸۲
آب دریا (۲۰°C) و نیوزی (۳۲.۵°C)	۱۵۲۲
جامدها	
فولاد	۵۹۲۱
گرافیت	۶۰۰۰
آلومینیم	۶۲۲۰

* فشار حده گازها (atm) است.

جدول ۳-۱ تندی صوت در محیط‌های مختلف

محیط	تندی (m/s)
گازها ^۱	
هوا (۰°C)	۳۳۱
هوا (۲۰°C)	۳۴۳
هلیوم (۰°C)	۹۶۵
هیدروژن (۰°C)	۱۲۸۲
مایع‌ها	
متیل الکل (۲۵°C)	۱۱۲۲
آب (۰°C)	۱۴۰۲
آب (۲۰°C)	۱۴۸۲
آب دریا (۲۰°C) و نیوزی (۳۲.۵°C)	۱۵۲۲
جامدها	
فولاد	۵۹۲۱
گرافیت	۶۰۰۰
آلومینیم	۶۲۲۰

* فشار حده گازها (atm) است.



نمونه ۳-۶

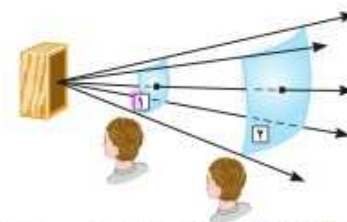
شخصی با چکش به انتهای میله باریک بلندی ضربه‌ای می‌زند. تندی صوت در این میله ۱۵ برابر تندی صوت در هوا است. شخص دیگری که گوش خود را نزدیک به انتهای دیگر میله گذاشته است، دو صدا را که یکی از میله می‌آید و دیگری از هوای اطراف میله، با اختلاف زمانی ۰/۱۲s می‌شنود. اگر تندی صوت در هوا $v = 340 \text{ m/s}$ باشد، طول میله چقدر است؟

خطای شواهد 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 گوشی است که دورتر از چشمه قرار دارد. مثلاً اگر چشمه صدا مستقیماً در طرف راست شما باشد، تأخیر زمانی $\Delta t = 0.05 \text{ s}$ 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 بی‌دری انرژی از ناحیه‌ای از محیط به ناحیه‌ای دیگر از آن است. در واقع چشمه صوت، این انرژی را با به حرکت درآوردن لایه‌ای از محیط که در تماس مستقیم با چشمه است به محیط می‌دهد. انرژی از این لایه به لایه بعدی و از آنجا به لایه‌های 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.

نمونه 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 $v = 340 \text{ m/s}$ باشد، طول میله چقدر است؟

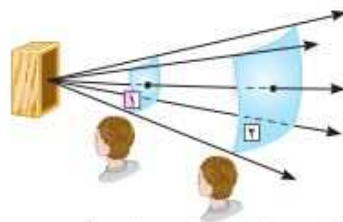
خطای شواهد در زیر آب

سازوکاری که مغز برای تعیین جهت چشمه صدا به کار می‌برد مبتنی بر تأخیر زمانی بین رسیدن صدا به گوش نزدیک‌تر به چشمه و گوشی است که دورتر از چشمه قرار دارد. مثلاً اگر چشمه صدا مستقیماً در طرف راست شما باشد، تأخیر زمانی $\Delta t = 0.05 \text{ s}$ 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 بی‌دری انرژی از ناحیه‌ای از محیط به ناحیه‌ای دیگر از آن است. در واقع چشمه صوت، این انرژی را با به حرکت درآوردن لایه‌ای از محیط که در تماس مستقیم با چشمه است به محیط می‌دهد. انرژی از این لایه به لایه بعدی و از آنجا به لایه‌های 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.

شکل ۳۳: نوسان و گشتا

جدول ۳۳-۱ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

تراز شدت صوت (dB)	شدت صوت (W/m ²)	صوت
۱۰	۱۰ ^{-۱۱}	نفس کشیدن در فاصله ۴m
۲۰	۱۰ ^{-۱۰}	بیج در فاصله ۱m
۳۰	۱۰ ^{-۹}	کتابخانه
۴۰	۱۰ ^{-۸}	خیابان پر سروصدا
۵۰	۱۰ ^{-۷}	رستوران ساکت
۶۰	۱۰ ^{-۶}	صحبت معمولی در فاصله ۱m
۷۰	۱۰ ^{-۵}	خیابان پر سروصدا
۸۰	۱۰ ^{-۴}	در نزدیکی جاروبرقی
۹۰	۱۰ ^{-۳}	قطار در عبور از یک تقاطع
۱۰۰	۱۰ ^{-۲}	کارگاه ماشین آلات پر سروصدا
۱۱۰	۱۰ ^{-۱}	اسکله پخش صوت در بیشترین صدای خود
۱۲۰	۱۰ ^۰	مته سنگ‌شکنی
۱۳۰	۱۰ ^۱	موتور جت در فاصله ۳۰m

شدت صوت را می‌توان با یک آنسکار ساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری شدت صوت‌های مختلف در می‌بایم نسبت شدت‌های صوت در گستره شنوایی انسان می‌تواند در حدود ۱۰^{۱۲} باشد (جدول ۳۳-۱). 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، ساده‌تر این است که از تراز شدت صوت (تراز صوتی) که به صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم:

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

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 (۱۰^{-۱۲} W/m²) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گستره شنیداری انسان است. یک موج صوتی با شدت $I = I_0$ تراز شدت صوتی برابر ۰ dB دارد. جدول ۳۳-۱، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

مثال ۳-۱

تراز شدت صوت یک مخلوط کن که انتشار صوت آن به صورت شکل ۳۳-۲ است در سطح ۲ dB^{۱۰۰} است. الف) شدت این صدا چقدر است؟ ب) اگر مساحت سطح ۲ برابر ۴/۰۰ m² باشد، آهنگ متوسط انتقال انرژی از این سطح را محاسبه کنید. پاسخ: با استفاده از رابطه ۳۳-۱ داریم:

الف) $\beta = (10 \cdot \text{dB}) \log(I/I_0) \Rightarrow 100 \cdot \text{dB} = (10 \cdot \text{dB}) \log(I/I_0) \Rightarrow \log(I/I_0) = 10$

$(I/I_0) = 10^{10} \Rightarrow I = 10^{10} \cdot (10^{-12} \text{ W/m}^2) = 10^{-2} \text{ W/m}^2$

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

نمونه ۳-۲

با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد ۱۰۰ برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

آدرک شنوایی: وقتی دیابازونی را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی داریم، دیابازون نوسان‌هایی انجام می‌دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین چشمه‌هایی

شکل ۳۳: نوسان و گشتا

جدول ۳۳-۲ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

تراز شدت صوت (dB)	شدت صوت (W/m ²)	صوت
۱۰	۱۰ ^{-۱۱}	نفس کشیدن در فاصله ۴m
۲۰	۱۰ ^{-۱۰}	بیج در فاصله ۱m
۳۰	۱۰ ^{-۹}	کتابخانه
۴۰	۱۰ ^{-۸}	خیابان پر سروصدا
۵۰	۱۰ ^{-۷}	رستوران ساکت
۶۰	۱۰ ^{-۶}	صحبت معمولی در فاصله ۱m
۷۰	۱۰ ^{-۵}	خیابان پر سروصدا
۸۰	۱۰ ^{-۴}	در نزدیکی جاروبرقی
۹۰	۱۰ ^{-۳}	قطار در عبور از یک تقاطع
۱۰۰	۱۰ ^{-۲}	کارگاه ماشین آلات پر سروصدا
۱۱۰	۱۰ ^{-۱}	اسکله پخش صوت در بیشترین صدای خود
۱۲۰	۱۰ ^۰	مته سنگ‌شکنی
۱۳۰	۱۰ ^۱	موتور جت در فاصله ۳۰m

شدت صوت را می‌توان با یک آنسکار ساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری شدت صوت‌های مختلف در می‌بایم نسبت شدت‌های صوت در گستره شنوایی انسان می‌تواند در حدود ۱۰^{۱۲} باشد (جدول ۳۳-۲). 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، ساده‌تر این است که از تراز شدت صوت (تراز صوتی) که به صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم:

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

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 (۱۰^{-۱۲} W/m²) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گستره شنیداری انسان است. یک موج صوتی با شدت $I = I_0$ تراز شدت صوتی برابر ۰ dB دارد. جدول ۳۳-۲، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

مثال ۳-۲

تراز شدت صوت یک مخلوط کن که انتشار صوت آن به صورت شکل ۳۳-۲ است در سطح ۲ dB^{۱۰۰} است. الف) شدت این صدا چقدر است؟ ب) اگر مساحت سطح ۲ برابر ۴/۰۰ m² باشد، آهنگ متوسط انتقال انرژی از این سطح را محاسبه کنید. پاسخ: با استفاده از رابطه ۳۳-۱ داریم:

الف) $\beta = (10 \cdot \text{dB}) \log(I/I_0) \Rightarrow 100 \cdot \text{dB} = (10 \cdot \text{dB}) \log(I/I_0) \Rightarrow \log(I/I_0) = 10$

$(I/I_0) = 10^{10} \Rightarrow I = 10^{10} \cdot (10^{-12} \text{ W/m}^2) = 10^{-2} \text{ W/m}^2$

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

نمونه ۳-۳

با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد ۱۰۰ برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

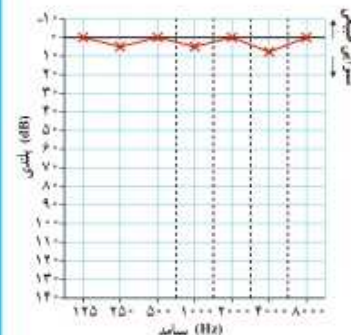
آدرک شنوایی: وقتی دیابازونی را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی داریم، دیابازون نوسان‌هایی انجام می‌دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین چشمه‌هایی

آدرک این درس از آنچه در مورد لگاریتم در درس ریاضی خوانده‌اید، استفاده می‌شود. مرور این بحث می‌تواند به توانایی شما در حل مسئله، بیفزاید.

ثنی موسیقی با پهنای صوتی گفته می‌شود. با شنیدن هر ثنی، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت: ارتفاع و بلندی آن. ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک شنوایی ما مربوط می‌شوند. ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می‌کند؛ مثلاً اگر چند دیابازون با بسامدهای مختلف به‌طور یکسان نواخته شوند بسامد آنها را می‌توان از کمترین تا بیشترین مقدار تشخیص داد. اما بلندی، شدتی است که گوش انسان از صوت درک می‌کند. اگر یک دیابازون 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، به‌طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهایی در گستره ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن ثنی‌های صدای ۲۰ Hz تا ۲۰۰۰۰ Hz است.

شنوایی‌سنجی و اودیوگرام

همان‌طور که گفتیم گوش به تمام بسامدها به‌طور یکسانی حساس نیست و بنابراین برای آزمودن شنوایی یک شخص، گستره‌ای از بسامدهای مختلف استفاده می‌شود. در حین یک آزمون شنوایی‌سنجی 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، به‌طوری 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.



بها یک نمودار اودیوگرام نوعی برای شخصی با شنوایی خوب



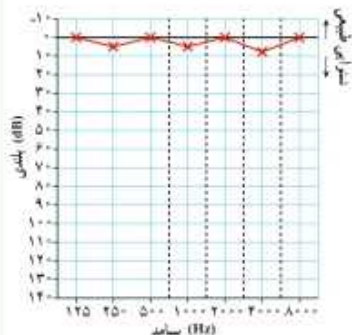
الف) شخصی در حین آزمون شنوایی‌سنجی

1. Tone 2. Pitch 3. Loudness

ثنی موسیقی با پهنای صوتی گفته می‌شود. با شنیدن هر ثنی، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت: ارتفاع و بلندی آن. ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک شنوایی ما مربوط می‌شوند. ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می‌کند؛ مثلاً اگر چند دیابازون با بسامدهای مختلف به‌طور یکسان نواخته شوند بسامد آنها را می‌توان از کمترین تا بیشترین مقدار تشخیص داد. اما بلندی، شدتی است که گوش انسان از صوت درک می‌کند. اگر یک دیابازون 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، به‌طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهایی در گستره ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن ثنی‌های صدای ۲۰ Hz تا ۲۰۰۰۰ Hz است.

شنوایی‌سنجی و اودیوگرام

همان‌طور که گفتیم گوش به تمام بسامدها به‌طور یکسانی حساس نیست و بنابراین برای آزمودن شنوایی یک شخص، گستره‌ای از بسامدهای مختلف استفاده می‌شود. در حین یک آزمون شنوایی‌سنجی 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، به‌طوری 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.



بها یک نمودار اودیوگرام نوعی برای شخصی با شنوایی خوب



الف) شخصی در حین آزمون شنوایی‌سنجی

1. Tone 2. Pitch 3. Loudness

تجربک ۳

فعالیت ۷-۳

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



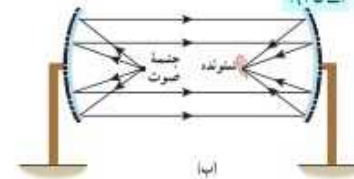
نمایش از وسایل آزمایش بازتاب صوت

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



(الف)

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 نودار برتویی



(ب)

فعالیت ۸-۳

درباره میکروفون سهموی که از آن برای ثبت صداهای ضعیف و دستگاه لیتوتریسی که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود تحقیق کنید.



تصویری از یک میکروفون سهموی

پژواک؛ 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

تجربک ۳

فعالیت ۷-۳

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.



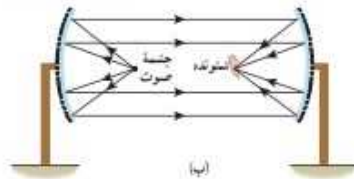
نمایش از اسباب آزمایش بازتاب صوت

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)

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 نودار برتویی



(ب)

فعالیت ۸-۳

درباره میکروفون سهموی که از آن برای ثبت صداهای ضعیف و دستگاه لیتوتریسی که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود تحقیق کنید.



تصویری از یک میکروفون سهموی

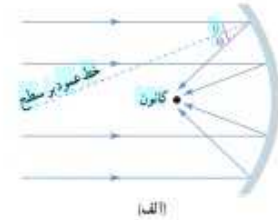
پژواک؛ در برابر دیواره یا صخره بلندی که چند ده متر از شما فاصله دارد، بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی، بازتاب صدای دست زدن خود را خواهید شنید، اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شنونده‌ای برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی **پژواک** می‌گویند. اگر تأخیر 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



گریتسین هویگس (۱۶۹۵-۱۶۲۹ م.) در لایپزید به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیدن و پرا تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله‌هایی در زمینه ریاضی و اخترشناسی نوشت که مورد توجه رنه دکارت، ریچارد بن نامی، فرانز گرت، هویگس در زمان خود دانشمندی با دوق و سینگر بود. در سال ۱۶۵۷ ساعت آونگی را اختراع کرد که پیش از آن دانشمندی مانند گالیله روی آن کار کرده بودند. اما به جلی نرسیده بودند. علاوه بر این، او پژوهش‌هایی با ارزش روی نور نیز انجام داد و نظریه شهور خود را در این مورد ارائه کرد. بنا به نظریه هویگس، نور از موج‌های زیادی تشکیل شده است که این موج‌ها را می‌توان به موج‌های صوتی با موج‌های روی آب تشبیه کرد. نظریه نوجوی بودن نور هویگس بحث‌های فراوانی را انگیزت تا اینکه در حدود ۲۰۰ سال بعد ماکسول فیزیکدان اسکاتلندی دوباره به این نظریه پرداخت و به آن جان تازه‌ای بخشید. هویگس اخترشناسی ریجسته‌ای نیز بود و اسباب‌ها و دستگاه‌های نوری زیادی را اختراع کرد. اختراع ریزنسور را نیز به او نسبت داده‌اند.



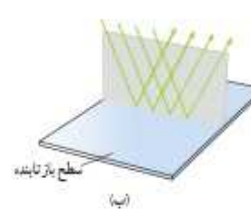
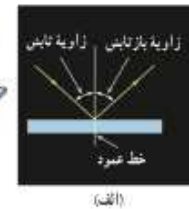
شکل ۳-۱۳۶ (الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح کائونی می‌شود. (ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

تئوریات ۱۰-۳

رآدار و دوبلری: از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی بڑواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید. (راهنامی: اثر دوبلر برای امواج الکترومغناطیسی نیز برقرار است.)



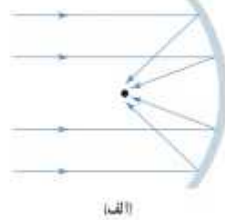
همان‌طور که قبلاً دیدیم نور مرئی بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است. بنابراین نور مرئی نیز از همان قانون بازتاب عمومی امواج پیروی می‌کند؛ یعنی زاویه تابش و بازتابش در هر بازتابشی با هم برابرند (شکل ۳-۳۷ الف)، افزون بر این، برای نور مرئی نیز همچون سایر امواج، برنوی تابش، برنوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده، در هر بازتابشی در یک صفحه واقع‌اند (شکل ۳-۳۷ ب).



شکل ۳-۳۷ (الف) در هر بازتابشی زاویه تابش و زاویه بازتابش با هم برابرند. (ب) برنوی تابش، برنوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.



گریتسین هویگس (۱۶۹۵-۱۶۲۹ م.) در لایپزید به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیدن و پرا تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله‌هایی در زمینه ریاضی و اخترشناسی نوشت که مورد توجه رنه دکارت، ریچارد بن نامی، فرانز گرت، هویگس در زمان خود دانشمندی با دوق و سینگر بود. در سال ۱۶۵۷ ساعت آونگی را اختراع کرد که پیش از آن دانشمندی مانند گالیله روی آن کار کرده بودند. اما به جلی نرسیده بودند. علاوه بر این، او پژوهش‌هایی با ارزش روی نور نیز انجام داد و نظریه شهور خود را در این مورد ارائه کرد. بنا به نظریه هویگس، نور از موج‌های زیادی تشکیل شده است که این موج‌ها را می‌توان به موج‌های صوتی با موج‌های روی آب تشبیه کرد. نظریه نوجوی بودن نور هویگس بحث‌های فراوانی را انگیزت تا اینکه در حدود ۲۰۰ سال بعد ماکسول فیزیکدان اسکاتلندی دوباره به این نظریه پرداخت و به آن جان تازه‌ای بخشید. هویگس اخترشناسی ریجسته‌ای نیز بود و اسباب‌ها و دستگاه‌های نوری زیادی را اختراع کرد. اختراع ریزنسور را نیز به او نسبت داده‌اند.



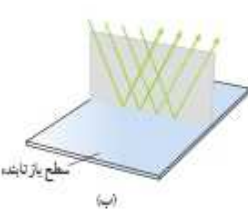
شکل ۳-۱۳۶ (الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح کائونی می‌شود. (ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

تئوریات ۱۰-۳

رآدار و دوبلری: از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی بڑواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید. (راهنامی: اثر دوبلر برای امواج الکترومغناطیسی نیز برقرار است.)

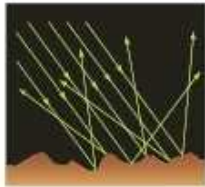


همان‌طور که قبلاً دیدیم نور مرئی بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است. بنابراین نور مرئی نیز از همان قانون بازتاب عمومی امواج پیروی می‌کند؛ یعنی زاویه تابش و بازتابش در هر بازتابشی با هم برابرند (شکل ۳-۳۷ الف)، افزون بر این، برای نور مرئی نیز همچون سایر امواج، برنوی تابش، برنوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده، در هر بازتابشی در یک صفحه واقع‌اند (شکل ۳-۳۷ ب).



شکل ۳-۳۷ (الف) در هر بازتابشی زاویه تابش و زاویه بازتابش با هم برابرند. (ب) برنوی تابش، برنوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

شکل ۳۳: نوسان و امواج



شکل ۳۳-۳۸ 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 برنوی تابش، برنوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع اند.

در مواردی که سطح بازتابنده نور همچون یک آینه، بسیار هموار باشد، بازتاب نور را **بازتاب آینه‌ای** یا **منظم** می‌گویند.

نوع دیگر بازتابش، **بازتاب پخشنده** یا **نامنظم** است. این بازتاب وقتی رخ می‌دهد که نور به سطحی برخورد کند که صیقلی و هموار نباشد. برتوهای نور به‌طور کاتوره‌ای از پستی و بلندی‌های سطح **بازتابیده** و در تمام جهات پراکنده می‌شوند (شکل ۳۸-۳). 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 برنوی موازی را فقط در یک جهت می‌توانید ببینید، ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته برتو را می‌توانید در جهت‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که سطح در مقیاسه یا 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. یا توجه به اینکه طول موج نور مرئی در حدود $0.5\mu\text{m}$ است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می‌شود. در مقابل، ناهمواری‌های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچک‌تر از $1\mu\text{m}$ است و بنابراین برای نور مرئی سطوحی هموار محسوب می‌شوند.

۸-۳ شکست موج

بازتاب، تنها راه برهم‌کنش امواج با محیط نیست. شکست نیز نوع دیگری از برهم‌کنش 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 ۳۹-۳). رنگ‌های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و... مثال‌های رایجی از شکسته‌شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به

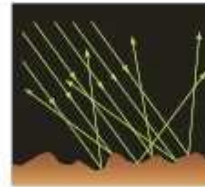


شکل ۳۹-۳۹ شکارچیان بومی آمریکای جنوبی به تجربه دریافته‌اند که محل واقعی یک ماهی متفاوت با محلی است که آن را می‌بینند.

۱- specular reflection

۲- diffuse reflection

شکل ۳۳: نوسان و امواج



شکل ۳۳-۳۸ 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 برنوی تابش، برنوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع اند.

در مواردی که سطح بازتابنده نور همچون یک آینه، بسیار هموار باشد، بازتاب نور را **بازتاب آینه‌ای** یا **منظم** می‌گویند.

نوع دیگر بازتابش، **بازتاب پخشنده** یا **نامنظم** است. این بازتاب وقتی رخ می‌دهد که نور به سطحی برخورد کند که صیقلی و هموار نباشد. برتوهای نور به‌طور کاتوره‌ای از پستی و بلندی‌های سطح **بازتابیده** و در تمام جهات پراکنده می‌شوند (شکل ۳۸-۳). 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 برنوی موازی را فقط در یک جهت می‌توانید ببینید، ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته برتو را می‌توانید در جهت‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که ابعاد ناهمواری‌های سطح در حدود طول موج نور یا بیشتر باشد؛ مثلاً یک کاغذ در ظاهر بسیار هموار به نظر می‌رسد اما از دید میکروسکوپی این سطح از اجزای متمایز و کوچکی تشکیل شده است که بسیار بزرگ‌تر از $1\mu\text{m}$ هستند. یا توجه به اینکه طول موج نور مرئی در حدود $0.5\mu\text{m}$ است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می‌شود. در مقابل، ناهمواری‌های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچک‌تر از $1\mu\text{m}$ است و بنابراین برای نور مرئی سطوحی هموار محسوب می‌شوند.

۸-۳ شکست موج

بازتاب، تنها راه برهم‌کنش امواج با محیط نیست. شکست نیز نوع دیگری از برهم‌کنش 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 ۳۹-۳). رنگ‌های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و... مثال‌های رایجی از شکسته‌شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به

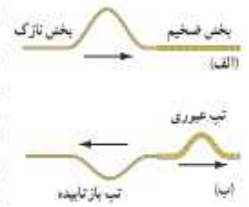


شکل ۳۹-۳۹ شکارچیان بومی آمریکای جنوبی به تجربه دریافته‌اند که محل واقعی یک ماهی متفاوت با محلی است که آن را می‌بینند.

۱- specular reflection

۲- diffuse reflection

تغییرات ۳۳

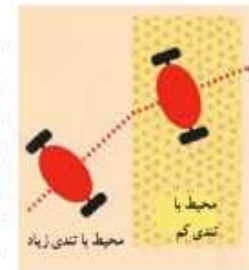


شکل ۳۳-۴۰ (الف) تب فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم تر آن می‌شود. تب بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

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 تب در طول طنابی را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی این تب از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۳۳-۴۰ الف)، بخشی از این تب بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۳۳-۴۰ 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 $v = \lambda f$ ، طول موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

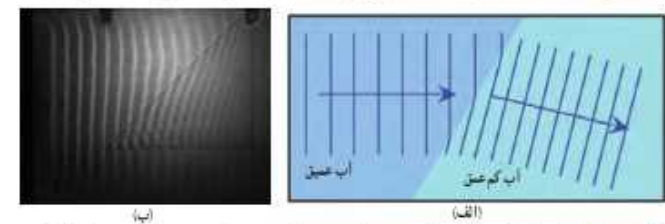
پوشش ۳۳

اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول موج موج عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟



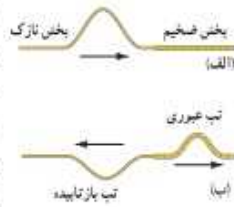
شکل ۳۳-۴۱ (الف) وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا جری که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.

در حالت‌های دو یا سه بعدی با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج شکست پیدا کند. همان‌طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب‌های کم‌عمق، به عمق آب بستگی دارد. از این ویژگی می‌توانیم برای تحقیق پدیده شکست در تشت موج استفاده کنیم؛ یعنی با تغییر دادن عمق آب در بخشی از تشت می‌توان تندی موج سطحی در آن بخش را تغییر داد که این همان‌طور که دیدیم به تغییر جهت انتشار موج در آن بخش، و به عبارتی به شکست موج می‌انجامد. مشاهده می‌شود با ورود موج به بخش کم‌عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش از جبهه موج که زودتر به ناحیه کم‌عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیه جبهه موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصله بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۳۳-۴۱ 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 فهم 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 ۳۳-۴۲).



شکل ۳۳-۴۲ (الف) طری از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم‌عمق در تشت موج و با تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تشت موج

تغییرات ۳۳

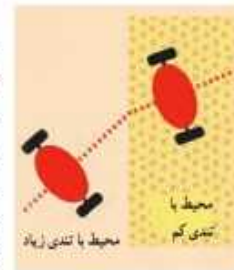


شکل ۳۳-۴۰ (الف) تب فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم تر آن می‌شود. تب بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

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 تب در طول طنابی را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی این تب از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۳۳-۴۰ الف)، بخشی از این تب بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۳۳-۴۰ 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 $v = \lambda f$ ، طول موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

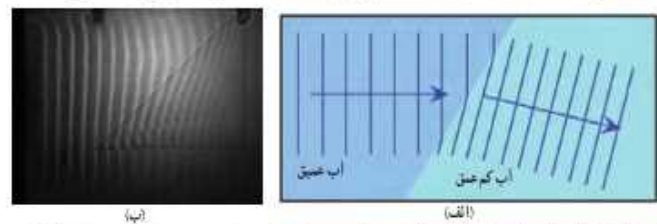
پوشش ۳۳

اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول موج موج عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟



شکل ۳۳-۴۱ (الف) وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا جری که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.

در حالت‌های دو یا سه بعدی 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 کم‌عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش از جبهه موج که زودتر به ناحیه کم‌عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیه جبهه موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصله بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۳۳-۴۱ 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 فهم 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 ۳۳-۴۲).

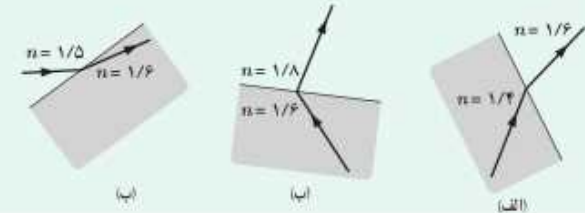


شکل ۳۳-۴۲ (الف) طری از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم‌عمق در تشت موج و با تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تشت موج

تیزیک ۳

پوش ۱۰-۳

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

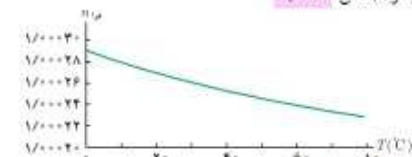


فعالیت ۱۱-۳

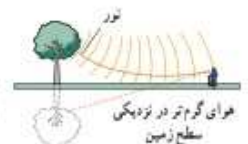
اندازه گیری ضریب شکست : با توجه به مثال ۱۱-۳، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغه متوازی السطوح شفاف را اندازه گرفت.



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



شکل ۳-۴۸ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما



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

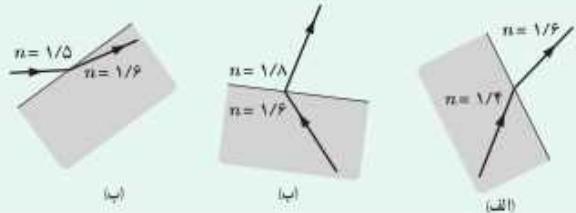
در شکل ۳-۴۹ پدیده سراب را مبنی بر جبهه های موج نشان داده ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه های موجی را در نظر می گیریم که به طرف پایین می آیند. با پایین آمدن هر چه بیشتر بر توپ های متناظر این جبهه های موج، آنها با ضریب شکست های کوچک تر و کوچک تر می شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می شوند (شکل ۳-۵۰ الف). وقتی بر توپ ها 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 کسی تندتر از بخش بالایی جبهه موج حرکت می کند و این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه های موج، یک تصویر آمده اند.

Onis mirage

تیزیک ۳

پوش 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.

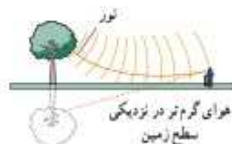
سراب : در روزهای گرم ممکن است برکه ای را در دوردست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد. اما وقتی به آن محل می رسید، آنجا را خشک می یابید. به این پدیده سراب یا سراب آبگیر می گویند و نه تنها می توان آن را دید، بلکه می توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۳-۴۷). در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، جنگلی 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



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

در شکل ۳-۴۹ پدیده سراب را مبنی بر جبهه های موج نشان داده ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه های موجی را در نظر می گیریم که به طرف پایین می آیند. با پایین آمدن هر چه بیشتر بر توپ های متناظر این جبهه های موج، آنها با ضریب شکست های کوچک تر و کوچک تر 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 بر توپ ها 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 کسی تندتر از بخش بالایی جبهه موج حرکت می کند و این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه های موج، یک تصویر آمده اند.

Onis mirage

شکل ۳۳: نوسان و امواج

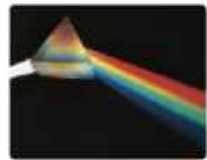


شکل ۳۳-۵: خمیدگی امواج امیز یک بر روی تور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم به سمت هوای گرم تر پایین می‌رود. با تغییر جبهه‌های موج و خمیدگی مربوط به آن، به این دلیل رخ می‌دهد که انتهای پایین جبهه‌های موج در هوای گرم‌تر سریع‌تر حرکت می‌کنند. ب) خمیدگی امواج امیز یک بر روی تور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم‌تر به سمت هوای گرم بالا می‌رود.

شکل ۳۳: نوسان و امواج



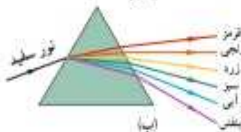
شکل ۳۳-۵: خمیدگی امواج امیز یک بر روی تور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم به سمت هوای گرم تر پایین می‌رود. با تغییر جبهه‌های موج و خمیدگی مربوط به آن، به این دلیل رخ می‌دهد که انتهای پایین جبهه‌های موج در هوای گرم‌تر سریع‌تر حرکت می‌کنند. ب) خمیدگی امواج امیز یک بر روی تور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم‌تر به سمت هوای گرم بالا می‌رود.



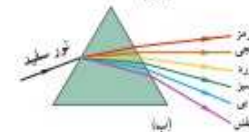
موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۳۳-۵). وقتی پرتوها رو به بالا می‌روند به خم شدن رو به بالای خود ادامه می‌دهند، زیرا اکنون مدام با محیط‌هایی با ضریب شکست‌های بزرگ و بزرگ‌تر مواجه می‌شوند و بنابراین در هر مرحله با نزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۳۳-۵). 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 ۳۳-۴ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.



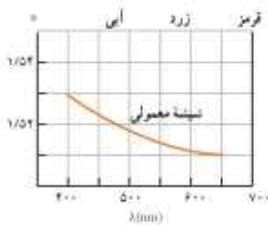
موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۳۳-۵). وقتی پرتوها رو به بالا می‌روند به خم شدن رو به بالای خود ادامه می‌دهند، زیرا اکنون مدام با محیط‌هایی با ضریب شکست‌های بزرگ و بزرگ‌تر مواجه می‌شوند و بنابراین در هر مرحله با نزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۳۳-۵). 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 ۳۳-۴ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.



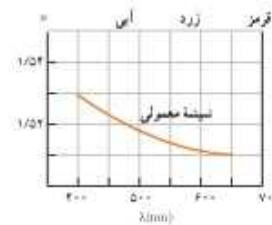
پاشندگی نور: همان‌طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی باریکه نور سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۳۳-۵). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به جز خلأ به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی باریکه نوری شامل پرتوهای با طول موج‌های مختلف باشد، 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 ۳۳-۵ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای نیترو معمولی نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار اگر مثلاً دو باریکه نور آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد نیترو شوند باریکه آبی بیشتر از باریکه قرمز خم می‌شود.



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 ۳۳-۵). 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 ۳۳-۵ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای نیترو معمولی نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار اگر مثلاً دو باریکه نور آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد نیترو شوند باریکه آبی بیشتر از باریکه قرمز خم می‌شود.



شکل ۳۳-۵: تغییرات ضریب شکست در طبقه مرنی تور بر حسب طول موج برای نیترو معمولی



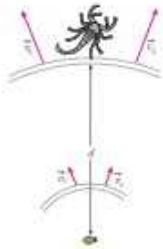
شکل ۳۳-۵: تغییرات ضریب شکست در طبقه مرنی تور بر حسب طول موج برای نیترو معمولی

محاسبه زاویه‌ها در شکست نور بوسیله منشور، خارج از واکه درسی این کتاب است و باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

محاسبه زاویه‌ها در شکست نور بوسیله منشور، خارج از واکه درسی این کتاب است و باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

فصل ۳، نوسان و امواج

که در سطح ماسه منتشر می‌شوند، بر دو نوع اند: امواج عرضی یا تندی $v_t = 50 \text{ m/s}$ و امواج طولی یا 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؟



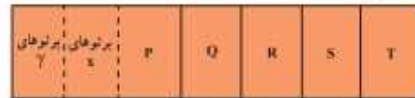
۱۱۱. توضیح دهید کدام یک از عامل‌های زیر بر تندی صوت در هوا مؤثر است.

الف) شکل موج ب) دامنه موج ج) بسامد موج د) دمای هوا
۱۱۲. در سونوگرافی معمولاً از کاوهای دستی موسوم به تراگذار فراصوتی برای تشخیص پزشکی استفاده می‌شود که دقیقاً روی ناحیه مورد نظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می‌شود. این کاوه در بسامد 6.7 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

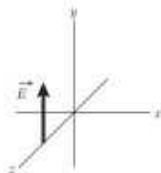
۱۱۱. شکل زیر طیف موج‌های الکترومغناطیسی را بدون مقیاس نشان می‌دهد.



الف) نام قسمت‌هایی از طیف را که با حروف علامت‌گذاری شده‌اند، بنویسید.

ب) اگر در طول طیف از جیب به راست حرکت کنیم، مقدار کدام مشخصه‌های موج افزایش یا کاهش می‌یابد و کدام ثابت می‌ماند؟

۱۱۲. شکل زیر میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در نقطه‌ای معین و دور از چشمه، در یک لحظه نشان می‌دهد. موج ارتزی را در خلاف جهت محور انتقال می‌دهد. جهت میدان مغناطیسی موج را در این نقطه و این لحظه تعیین کنید.



۱۱۳. الف) طول موج نور نارنجی در هوا حدود $6.2 \times 10^{-7} \text{ m}$ است، بسامد این نور چند هرتز است؟

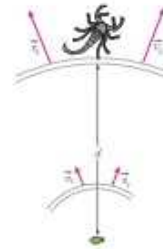
ب) بسامد نور قرمز در حدود $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ است. طول موج این نور را در هوا و آب حساب کنید. (سرعت نور را در هوا $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ و در آب $2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ فرض کنید.)

۱۱۴. جشمه 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 cm باشد،

الف) فاصله بین دو تراکم متوالی این موج چقدر است؟
ب) فاصله بین یک تراکم و یک انبساط متوالی چقدر است؟
۱۱۵. عقرب‌های ماسه‌ای وجود طعمه را با امواجی که بر اثر حرکت طعمه در ساحل نشی ایجاد می‌شود، احساس می‌کنند. این امواج

فصل ۳، نوسان و امواج

که در سطح ماسه منتشر می‌شوند، بر دو نوع اند: امواج عرضی یا تندی $v_t = 50 \text{ m/s}$ و امواج طولی یا 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؟



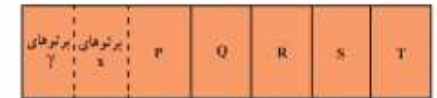
۱۱۱. توضیح دهید کدام یک از عامل‌های زیر بر تندی صوت در هوا مؤثر است.

الف) شکل موج ب) دامنه موج ج) بسامد موج د) دمای هوا
۱۱۲. در سونوگرافی معمولاً از کاوهای دستی موسوم به تراگذار فراصوتی برای تشخیص پزشکی استفاده می‌شود که دقیقاً روی ناحیه مورد نظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می‌شود. این کاوه در بسامد 6.7 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

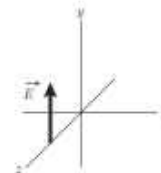
۱۱۱. شکل زیر طیف موج‌های الکترومغناطیسی را بدون مقیاس نشان می‌دهد.



الف) نام قسمت‌هایی از طیف را که با حروف علامت‌گذاری شده‌اند، بنویسید.

ب) اگر در طول طیف از جیب به راست حرکت کنیم، مقدار کدام مشخصه‌های موج افزایش یا کاهش می‌یابد و کدام ثابت می‌ماند؟

۱۱۲. شکل زیر میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در نقطه‌ای معین و دور از چشمه، در یک لحظه نشان می‌دهد. موج ارتزی را در خلاف جهت محور انتقال می‌دهد. جهت میدان مغناطیسی موج را در این نقطه و این لحظه تعیین کنید.



۱۱۳. الف) طول موج نور نارنجی در هوا حدود $6.2 \times 10^{-7} \text{ m}$ است، بسامد این نور چند هرتز است؟

ب) بسامد نور قرمز در حدود $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ است. طول موج این نور را در هوا و آب حساب کنید. (سرعت نور را در هوا $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ و در آب $2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ فرض کنید.)

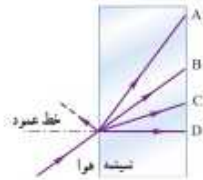
۱۱۴. جشمه موجی با بسامد 10 Hz در یک محیط که تندی انتشار موج در آن 100 m/s است، نوسان‌هایی طولی ایجاد می‌کند. اگر دامنه نوسان‌ها 4.0 cm باشد،

الف) فاصله بین دو تراکم متوالی این موج چقدر است؟
ب) فاصله بین یک تراکم و یک انبساط متوالی چقدر است؟
۱۱۵. عقرب‌های ماسه‌ای وجود طعمه را با امواجی که بر اثر حرکت طعمه در ساحل نشی ایجاد می‌شود، احساس می‌کنند. این امواج

۳-۸ شکست موج

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

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



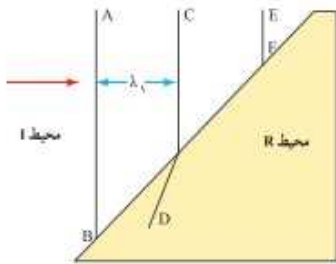
۳۱۹. ضریب شکست آب $\frac{1}{3}$ و ضریب شکست شیشه $\frac{1}{5}$ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بناید، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.

۳۲۰. 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.

ب) آیا با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟



۳-۷ بازتاب موج

۳۳۳. دانش‌آموزی بین دو صخره قائم‌ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیک‌تر 24m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از $1/5\text{s}$ و صدای پژواک دوم را $1/10\text{s}$ بعد از پژواک اول می‌شنود.

الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟
ب) فاصله بین دو صخره را بیابید.

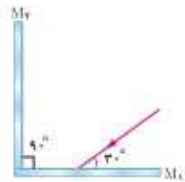
۳۳۴. اگر در فاصله متناسبی از یک رشته بلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونه جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از 92 پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کوکولکان

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

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

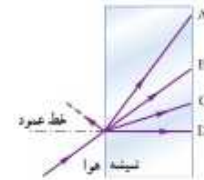


۳- Kukulkan Temple

۳-۸ شکست موج

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

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



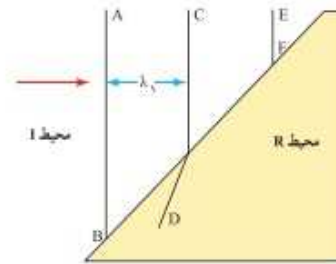
۳۱۹. ضریب شکست آب $\frac{1}{3}$ و ضریب شکست شیشه $\frac{1}{5}$ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بناید، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.

۳۲۰. 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.

ب) آیا با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟



۳-۷ بازتاب موج

۳۳۳. دانش‌آموزی بین دو صخره قائم‌ایستاده است و فاصله او از صخره نزدیک‌تر 24m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از $1/5\text{s}$ و صدای پژواک دوم را $1/10\text{s}$ بعد از پژواک اول می‌شنود.

الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟
ب) فاصله بین دو صخره را بیابید.

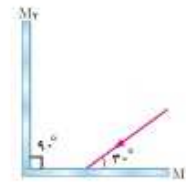
۳۳۴. اگر در فاصله متناسبی از یک رشته بلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونه جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از 92 پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کوکولکان

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

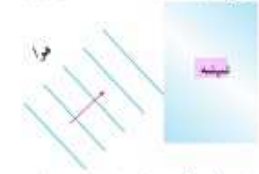
۳۳۷. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.



۳- Kukulkan Temple

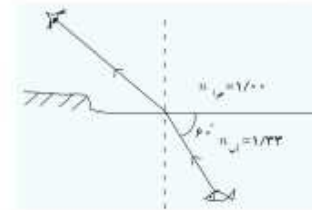
شکل ۳۳

۱۴۱. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازتاب می‌یابد 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.

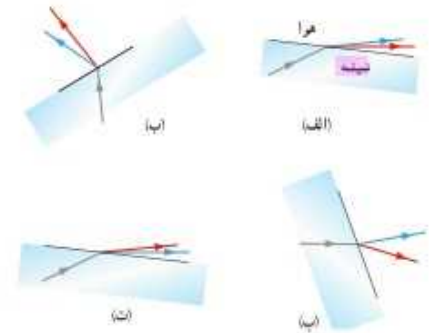


۱۴۲. طول موج نور قرمز لیزر هلیوم-نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجیه چشم ۴۷۴nm است. الف) بسامد این نور جقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور جقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید. ۱۴۳. سکه‌ای را در گوشه فنجان خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. 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.

۱۴۱. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویه 60° به مرز آب-هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا جقدر است؟



۱۴۲. 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؟

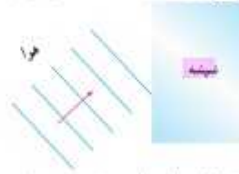


۱۴۷. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟



شکل ۳۴

۱۴۱. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازتاب می‌یابد 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.

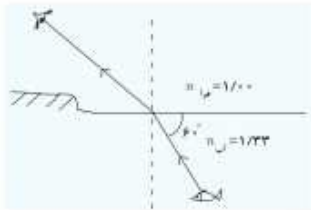


۱۴۲. طول موج نور قرمز لیزر هلیوم-نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجیه چشم ۴۷۴nm است. الف) بسامد این نور جقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور جقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید.

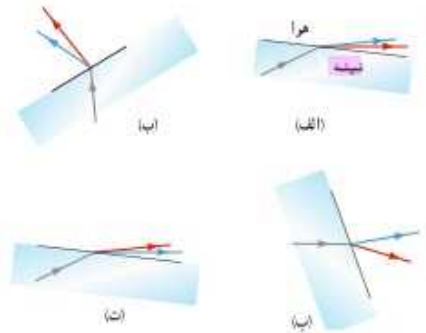
۱۴۳. سکه‌ای را در گوشه فنجان خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. سپس بی‌آنکه سرتان را حرکت دهید به آرامی در فنجان آب بریزید، به طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرشدن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.



۱۴۴. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویه 60° به مرز آب-هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا جقدر است؟



۱۴۲. 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؟



۱۴۷. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴

فصل



آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



جاقوی گاما (جراحی مغز بدون جاقو) جایگزینی مناسب برای جراحی‌های سنتی و با 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 پروتوزای طبیعی و نیمه‌عمر

۴

فصل



آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



جاقوی گاما (جراحی مغز بدون جاقو) جایگزینی مناسب برای جراحی‌های سنتی و با 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 پروتوزای 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 صورت‌بندی نهایی خود رسیده بود و به نظر می‌رسید که در توصیف گسترده 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 پیش از همه منجر به گسترش فیزیک هسته‌ای شد، به تحولی 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 پروتوزایی طبیعی آشنا می‌شویم.



آلبرت اینشتین (۱۹۵۵-۱۸۷۹ م.) تا ۱۷ سالگی در آلمان تحصیل کرد ولی با نامامدگانشان سال آخر تحصیل خود، آلمان را ترک کرد و به سوئیس رفت. نظام آموزشی اطفال با سوئیس تحوی شکوف 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 اثبات‌های 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.

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 صورت‌بندی نهایی خود رسیده بود و به نظر می‌رسید که در توصیف گسترده 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 پیش از همه منجر به گسترش فیزیک هسته‌ای شد، به تحولی 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 پروتوزایی طبیعی آشنا می‌شویم.



آلبرت اینشتین (۱۹۵۵-۱۸۷۹ م.) تا ۱۷ سالگی در آلمان تحصیل کرد ولی با نامامدگانشان سال آخر تحصیل خود، آلمان را ترک کرد و به سوئیس رفت. نظام آموزشی اطفال با سوئیس تحوی شکوف 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 اثبات‌های 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.

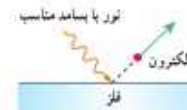
۴-۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

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



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

فصل ۴: آشپایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



شکل ۴-۳ الکترون‌ها، انرژی نور فرودی را جذب می‌کنند و از سطح فلز خارج می‌شوند.

می‌شوند (شکل ۴-۲). این پدیده فیزیکی را، اثر فوتوالکتریک و الکترون‌های جدا شده از سطح فلز را فوتوالکتریک 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 رسیده 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' نامیده شد، دارای انرژی‌ای است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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.

بنابر 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 به‌طور آبی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرفاً 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 فوتوالکتریک‌ها می‌شود، در حالی که انرژی جنبشی فوتوالکتریک‌ها بدون تغییر می‌ماند.

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

فصل ۴: آشپایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



شکل ۴-۳ الکترون‌ها، انرژی نور فرودی را جذب می‌کنند و از سطح فلز خارج می‌شوند.

مناسب مانند نور فرابنفش به سطحی فلزی نباید الکترون‌هایی از آن گسیل می‌شوند (شکل ۴-۲). این پدیده فیزیکی را، اثر فوتوالکتریک و الکترون‌های جدا شده از سطح فلز را فوتوالکتریک 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 رسیده 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' نامیده شد، دارای انرژی‌ای است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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.

بنابر 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 به‌طور آبی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرفاً 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 فوتوالکتریک‌ها می‌شود، در حالی که انرژی جنبشی فوتوالکتریک‌ها بدون تغییر می‌ماند.

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



ماکس پلانک (۱۸۵۸-۱۹۴۷ م)
در سال ۱۸۸۵ دانشیار فیزیک نظری در دانشگاه گتینگن شد و علاوه بر تدریس، مطالعه‌های مهم دربارهٔ ترمودینامیک منتشر کرد. از کارهای او در زمینه توزیع طیف تابشی، که به نظریه کوانتومی انجامید، با اهدای جایزه نوبل سال ۱۹۱۸ تقدیر شد. در سال‌های بعد، نوشته‌های پلانک بیشتر در زمینه موضوع‌های مهندسی و فلسفی بود. درست در آستانه دوران که پلانک از نظر حرفه‌ای مورد تحسین همگان قرار گرفته بود، متأسفانه زندگی شخصی وی با نازاری آسیب‌پذیر شد. به طوری که طی سال‌های ۱۹۰۹ تا ۱۹۱۱، همسر، پسر بزرگ و دخترهای دوغولوش به‌دولای مطاری از دنیا رفتند. پلانک در سال ۱۹۲۷، پس از حدود چهل سال سابقهٔ دانشگاهی، از دانشگاه ویرتن بازنشسته شد.

تمرین ۱-۴

توری 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 تور فرودی 50 W باشد، در هر دقیقه چه تعداد فوتون از این چشمه گسیل می‌شود؟

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

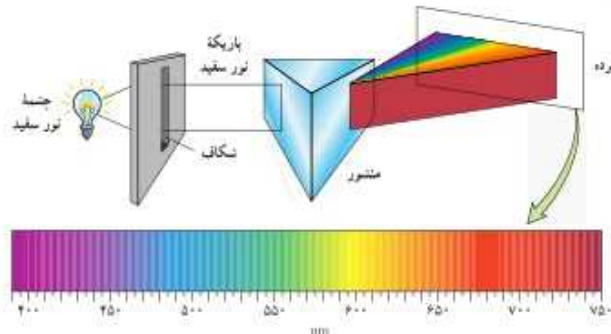


شکست مدل موج الکترومغناطیسی در توضیح برخی پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک به این معنی نیست که مدل موجی نور باید کنار گذاشته شود. ولی، باید متوجه باشیم که مدل موجی، تمام ویژگی‌های نور را دربر ندارد و به همین دلیل قادر نیست توجیه درستی از تمامی پدیده‌های فیزیکی مرتبط با برهم‌کنش نور با ماده را ارائه کند.



۲-۴ طیف خطی

در فیزیک 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 طول‌موج‌هاست. به همین دلیل طیف ایجادشده در این شرایط را طیف گسیلی پیوسته یا به اختصار طیف پیوسته می‌نامند. بخشی از این طیف که در گستره مرئی طول‌موج‌ها 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 رفیق، که اتم‌های متفرق آنها از برهم‌کنش قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسسته را گسیل می‌کنند که شامل طول‌موج‌های معینی است. این طیف گسسته را، معمولاً طیف گسیلی خطی یا به اختصار طیف خطی می‌نامند و طول‌موج‌های ایجادشده در آن، برای اتم‌های هر گاز منحصر



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 طول‌موج آن از حدود 400 nm (تور بنفش) تا حدود 750 nm (تور قرمز) است.

تمرین ۱-۴

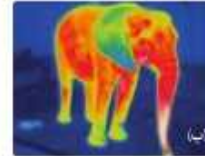
توری با طول موج 240 nm به سطحی از جنس فلز تنگستن می‌تابد و سبب گسیل فوتوالکترون‌ها از آن می‌شود. (الف) بسامد نور فرودی را پیدا کنید.

(ب) اگر توان چشمه تور فرودی 50 W باشد، در هر دقیقه چه تعداد فوتون از این چشمه گسیل می‌شود؟

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

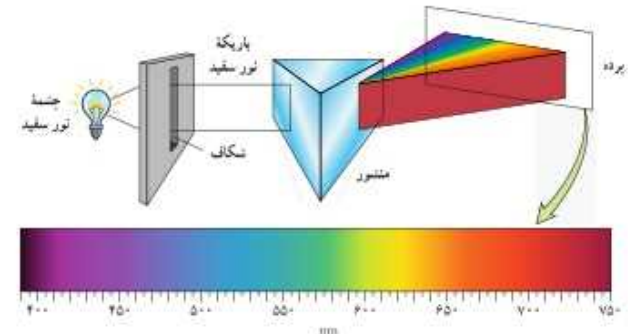


شکست مدل موج الکترومغناطیسی در توضیح برخی پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک به این معنی نیست که مدل موجی نور باید کنار گذاشته شود. ولی، باید متوجه باشیم که مدل موجی، تمام ویژگی‌های نور را دربر ندارد و به همین دلیل قادر نیست توجیه درستی از تمامی پدیده‌های فیزیکی مرتبط با برهم‌کنش نور با ماده را ارائه کند.



۲-۴ طیف خطی

در فیزیک 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 طول‌موج‌هاست. به همین دلیل طیف ایجادشده در این شرایط را طیف گسیلی پیوسته یا به اختصار طیف پیوسته می‌نامند. بخشی از این طیف که در گستره مرئی طول‌موج‌ها 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 رفیق، که اتم‌های متفرق آنها از برهم‌کنش قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسسته را گسیل می‌کنند که شامل طول‌موج‌های معینی است. این طیف گسسته را، معمولاً طیف گسیلی خطی یا به اختصار طیف خطی می‌نامند و طول‌موج‌های ایجادشده در آن، برای اتم‌های هر گاز منحصر



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 طول‌موج آن از حدود 400 nm (تور بنفش) تا حدود 750 nm (تور قرمز) است.

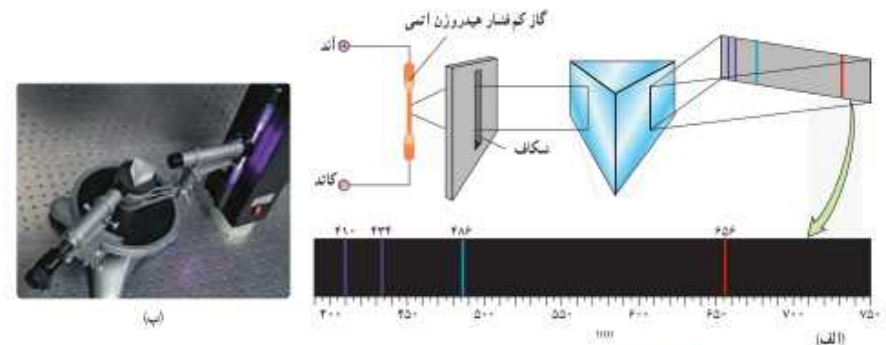
به فرد هستند و سرنخ‌های مهمی را درباره نوع و ساختار اتم‌های آن گاز به دست می‌دهند. دو نمونه آشنا از گازهای کم فشار و رقیق، در لامپ‌های نئون و لامپ‌های جیوه‌ای وجود دارد. شکل ۵-۴ قسمت‌های مرئی طیف‌های خطی این دو گاز را نشان می‌دهد. طول موج‌های مرئی خاصی که اتم‌های این گازها گسیل می‌کنند به تابلوهای تئوی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



شکل ۵-۴ طیف‌های گسیلی خطی برای نئون و جیوه

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیوم، جیوه، سدیم و نئون معمولاً از یک لامپ باریک و بلند شیشه‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم فشار است استفاده می‌شود. دو الکترود به نام‌های آند و کاتد در دو طرف این لامپ قرار دارد که به ترتیب به پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. این ولتاژ بالا، سبب تخلیه الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لامپ شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجاد شده و همچنین رنگ نور گسیل شده، به نوع گاز درون لامپ بستگی دارد. در میان طیف گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی هم از جنبه تاریخی و هم از جنبه نظری اهمیت خاصی دارد. طیف خطی این گاز در ناحیه مرئی، شامل یک رشته منظم از خط‌هایی است که محل آنها در شکل ۶-۴ نشان داده شده است. در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضی‌دان سوئیس، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج هر یک از خط‌های شناخته شده مربوط به طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی را به دست می‌داد. این رابطه عبارت است از:

$$\lambda = (364.56 \text{ nm}) \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad \text{(معادله بالمر)} \quad (2-4)$$



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

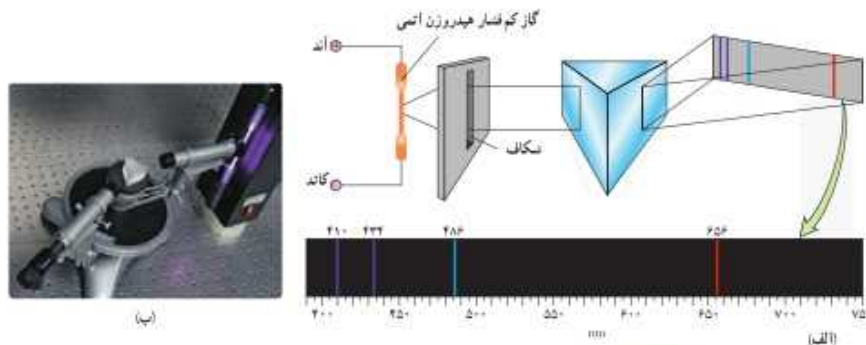
به فرد هستند و سرنخ‌های مهمی را درباره نوع و ساختار اتم‌های آن گاز به دست می‌دهند. دو نمونه آشنا از گازهای کم فشار و رقیق، در لامپ‌های نئون و لامپ‌های جیوه‌ای وجود دارد. شکل ۵-۴ قسمت‌های مرئی طیف‌های خطی این دو گاز را نشان می‌دهد. طول موج‌های مرئی خاصی که اتم‌های این گازها گسیل می‌کنند به تابلوهای تئوی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



شکل ۵-۴ طیف‌های گسیلی خطی برای نئون و جیوه

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیوم، جیوه، سدیم و نئون معمولاً از یک لامپ باریک و بلند شیشه‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم فشار است استفاده می‌شود. دو الکترود به نام‌های آند و کاتد در دو طرف این لامپ قرار دارد که به ترتیب به پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. این ولتاژ بالا، سبب تخلیه الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لامپ شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجاد شده و همچنین رنگ نور گسیل شده، به نوع گاز درون لامپ بستگی دارد. در میان طیف گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی هم از جنبه تاریخی و هم از جنبه نظری اهمیت خاصی دارد. طیف خطی این گاز در ناحیه مرئی، شامل یک رشته منظم از خط‌هایی است که محل آنها در شکل ۶-۴ نشان داده شده است. در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضی‌دان سوئیس، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج هر یک از خط‌های شناخته شده مربوط به طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی را به دست می‌داد. این رابطه عبارت است از:

$$\lambda = (364.56 \text{ nm}) \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad \text{(معادله بالمر)} \quad (2-4)$$



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

فصل ۴: آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای

که در آن $n \geq 3$ و همواره عددی صحیح است. با قرار دادن $n = 3, 4, 5, 6$ در معادله بالمر، طول موج خط‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن در ناحیه مرئی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

(خط قرمز) $n = 3 \rightarrow \lambda_3 = 656/20 \text{ nm}$ $n = 4 \rightarrow \lambda_4 = 486/0 \text{ nm}$
 (خط بنفش) $n = 5 \rightarrow \lambda_5 = 434/0 \text{ nm}$ $n = 6 \rightarrow \lambda_6 = 410/13 \text{ nm}$

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. ریذریگ، 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 به‌صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

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

که در آن R ثابت ریذریگ و مقدار آن برابر $1/0.9113 \times 10^7 \text{ (nm)}^{-1}$ است و برای سادگی در محاسبات، مقدار آن را می‌توان $1/0.11 \text{ (nm)}^{-1}$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح مثبتی است که به‌ازای $n=2$ رابطه ۲-۴ مربوط به رشته بالمر به‌دست 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 به‌وجود آمد و مشخص شد که به‌جز رشته بالمر رشته‌های دیگری در طیف گاز هیدروژن اتمی وجود دارد. در جدول ۱-۴ نام این رشته‌ها، که به‌ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۱-۴ رشته خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطه ریذریگ 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
پانتن	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
پنوند	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 پانتن و تعدادی از خط‌های رشته لیمان به‌طور قطعی معلوم شده بودند. این مدل که با پیش‌بینی بالمر توافق خوبی داشت منجر به زوهرن‌هایی برای یافتن این رشته‌ها شد، به طوری که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و پنوند و همچنین خط‌های باقی‌مانده رشته لیمان به‌درج کشف شدند.

فصل ۴: آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



نیلز ابرهارد ریذریگ (۱۸۷۹-۱۹۶۲) فیزیک‌دان دانمارکی و برنده نوبل فیزیک در سال ۱۹۲۲. او یکی از بنیان‌گذاران مکانیک کوانتومی است. او در سال ۱۹۱۳ مدل اتمی بور را پیشنهاد کرد که در آن الکترون‌ها در مدارهای مشخص به دور هسته می‌چرخند. این مدل توانست بسیاری از پدیده‌های اتمی را توضیح دهد. او همچنین در زمینه فیزیک هسته‌ای و فیزیک ذرات بنیادی نیز تحقیقاتی انجام داد.

که در آن $n \geq 3$ و همواره عددی صحیح است. با قرار دادن $n = 3, 4, 5, 6$ در معادله بالمر، طول موج خط‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن در ناحیه مرئی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

(خط قرمز) $n = 3 \rightarrow \lambda_3 = 656/20 \text{ nm}$ $n = 4 \rightarrow \lambda_4 = 486/0 \text{ nm}$
 (خط بنفش) $n = 5 \rightarrow \lambda_5 = 434/0 \text{ nm}$ $n = 6 \rightarrow \lambda_6 = 410/13 \text{ nm}$

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. ریذریگ، 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 به‌صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

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

که در آن R ثابت ریذریگ و مقدار آن برابر $1/0.9113 \times 10^7 \text{ (nm)}^{-1}$ است و برای سادگی در محاسبات، مقدار آن را می‌توان $1/0.11 \text{ (nm)}^{-1}$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح مثبتی است که به‌ازای $n=2$ رابطه ۲-۴ مربوط به رشته بالمر به‌دست 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 به‌وجود آمد و مشخص شد که به‌جز رشته بالمر رشته‌های دیگری در طیف گاز هیدروژن اتمی وجود دارد. در جدول ۱-۴ نام این رشته‌ها، که به‌ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۱-۴ رشته خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطه ریذریگ 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
پانتن	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
پنوند	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 پانتن و تعدادی از خط‌های رشته لیمان به‌طور قطعی معلوم شده بودند. این مدل که با پیش‌بینی بالمر توافق خوبی داشت منجر به زوهرن‌هایی برای یافتن این رشته‌ها شد، به طوری که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و پنوند و همچنین خط‌های باقی‌مانده رشته لیمان به‌درج کشف شدند.

فیزیک ۳

مثال ۲-۴

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشتهٔ براکت ($n' = 4$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گسترهٔ طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند^۱.

پاسخ: در رشتهٔ براکت ($n' = 4$) و برای اولین و دومین خط طیفی به ترتیب $n = 5$ و $n = 6$ است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۲-۴ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2} \right) = R(2/25 \times 10^{-7}) \Rightarrow \lambda = 4050 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{6^2} \right) = R(3/472 \times 10^{-7}) \Rightarrow \lambda = 2624 \text{ nm}$$

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

مثال ۳-۴

کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج در رشتهٔ بفرود ($n' = 5$) هیدروژن آتمی را به دست آورید.

پاسخ: کوتاه‌ترین طول موج، با $n = \infty$ متناظر است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ 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 رشتهٔ پاشن ($n' = 3$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گسترهٔ طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند.

معادلهٔ ریدرگ که برگرفته از داده‌های تجربی است، طول موج‌هایی را به دست می‌دهد که هیدروژن آتمی در طیف الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. ولی مدل‌های آتمی رایج آن زمان در خصوص اینکه چرا تنها طول موج‌های معینی توسط هیدروژن آتمی تابش می‌شود، پاسخی نداشتند. نیلز بور، فیزیک‌دان دانمارکی (۱۹۶۲-۱۸۸۵ م.) با اصلاح مدل آتمی رادرفورد، برای نخستین بار توانست توضیح مناسبی برای طول موج‌های گسیستهٔ تابش‌شده توسط گاز هیدروژن آتمی ارائه دهد. در واقع مدل بور، آغاز راهی برای درک این موضوع بود که چگونه ساختار اتم، طول موج‌های تابش‌شده را به مقدارهای معینی محدود می‌کند.

^۱ 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.

فیزیک ۳

مثال ۲-۴

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشتهٔ براکت ($n' = 4$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گسترهٔ طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند^۱.

پاسخ: در رشتهٔ براکت ($n' = 4$) و برای اولین و دومین خط طیفی به ترتیب $n = 5$ و $n = 6$ است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۲-۴ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2} \right) = R(2/25 \times 10^{-7}) \Rightarrow \lambda = 4050 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{6^2} \right) = R(3/472 \times 10^{-7}) \Rightarrow \lambda = 2624 \text{ nm}$$

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

مثال ۳-۴

کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج در رشتهٔ بفرود ($n' = 5$) هیدروژن آتمی را به دست آورید.

پاسخ: کوتاه‌ترین طول موج، با $n = \infty$ متناظر است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ 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

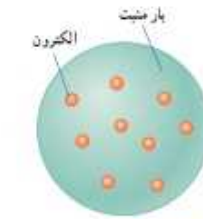
طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشتهٔ پاشن ($n' = 3$) را به دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گسترهٔ طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع اند.

معادلهٔ ریدرگ که برگرفته از داده‌های تجربی است، طول موج‌هایی را به دست می‌دهد که هیدروژن آتمی در طیف الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. ولی مدل‌های آتمی رایج آن زمان در خصوص اینکه چرا تنها طول موج‌های معینی توسط هیدروژن آتمی تابش می‌شود، پاسخی نداشتند. نیلز بور، فیزیک‌دان دانمارکی (۱۹۶۲-۱۸۸۵ م.) با اصلاح مدل آتمی رادرفورد، برای نخستین بار توانست توضیح مناسبی برای طول موج‌های گسیستهٔ تابش‌شده توسط گاز هیدروژن آتمی ارائه دهد. در واقع مدل بور، آغاز راهی برای درک این موضوع بود که چگونه ساختار اتم، طول موج‌های تابش‌شده را به مقدارهای معینی محدود می‌کند.

^۱ 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.

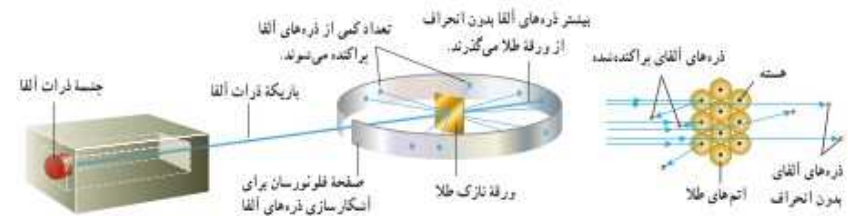
۳-۴ مدل اتم رادرفورد - بور

جوزف تامسون فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را ترغیب کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنا بر مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که بار مثبت به‌طور همگن در سرتاسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمشی هم می‌گویند، زیرا الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن بخش شده‌اند (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ در مدل تامسون، بار الکتریکی مثبت به‌طور همگن در کره‌ای توزیع شده است و الکترون‌ها مانند کشمش‌های یک در نقاط مختلف آن قرار دارند.

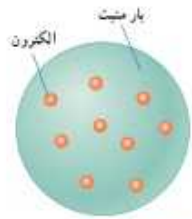
در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با سامندهای معینی حول وضع تعادلشان توسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از ناکامی‌های مدل تامسون این بود که سامندهای تابش گسیل‌نده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود. وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌هایی را انتشار داد که مدل تامسون نمی‌توانست آنها را توضیح دهد، این مدل کنار گذاشته شد. رادرفورد و همکارانش باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت را (از جنس هسته اتم هلیوم که به آن ذره آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا فرو تاباندند (شکل ۳-۴). رادرفورد بنا بر مدل تامسون انتظار داشت که تمامی ذره‌های آلفا، با انحراف بسیار اندکی از ورقه طلا بگذرند. در عمل نیز بیشتر این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف اندکی از ورقه طلا می‌گشتند و در برخورد با صفحه فلز تورسان، در پشت آن، جرقه‌های نوری 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 باریکه‌ذرات آلفا داشت، گفت: «مثل آن بود که گلوله تویی را به ورقه نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله توب با سطح کاغذ، گلوله بازگردد.» این ذره‌ها باید با چیز برجرمی برخورد کرده باشند؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار جگال و دارای بار مثبت منحرف شده‌اند. وی سرانجام نتیجه گرفت باید هسته‌ای جگال و دارای بار مثبت در مرکز هر اتم باشد که با مدل اتمی تامسون به‌طور آشکار مغایرت داشت.



شکل ۳-۴ آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقه نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله در یک اتاق خلأ قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.

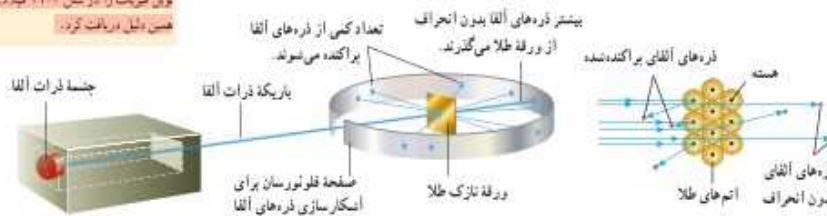
۳-۴ مدل اتم رادرفورد - بور

جوزف تامسون فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را ترغیب کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنا بر مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که بار مثبت به‌طور همگن در سرتاسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمشی هم می‌گویند، زیرا الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن بخش شده‌اند (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴ در مدل تامسون، بار الکتریکی مثبت به‌طور همگن در کره‌ای توزیع شده است و الکترون‌ها مانند کشمش‌های یک در نقاط مختلف آن قرار دارند.

در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با سامندهای معینی حول وضع تعادلشان توسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از ناکامی‌های مدل تامسون این بود که سامندهای تابش گسیل‌نده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود. وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌هایی را انتشار داد که مدل تامسون نمی‌توانست آنها را توضیح دهد، این مدل کنار گذاشته شد. رادرفورد و همکارانش باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت را (از جنس هسته اتم هلیوم که به آن ذره آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا فرو تاباندند (شکل ۳-۴). رادرفورد بنا بر مدل تامسون انتظار داشت که تمامی ذره‌های آلفا، با انحراف بسیار اندکی از ورقه طلا بگذرند. در عمل نیز بیشتر این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف اندکی از ورقه طلا می‌گشتند و در برخورد با صفحه فلز تورسان، در پشت آن، جرقه‌های نوری 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 باریکه‌ذرات آلفا داشت، گفت: «مثل آن بود که گلوله تویی را به ورقه نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله توب با سطح کاغذ، گلوله بازگردد.» این ذره‌ها باید با چیز برجرمی برخورد کرده باشند؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار جگال و دارای بار مثبت منحرف شده‌اند. وی سرانجام نتیجه گرفت باید هسته‌ای جگال و دارای بار مثبت در مرکز هر اتم باشد که با مدل اتمی تامسون به‌طور آشکار مغایرت داشت.

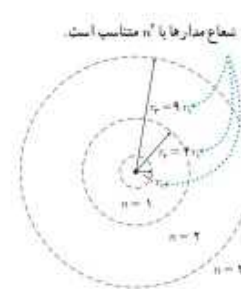


شکل ۳-۴ آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقه نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله در یک اتاق خلأ قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.



جوزف تامسون (۱۸۹۶-۱۸۵۶ م.) یکی از فیزیک‌دانان بزرگ انگلیسی و استاد اسکاتلند کیمبرج بود. تامسون یکی از کشف الکترون، غیر آزمایشگاه کارمیشن لندن طی که یکی از شاگردانش بر آنجا ارنست رادرفورد بود. تامسون پس از چندین سال کار روی مدل اتمی، که برخی از ویژگی‌های شناخته شده اتم از جمله اندازه، تراکم، جرم و اختلالی الکتریکی اتم را شامل می‌شد، مدلی بسویوم به کیک کشمشی را در اوایل قرن بیستم ارائه داد که برای چندین سال مورد تحسین هموم 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.

فصل ۴: آشاپايه با فيزيك اتمى و هسته‌اي



شکل ۴-۳ اولین مدار بور در اتم هیدروژن دارای انرژی E_n است. مدارهای دوم و سوم 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 معادله ریبرگر برای طیف خطی اتم هیدروژن را نیز نتیجه می‌داد. نظریه 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 شده» 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 گسسته معینی مجاز هستند.

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

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

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

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می‌شود ($n = 1, 2, 3, \dots$) که مدار الکترون را دور هسته مشخص می‌کند. همچنین a_0 شعاع کوچک‌ترین مدار در اتم هیدروژن (به‌زای $n = 1$) و مقدار آن برابر $a_0 = r_1 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ است. این مقدار خاص، شعاع بور برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود. همچنین انرژی الکترون در $n = 1$ برابر $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ است که اندازه آن را معمولاً یک ریبرگر می‌نامند و با نماد E_H نشان می‌دهند ($E_H = 13.6 \text{ eV}$). شکل ۴-۳ به مدار اول بور را برای اتم هیدروژن نشان می‌دهد.

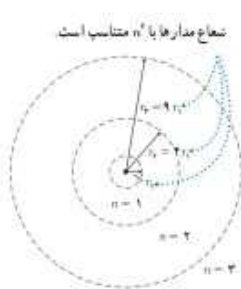
۲- وقتی یک الکترون در یکی از مدارهای مجاز است، هیچ نوع تابش الکترومغناطیسی گسیل نمی‌شود. از این رو گفته می‌شود الکترون در مدار مانا یا حالت مانا قرار دارد.

۳- الکترون می‌تواند از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_2 به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_1 ، 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:

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

ا. ز. نویسن L از سرحرف و از P از معنای بالا و از نویسن L از سرحرف و از Low به معنای پایین گرفته شده است.

فصل ۴: آشاپايه با فيزيك اتمى و هسته‌اي



شکل ۴-۳ اولین مدار بور در اتم هیدروژن دارای انرژی E_n است. مدارهای دوم و سوم 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 معادله ریبرگر برای طیف خطی اتم هیدروژن را نیز نتیجه می‌داد. نظریه 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 شده» 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 گسسته معینی مجاز هستند.

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

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

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

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می‌شود ($n = 1, 2, 3, \dots$) که مدار الکترون را دور هسته مشخص می‌کند. همچنین a_0 شعاع کوچک‌ترین مدار در اتم هیدروژن (به‌زای $n = 1$) و مقدار آن برابر $a_0 = r_1 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ است. این مقدار خاص، شعاع بور برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود. همچنین انرژی الکترون در $n = 1$ برابر $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ است که اندازه آن را معمولاً یک ریبرگر می‌نامند و با نماد E_H نشان می‌دهند ($E_H = 13.6 \text{ eV}$). شکل ۴-۳ به مدار اول بور را برای اتم هیدروژن نشان می‌دهد.

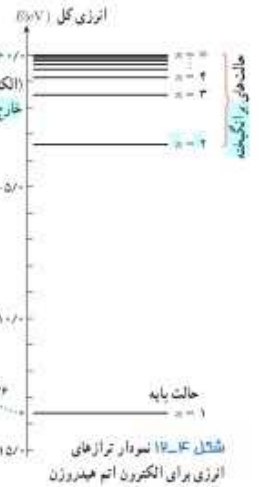
۲- وقتی یک الکترون در یکی از مدارهای مجاز است، هیچ نوع تابش الکترومغناطیسی گسیل نمی‌شود. از این رو گفته می‌شود الکترون در مدار مانا یا حالت مانا قرار دارد.

۳- الکترون می‌تواند از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_2 به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_1 ، 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:

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

ا. ز. نویسن L از سرحرف و از P از معنای بالا و از نویسن L از سرحرف و از Low به معنای پایین گرفته شده است.

تجربى ۳۳



نمودار ترازهای انرژی اتم هیدروژن در مدل بور: مفید است که مقدارهای انرژی داده‌شده در معادله ۵-۴ را مانند شکل ۱۲-۴ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهیم. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n=∞$ در معادله ۵-۴ مربوط است و دارای انرژی 0eV است. برعکس، پایین‌ترین تراز انرژی مربوط به $n=1$ است و دارای مقدار $-13/6\text{eV}$ است. پایین‌ترین تراز انرژی، **حالت پایه** نامیده می‌شود تا از ترازهای بالاتر که **حالت‌های برانگیخته** نامیده می‌شوند متمایز باشد. توجه کنید که با افزایش n چگونی ترازهای حالت‌های برانگیخته به هم نزدیک و نزدیک‌تر می‌شوند.

در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالا بردن الکترون از حالت پایه ($n=1$) به بالاترین حالت برانگیخته ممکن ($n=∞$) مقدار $13/6\text{eV}$ انرژی باید صرف شود. صرف اندکی بیش از این مقدار انرژی، الکترون را از اتم خارج می‌کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می‌شود. این انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه و رساندن آن به حالت برانگیخته $n=∞$ ($E_{∞}=0$)، **انرژی یونش الکترون** نامیده می‌شود. مقدار بیش‌بیش‌شده 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 می‌کند نمودار تراز انرژی آن را رسم کنید. ب) طول موج فوتون گسیل‌شده را حساب کنید. پاسخ: الف) در دومین حالت برانگیخته، عدد کوانتومی $n=2$ است. به این ترتیب از رابطه ۵-۴ داریم:

$$E_n = \frac{-13/6\text{eV}}{n^2} = -1/51\text{eV}$$

ب) شکل مقابل نمودار ترازهای انرژی را برای الکترون اتم هیدروژن نشان می‌دهد که با گسیل فوتون، از دومین حالت برانگیخته به حالت پایه جهش کرده است.

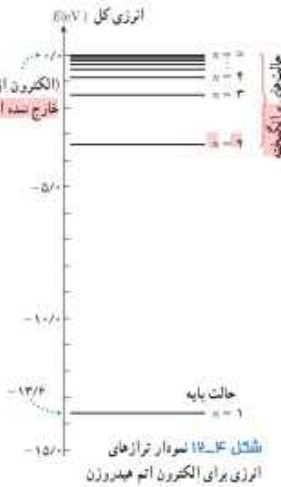
ب) انرژی الکترون در حالت پایه $E_1 = -13/6\text{eV}$ است. به این ترتیب انرژی فوتون گسیل‌شده برابر $E_2 - E_1$ است. از رابطه ۴-۴ داریم:

$$E_2 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{-1/51\text{eV} - (-13/6\text{eV})} = 102\text{nm}$$

تمرین ۲-۴

شکل مقابل تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد. الف) کمترین طول موج فوتونی را پیدا کنید که با گذار بین این ترازها به دست می‌آید. ب) اگر الکترونی از تراز انرژی $-1/51\text{eV}$ به تراز پایه جهش کند طول موج فوتون گسیلی را پیدا کنید. ب) کدام گذار بین دو تراز می‌تواند به گسیل فوتونی با طول موج 660nm منجر شود؟ توجه کنید که این طول موج‌ها در گستره مرئی است.

تجربى ۳۳



نمودار ترازهای انرژی الکترون برای اتم هیدروژن در مدل بور: مفید است که مقدارهای انرژی داده‌شده در معادله ۵-۴ را مانند شکل ۱۲-۴ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهیم. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n=∞$ در معادله ۵-۴ مربوط است و دارای انرژی 0eV است. برعکس، پایین‌ترین تراز انرژی مربوط به $n=1$ است و دارای مقدار $-13/6\text{eV}$ است. پایین‌ترین تراز انرژی، **حالت پایه** نامیده می‌شود تا از ترازهای بالاتر که **حالت‌های برانگیخته** نامیده می‌شوند متمایز باشد. توجه کنید که با افزایش n چگونی ترازهای حالت‌های برانگیخته به هم نزدیک و نزدیک‌تر می‌شوند.

در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالا بردن الکترون از حالت پایه ($n=1$) به بالاترین حالت برانگیخته ممکن ($n=∞$) مقدار $13/6\text{eV}$ انرژی باید صرف شود. صرف اندکی بیش از این مقدار انرژی، الکترون را از اتم خارج می‌کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می‌شود. این انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه و رساندن آن به حالت برانگیخته $n=∞$ ($E_{∞}=0$)، **انرژی یونش الکترون** نامیده می‌شود. مقدار بیش‌بیش‌شده 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 می‌کند نمودار تراز انرژی آن را رسم کنید. ب) طول موج فوتون گسیل‌شده را حساب کنید. پاسخ: الف) در دومین حالت برانگیخته، عدد کوانتومی $n=2$ است. به این ترتیب از رابطه ۵-۴ داریم:

$$E_n = \frac{-13/6\text{eV}}{n^2} = -1/51\text{eV}$$

ب) شکل مقابل نمودار ترازهای انرژی را برای الکترون اتم هیدروژن نشان می‌دهد که با گسیل فوتون، از دومین حالت برانگیخته به حالت پایه جهش کرده است.

ب) انرژی الکترون در حالت پایه $E_1 = -13/6\text{eV}$ است. به این ترتیب انرژی فوتون گسیل‌شده برابر $E_2 - E_1$ است. از رابطه ۴-۴ داریم:

$$E_2 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{1240\text{eV}\cdot\text{nm}}{-1/51\text{eV} - (-13/6\text{eV})} = 102\text{nm}$$

تمرین ۲-۴

شکل مقابل تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد. الف) کمترین طول موج فوتونی را پیدا کنید که با گذار بین این ترازها به دست می‌آید. ب) اگر الکترونی از تراز انرژی $-1/51\text{eV}$ به تراز پایه جهش کند طول موج فوتون گسیلی را پیدا کنید. ب) کدام گذار بین دو تراز می‌تواند به گسیل فوتونی با طول موج 660nm منجر شود؟ توجه کنید که این طول موج‌ها در گستره مرئی است.

فصل ۴: آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



نیلز بور (۱۸۶۳-۱۹۶۲) م. در کپنهاگ دانمارک به دنیا آمد و در همان‌جا به تحصیلات خود ادامه داد. بور در سال ۱۹۱۱ دکترای فیزیک خود را از دانشگاه کپنهاگ دریافت کرد. وی در سال ۱۹۱۲ میلادی پس از مدتی کار با نلسون، از کپنهاگ به جنسنت رفت و در آزمایشگاه رادرفورد که مرکزی پژوهشی دربارهٔ مواد پروتا 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 نوسه نظریه مکانیک کوانتومی نقش عمده‌ای داشت. بور در سال ۱۹۲۲ جایزه نوبل فیزیک را برای درک ساختار اتمی و نظریه کوانتومی دریافت کرد. مؤسسه فیزیک نظری که وی در سال ۱۹۲۲ میلادی در کپنهاگ بنیان نهاد نزدیک به یک سده است که دانشمندان را از سراسر جهان به سوی خود جذب می‌کند.

به دست آوردن معادله ریدبرگ از مدل بور: همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادله ریدبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های برانگیخته باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار n_2 به مدار n_1 می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط ۴-۵ و ۴-۶، بسامد فوتون گسیل شده برابر است با:

$$f = \frac{1}{h}(E_{n_2} - E_{n_1}) = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

با استفاده از رابطه $f = c/\lambda$ طول موج فوتون گسیل شده را پیدا می‌کنیم.

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

از سوی دیگر داریم:

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{13.6 \text{ eV}}{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}} = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1}$$

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

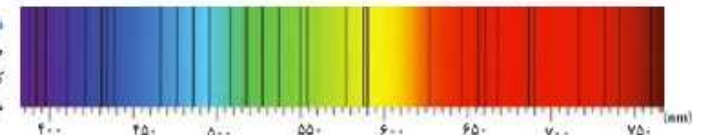
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

این رابطه همان معادله ۳-۴ است که با اصلاح و بازنویسی معادله بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریدبرگ به دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطه تجربی ریدبرگ را به دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_2 = 3$ به مدار $n_1 = 2$ می‌رود، طول موج فوتون گسیل شده برابر است با:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \Rightarrow \lambda = 66 \text{ nm}$$

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 (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.



۱- از ویلیام ولستون به عنوان نخستین کاتیف این خط‌های تاریک نام می‌برد. وی جوزف فرانhofer بود که این خط‌ها را به تفصیل مورد مطالعه قرار داد.

فصل ۴: آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



نیلز بور (۱۸۶۳-۱۹۶۲) م. در کپنهاگ دانمارک به دنیا آمد و در همان‌جا به تحصیلات خود ادامه داد. بور در سال ۱۹۱۱ دکترای فیزیک خود را از دانشگاه کپنهاگ دریافت کرد. وی در سال ۱۹۱۲ میلادی پس از مدتی کار با نلسون، از کپنهاگ به جنسنت رفت و در آزمایشگاه رادرفورد که مرکزی پژوهشی دربارهٔ مواد پروتا 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 نوسه نظریه مکانیک کوانتومی نقش عمده‌ای داشت. بور در سال ۱۹۲۲ جایزه نوبل فیزیک را برای درک ساختار اتمی و نظریه کوانتومی دریافت کرد. مؤسسه فیزیک نظری که وی در سال ۱۹۲۲ میلادی در کپنهاگ بنیان نهاد نزدیک به یک سده است که دانشمندان را از سراسر جهان به سوی خود جذب می‌کند.

استخراج معادله ریدبرگ برای اتم هیدروژن از مدل بور: همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادله ریدبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های برانگیخته باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار n_2 به مدار n_1 می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط ۴-۵ و ۴-۶، بسامد فوتون گسیل شده برابر است با:

$$f = \frac{1}{h}(E_{n_2} - E_{n_1}) = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

با استفاده از رابطه $f = c/\lambda$ طول موج فوتون گسیل شده را پیدا می‌کنیم.

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_R}{h} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

از سوی دیگر داریم:

$$\frac{E_R}{hc} = \frac{13.6 \text{ eV}}{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}} = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1}$$

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

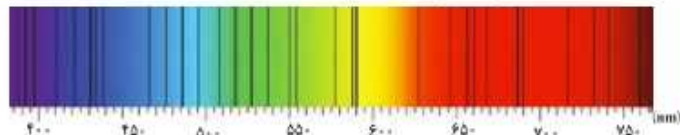
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

این رابطه همان معادله ۳-۴ است که با اصلاح و بازنویسی معادله بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریدبرگ به دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطه تجربی ریدبرگ را به دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_2 = 3$ به مدار $n_1 = 2$ می‌رود، طول موج فوتون گسیل شده برابر است با:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \Rightarrow \lambda = 66 \text{ nm}$$

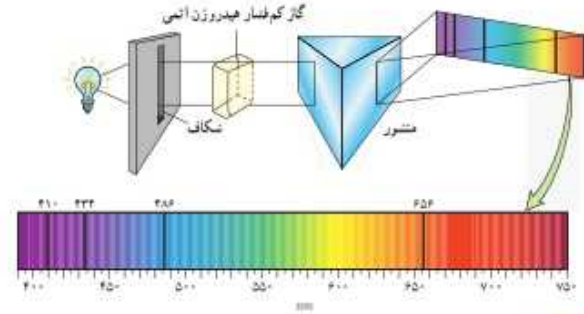
مقدار به دست آمده به نحو چشمگیری به طول موج خط قرمز در رشتهٔ بالمر که از تجربه حاصل شده، نزدیک است.

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 (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.



۱- از ویلیام ولستون به عنوان نخستین کاتیف این خط‌های تاریک نام می‌برد. وی جوزف فرانhofer بود که این خط‌ها را به تفصیل مورد مطالعه قرار داد.

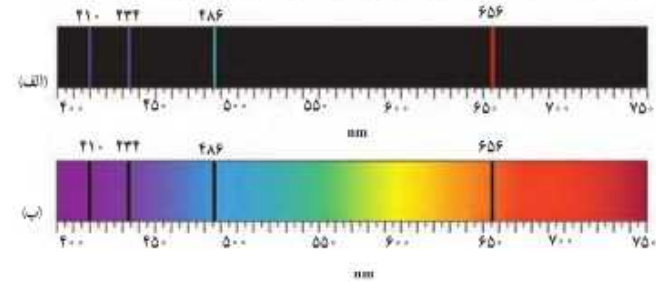
شکل ۱۴-۴ اسباب آزمایشی را به صورت طرح‌وار نشان می‌دهد که در آن باریکه نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم فشار هیدروژن می‌گذرد. با انجام این آزمایش می‌بینیم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین کمان) با خط‌هایی تاریک درون آن مشاهده می‌شود که در آن بعضی از طول موج‌ها از نور سفید جذب شده‌اند.



شکل ۱۴-۴ روشی برای مشاهده طیف‌های جذبی. یک جنسه نور سفید که گستره‌ای پیوسته از طول موج‌ها را تولید می‌کند، از طرفی حای گاز کم فشار هیدروژن اتمی می‌گذرد و توسط منشور پراکنده 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.

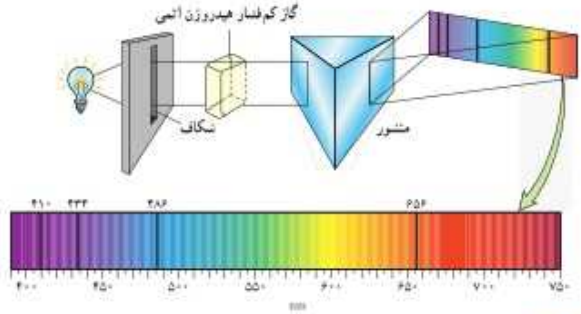
در اواسط قرن نوزدهم، آزمایش‌هایی مشابه آنچه بیان کردیم برای گازهای عناصر مختلف انجام شد. این آزمایش‌ها نشان می‌داد که اگر نور سفید از داخل گاز عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول موج‌ها) توسط اتم‌های گاز عنصر جذب شده‌اند. شکل ۱۵-۴، طیف گسیلی و طیف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

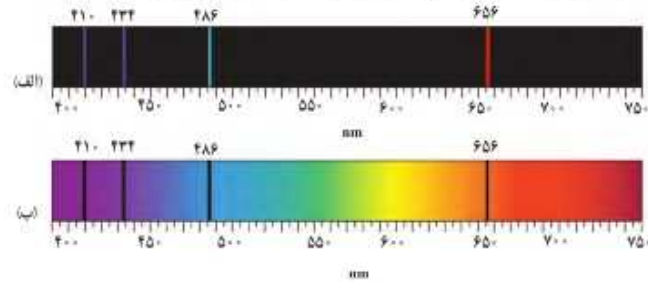
شکل ۱۴-۴ اسباب آزمایشی را به صورت طرح‌وار نشان می‌دهد که در آن باریکه نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم فشار هیدروژن می‌گذرد. با انجام این آزمایش می‌بینیم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین کمان) با خط‌هایی تاریک درون آن مشاهده می‌شود که در آن بعضی از طول موج‌ها از نور سفید جذب شده‌اند.



شکل ۱۴-۴ روشی برای مشاهده طیف‌های جذبی. یک جنسه نور سفید که گستره‌ای پیوسته از طول موج‌ها را تولید می‌کند، از طرفی حای گاز کم فشار هیدروژن اتمی می‌گذرد و توسط منشور پراکنده 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 ۱۵-۴، 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.

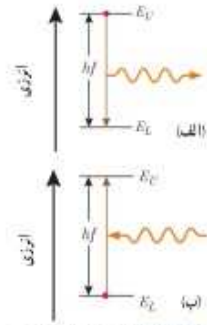


شکل ۱۵-۴ طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. (الف) خط‌های روشن در طیف گسیلی معرف طول موج‌های گسیل شده و (ب) خط‌های تاریک در زمینه طیف، معرف طول موج‌های جذب شده توسط اتم‌های گاز هستند.



جوزف فرانهوفر (۱۷۹۱-۱۸۶۷ م.)
فیزیک‌دان و ریاضی‌دان آلمانی، فیزیکیست،
در آلمان به دنیا آمد. روی به خاطر کیفیت
ابزارهای فیزیکی که می‌ساخت و
همچنین نظریه‌هایش دربارهٔ پراش
معروف بود. فرانهوفر پس از آنکه
در ۱۱ سالگی شش ساله در یک کارگاه
فلزکاری مشغول به کار شد. در
سال ۱۸۰۱ میلادی شش سالگی فراوانی
که در آن کار می‌کرد، فوری رخت و یا
خوش‌ای (پارچه‌ها) جان طایفه
بود. فرانهوفر دستگاه طیف‌بینی را
اختراع کرد و در سری‌های پراش را توسعه
داد. او به کمک دستگاه طیف‌بینی که
اختراع کرده بود، نخستین بار خط‌های
پراش را از نظر طیف‌بینی مشاهده
کرد که امروزه به نام خطوط به خط‌های
فراونهوفر مشهورند.

فصل ۴: آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



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

اینکه چرا هر عنصر تنها طول‌موج‌های خاصی را که مشخصه آن عنصر است جذب یا گسیل می‌کند جالبی 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 به‌وجود می‌آیند که الکترون‌های اتم‌های هیدروژن، که به هر دلیل برانگیخته شده‌اند، از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش کنند و فوتون‌هایی را گسیل کنند (شکل ۱۶-۴ 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 ۱۶-۴ ب). در این حالت، اتم فوتونی را که دقیقاً انرژی لازم برای گذار را دارد جذب می‌کند. به این ترتیب اگر فوتون‌هایی با گستره ییوسته‌ای از طول‌موج‌ها مطابق آزمایش شکل ۱۶-۴ از گاز بگذرند و سپس طیف آنها تشکیل شود، یک دسته خط‌های جذبی تاریک در طیف ییوسته مشاهده خواهند شد. خط‌های تاریک، طول‌موج‌هایی را مشخص می‌کنند که با فرایند جذب فوتون برداشته شده‌اند.

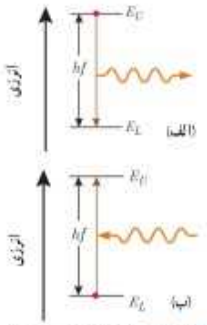
پرسش ۱-۴

آیا معادله ۶-۴ 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 طول‌موج‌های 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 یا یکدیگر متفاوت است.

فصل ۴: آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



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

اینکه چرا هر عنصر تنها طول‌موج‌های خاصی را که مشخصه آن عنصر است جذب یا گسیل می‌کند جالبی 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 به‌وجود می‌آیند که الکترون‌های اتم‌های هیدروژن، که به هر دلیل برانگیخته شده‌اند، از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش کنند و فوتون‌هایی را گسیل کنند (شکل ۱۶-۴ 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 ۱۶-۴ ب). در این حالت، اتم فوتونی را که دقیقاً انرژی لازم برای گذار را دارد جذب می‌کند. به این ترتیب اگر فوتون‌هایی با گستره ییوسته‌ای از طول‌موج‌ها مطابق آزمایش شکل ۱۶-۴ از گاز بگذرند و سپس طیف آنها تشکیل شود، یک دسته خط‌های جذبی تاریک در طیف ییوسته مشاهده خواهند شد. خط‌های تاریک، طول‌موج‌هایی را مشخص می‌کنند که با فرایند جذب فوتون برداشته شده‌اند.

پرسش ۱-۴

آیا معادله ۶-۴ 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 طول‌موج‌های 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 یا یکدیگر متفاوت است.



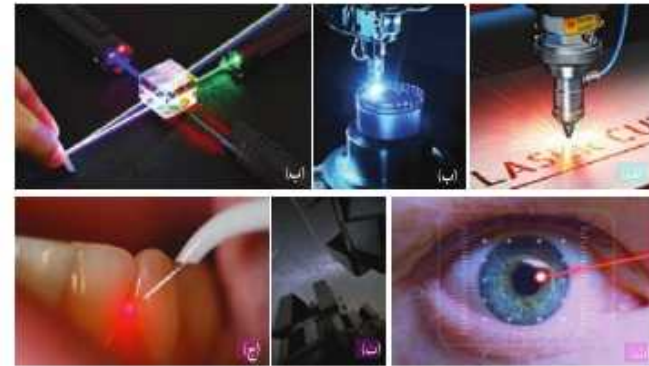
نیلز بور (۱۸۷۹-۱۹۶۲) فیزیکدان دانمارکی و برنده نوبل فیزیک (۱۹۲۲) بود. او یکی از بنیان‌گذاران مکانیک کوانتوم است. بور در سال ۱۹۱۳ مدل اتمی خود را ارائه داد که در آن الکترون‌ها در مدارهای مشخص به دور هسته می‌چرخند. او همچنین در سال ۱۹۲۸ جایزه نوبل فیزیک را به اشتراک با آلبرت اینشتین و پاولی دریافت کرد. بور در سال ۱۹۶۲ جایزه نوبل فیزیک را به اشتراک با لیب و پریگورین دریافت کرد. او در سال ۱۹۶۳ به آمریکا مهاجرت کرد و در سال ۱۹۶۴ به شهروندی آمریکا درآمد. او در سال ۱۹۶۲ به عضویت آکادمی ملی علوم آمریکا درآمد. او در سال ۱۹۶۳ به عضویت آکادمی ملی علوم آمریکا درآمد. او در سال ۱۹۶۳ به عضویت آکادمی ملی علوم آمریکا درآمد.



علی جوان (۱۹۲۴-۲۰۱۹ م.) از پدر و مادری تبریزی در تهران به دنیا آمد. از دبیرستان لیزر دیدم گرفت و پس از آن به مدت یک سال در دانشکده علوم دانشگاه تهران به تحصیل پرداخت. در سال ۱۹۴۸ میلادی به سوئیس رفت و چندین دوره درسی را در دانشگاه کلمبیا گذراند. علی جوان بدون داشتن مدرک لیسانس با فوق لیسانس موفق شد در سال ۱۹۵۲ دکتری خود را در فیزیک از دانشگاه کلمبیا و مدرک دکترای بزرگ آمریکایی در فیزیک از فیزیک ۱۹۶۴ دریافت کند. در سال ۱۹۵۵ دوره پسادکتری را در آزمایشگاه بل در تحقیق روی ساعت اتمی دنبال کرد. در سال ۱۹۵۸ با آزمایشگاههای بلقی پل پیوست و مدتی بعد در همان جا ابتدا اولیه لیزرهای گازی را ارائه کرد. وی پس از یک سال تلاش و با همکاری دو فیزیکدان دیگر به راهپای و پدید آمدن لیزر هربت، موفق به ساخت اولین نمونه لیزر گازی هلیوم-نئون در سال ۱۹۶۰ شد.

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 کابلی 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 ۱۷-۴).



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

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

مطابق مدل اتمی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود. فرایند گسیل می‌تواند به صورت **گسیل خودبه‌خود** و یا **گسیل القایی** باشد. در گسیل خودبه‌خود (شکل ۱۸-۴ 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 $E_{i1} - E_{i2}$ یکسان باشد.

گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد. اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می‌شود (شکل ۱۸-۴ ب). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت می‌کند. دوم اینکه فوتون گسیل‌شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می‌کند. سوم اینکه فوتون گسیل‌شده

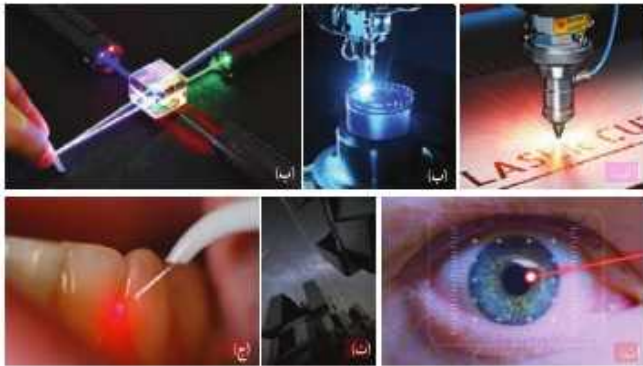
۱- Radiation Laboratory

۲- Bell Telephone Laboratories

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

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 کابلی 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 ۱۷-۴).

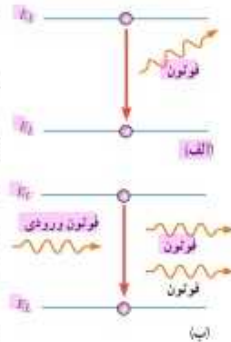


شکل ۱۷-۴ برخی از کاربردهای لیزر: (الف) در برشکاری، (ب) در جوشکاری، (ج) در آزمایش‌های فیزیک و پژوهش‌های علمی، (د) در چشم پزشکی، (ه) در نجوم، (و) در دندانپزشکی

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

مطابق مدل اتمی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود. فرایند گسیل می‌تواند به صورت **گسیل خودبه‌خود** و یا **گسیل القایی** باشد. در گسیل خودبه‌خود (شکل ۱۸-۴ 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 $E_{i1} - E_{i2}$ یکسان باشد.

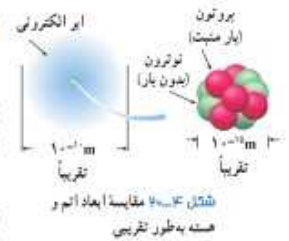
گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد. اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می‌شود (شکل ۱۸-۴ ب). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت می‌کند. دوم اینکه فوتون گسیل‌شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می‌کند. سوم اینکه فوتون گسیل‌شده



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

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

فیزيك، #



۵-۴ ساختار هسته

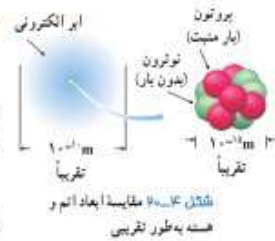
کشف پروتوزای طبیعی در سال ۱۸۹۶ میلادی توسط فیزیکدان فرانسوی، هنری بکل، آغازی برای بی بردن به وجود هسته اتم بود. با کاشن درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که شعاع آن تقریباً $\frac{1}{10000}$ شعاع اتم است (شکل ۴-۲).
 هسته اتم از نوترون‌ها و پروتون‌ها تشکیل شده است که به‌طور کلی **نوکلئون** نامیده 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	-1.6×10^{-19}	5.4858×10^{-4}	9.109389×10^{-31}
پروتون	$+1.6 \times 10^{-19}$	1.007276	1.672622×10^{-27}
نوترون	۰	1.008664	1.674929×10^{-27}

* در نسی ۱ نبد $\frac{1}{12}$ جرم اتم کربن ۱۲ را یکای جرم اتمی (atomic mass unit) می‌نامند و آن را با اختصار با amu یا u نشان می‌دهند. بنا به این تعریف، جرم اتم کربن ۱۲، دقیقاً برابر ۱۲/۰۰۰۰۰۰۰۰ است.

فیزيك، #



۵-۴ ساختار هسته

کشف پروتوزای طبیعی در سال ۱۸۹۶ میلادی توسط فیزیکدان فرانسوی، هنری بکل، آغازی برای بی بردن به وجود هسته اتم بود. با کاشن درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که شعاع آن تقریباً $\frac{1}{10000}$ 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	-1.6×10^{-19}	5.4858×10^{-4}	9.109389×10^{-31}
پروتون	$+1.6 \times 10^{-19}$	1.007276	1.672622×10^{-27}
نوترون	۰	1.008664	1.674929×10^{-27}

* در نسی ۱ نبد $\frac{1}{12}$ جرم اتم کربن ۱۲ را یکای جرم اتمی (atomic mass unit) می‌نامند و آن را با اختصار با amu یا u نشان می‌دهند. بنا به این تعریف، جرم اتم کربن ۱۲، دقیقاً برابر ۱۲/۰۰۰۰۰۰۰۰ است.

عمر



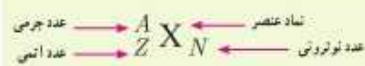
۱۸۷۱-۱۹۴۲: ۱۸۷۱-۱۹۴۲: فیزیکدان فرانسوی در سال ۱۸۷۱ خنوا نسا روزا طی بلخ طین بریس تخلف شد و کسین دانسنی است که در سال ۱۸۷۶ و در حالی که مشغول درس خاصیت فشرطیای سنگ‌های اورانیم بود، به‌دین روزایی را کشف کرد. بکل در سال ۱۹۱۴ به همراه ماری کوری و پیر کوری جانرا ویل فیزیک را خاطر کشف روزایی طینی ارنات کرد. به اختصار حالت‌های وی در زمینه پروتوزای بکل (S) برای حالت روزایی بکل (B) و بکلاری شده است.

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.

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

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

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



مشخص کردن N در نماد نویسی بالا ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از رابطه ۷-۴ 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.

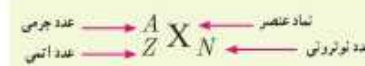
۱- در کتاب‌های تخصصی فیزیک هسته‌ای، این نماد را نماد نوکلئید (nuclide) می‌نامند.

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.

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

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

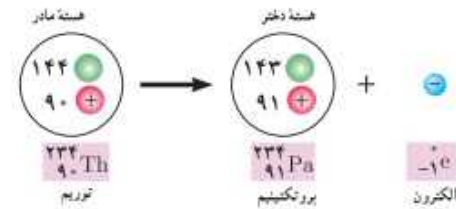
برای یک عنصر با نماد شیمیایی X، نماد هسته به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:



مشخص کردن N در نماد نویسی بالا ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از رابطه ۷-۴ 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.

شکل ۲۵-۴ مثالی از واپاشی β^- برای توریم ۲۳۴ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.

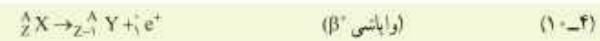


شکل ۲۵-۴ واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هسته مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذره β^- گسیل می‌شود.

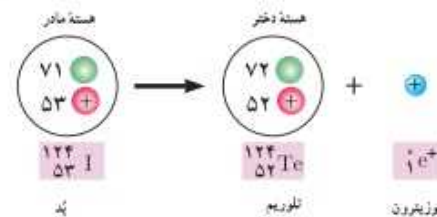
تمرین ۴-۵

لوتیم (${}_{71}^{176}\text{Lu}$) عنصر پرتوزایی است که با گسیل بتای منفی، واپاشی می‌کند. معادله این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذره گسیل شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار $-e$ حامل بار $+e$ است. به این الکترون مثبت، پوزیترون می‌گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می‌شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می‌دهد این است که یکی از پروتون‌های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می‌شود. فرایند واپاشی β^+ با رابطه زیر بیان می‌شود:



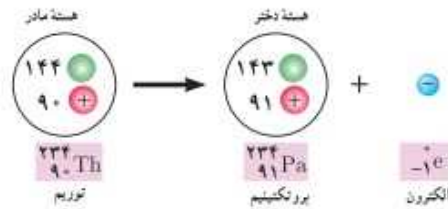
شکل ۲۶-۴ مثالی از واپاشی β^+ برای ${}_{82}^{214}\text{Pb}$ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



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

۱- در واپاشی β^+ ذره‌ای دیگر به نام نوترونو را نیز باید در نظر بگیریم (${}_{Z}^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + e^+ + n$). همچنین در واپاشی β^- ذره‌ای دیگر به نام پادنوترونو را نیز باید در نظر بگیریم (${}_{Z}^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^- + \bar{n}$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

شکل ۲۵-۴ مثالی از واپاشی β^- برای توریم ۲۳۴ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.

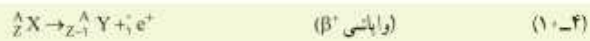


شکل ۲۵-۴ واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هسته مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذره β^- گسیل می‌شود.

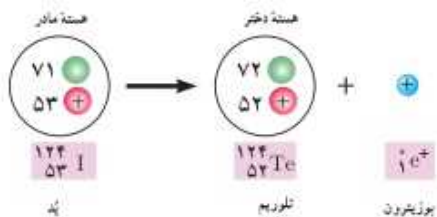
تمرین ۴-۵

لوتیم (${}_{71}^{176}\text{Lu}$) عنصر پرتوزایی است که با گسیل بتای منفی، واپاشی می‌کند. معادله این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذره گسیل شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار $-e$ حامل بار $+e$ است. به این الکترون مثبت، پوزیترون می‌گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می‌شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می‌دهد این است که یکی از پروتون‌های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می‌شود. فرایند واپاشی β^+ با رابطه زیر بیان می‌شود:



شکل ۲۶-۴ مثالی از واپاشی β^+ برای ${}_{82}^{214}\text{Pb}$ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.

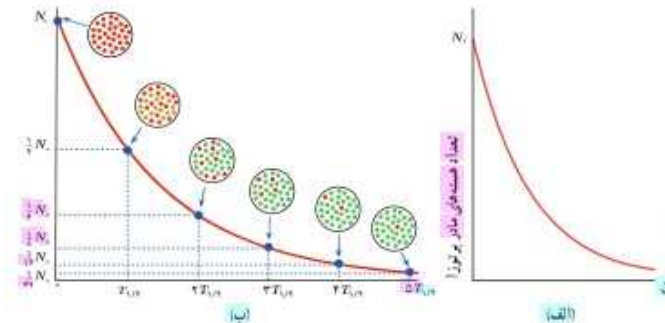


شکل ۲۶-۴ واپاشی β^+ وقتی رخ می‌دهد که پروتونی در یک هسته مادر ناپایدار، به نوترون و پوزیترون تبدیل شود. پوزیترون به صورت ذره β^+ گسیل می‌شود.

۱- در واپاشی β^+ ذره‌ای دیگر به نام نوترونو را نیز باید در نظر بگیریم (${}_{Z}^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + e^+ + n$). همچنین در واپاشی β^- ذره‌ای دیگر به نام پادنوترونو را نیز باید در نظر بگیریم (${}_{Z}^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^- + \bar{n}$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

نیمه عمر: ایزوتوپ‌های پرتوزا یا 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 واپاشی می‌یابد. برای مثال در مورد هسته‌های توریم ^{232}Th پس از زمان معینی می‌توان گفت که چه کسری از آنها به رادیم ^{228}Ra تبدیل شده است.

برای بررسی بیشتر این موضوع، یک نمونه پرتوزا را در نظر بگیرید. فرض کنید در لحظه $t=0$ تعداد هسته‌های مادر پرتوزای موجود در این نمونه، برابر N_0 باشد. اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه را 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 اورانیوم ^{238}U ، دارای نیمه‌عمری در حدود سن زمین (۴/۵ میلیارد سال) هستند. این عناصر منشأ پرتوزایی طبیعی در محیط بیرونی ما هستند.



شکل ۴-۲۸ الف تا ب: تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می‌یابد. بنا به گذشت هر نیمه‌عمر، نیمی از هسته‌های مادر پرتوزای باقی‌مانده (ایزوتوپ فرزند) واپاشی می‌کند.

مثال ۴-۵

در حادثه انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، بدم ^{131}I یکی از ایزوتوپ‌هایی بود که وارد محیط‌زیست شد. این ایزوتوپ، فزاینده است و همراه با جریان‌های جوی، تا کشورهای دور دست از محل نیروگاه حرکت کرد و با نشستن روی برگ گیاهان، سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه‌عمر این ایزوتوپ پرتوزا تقریباً ۸ روز است. پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه چرنوبیل، چه کسری از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی‌مانده بود؟

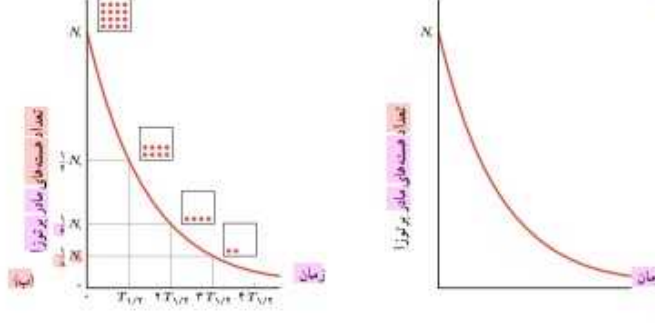
پاسخ: نیمه‌عمر ایزوتوپ ^{131}I برابر ۸ روز است و ۴۰ روز را معادل ۵ نیمه‌عمر ^{131}I در نظر می‌گیریم. اگر N_0 تعداد هسته‌های مادر اولیه باشد، پس از گذشت ۴۰ روز جدول زیر را می‌توان تنظیم کرد.

تعداد نیمه‌عمرهای سپری شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های مادر باقی‌مانده	N_0	$\frac{1}{2} \times N_0 = \frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{16} = \frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه چرنوبیل، تنها $\frac{1}{32}$ از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی ماندند.

نیمه‌عمر: ایزوتوپ‌های پرتوزا یا 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 واپاشی می‌یابد. برای مثال در مورد هسته‌های توریم ^{232}Th پس از زمان معینی می‌توان گفت که چه کسری از آنها به رادیم ^{228}Ra تبدیل شده است.

برای بررسی بیشتر این موضوع، یک نمونه پرتوزا را در نظر بگیرید. فرض کنید در لحظه $t=0$ تعداد هسته‌های مادر پرتوزای موجود در این نمونه، برابر N_0 باشد. اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه را 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 اورانیوم ^{238}U ، دارای نیمه‌عمری در حدود سن زمین (۴/۵ میلیارد سال) هستند. این عناصر منشأ پرتوزایی طبیعی در محیط بیرونی ما هستند.



شکل ۴-۲۸ الف تا ب: تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می‌یابد. بنا به گذشت هر نیمه‌عمر، نیمی از هسته‌های مادر پرتوزای باقی‌مانده واپاشی می‌کند.

مثال ۴-۵

در حادثه انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، بدم ^{131}I یکی از ایزوتوپ‌هایی بود که وارد محیط‌زیست شد. این ایزوتوپ، فزاینده است و همراه با جریان‌های جوی، تا کشورهای دور دست از محل نیروگاه حرکت کرد و با نشستن روی برگ گیاهان، سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه‌عمر این ایزوتوپ پرتوزا تقریباً ۸ روز است. پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه چرنوبیل، چه کسری از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی‌مانده 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 باقی‌مانده	N_0	$\frac{1}{2} \times N_0 = \frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{8} = \frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2} \times \frac{N_0}{16} = \frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه چرنوبیل، تنها $\frac{1}{32}$ از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی ماندند.

فصل ۴: آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای

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:

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

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

تمرین ۴-۷

پس از گذشت ۹ روز، تعداد هسته‌های پرتوزای یک نمونه، به $\frac{1}{8}$ تعداد موجود در آغاز کاهش یافته است. نیمه‌عمر (برحسب روز) ماده چقدر است؟

فصل ۴: آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای

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:

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

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

تمرین ۴-۷

پس از گذشت ۹ روز، تعداد هسته‌های پرتوزای یک نمونه، به $\frac{1}{8}$ تعداد موجود در آغاز کاهش یافته است. نیمه‌عمر (برحسب روز) ماده چقدر است؟

گاز رادون پرتوزا در خانه‌ها

رادون (${}^{222}_{86}\text{Rn}$)، گازی پرتوزاست که به‌طور طبیعی به‌وجود 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 به‌طور چشمگیری بالا رود، به نوع احداث ساختمان و غلظت رادون در خاک اطراف ساختمان بستگی دارد. گاز رادون با نیمه‌عمر 3.82 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.



تعداد نسخه چاپ شده

گاز رادون پرتوزا در خانه‌ها

رادون (${}^{222}_{86}\text{Rn}$)، گازی پرتوزاست که به‌طور طبیعی به‌وجود 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 به‌طور چشمگیری بالا رود، به نوع احداث ساختمان و غلظت رادون در خاک اطراف ساختمان بستگی دارد. گاز رادون با نیمه‌عمر 3.82 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.



تعداد نسخه چاپ شده