



وزارت آموزش و پرورش

سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

فیزیک (۳) - پایه دوازدهم دوره دوم متوسطه - ۱۳۲۰۹
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری

احمد احمدی، روح‌الله خلیلی‌پروجنی، محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، سید هدایت سجادی، مجید عتیقی، سیروان مردوخ‌ی و علیرضا نیکام (اعضای شورای برنامه‌ریزی و گروه تألیف).
سیدفرمانی (ویراستار ادبی)

اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی

احمدرضا امینی (مدیر امور فنی و چاپ) - جواد صفری (مدیر هنری) - محمد مهدی ذبیحی‌فرد (طراح جلد)،
راخه زادفتح‌الله (صفحه‌آرا) - فاطمه رئیس‌ان فیروزآباد (رسم) - سیده فاطمه طباطبایی، بهناز بهبود،
سیف‌الله بیگ محمد دلپوند، زهرا رشیدی مقدم، سیده ملک‌آزادی، حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)

تلفن: ۸۸۲۱۱۶۱-۹، ۸۸۲۱۱۶۱-۹ دورنگار، ۸۸۲۰۹۲۶۶ کدپستی، ۱۵۸۲۷۲۷۲۵۹

وبگاه: www.irtextbook.ir و www.chap.sch.ir

شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)

تلفن: ۳۷۵۱۵-۱۳۹، ۳۷۵۱۵-۱۳۹ دورنگار، ۳۴۹۸۵۱۶۰ صندوق پستی، ۳۷۵۱۵-۱۳۹

شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»

چاپ هفتم ۱۴۰۳

نام کتاب:

پدیدآورنده:

مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف:

شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف:

مدیریت آماده‌سازی هنری:

شناسه افزوده آماده‌سازی:

نشانی سازمان:

ناشر:

چاپخانه:

سال انتشار و نوبت چاپ:

شابک ۹۷۸-۹۶۴-۰۵-۳۱۲۱-۱

ISBN: 978-964-05-3121-1



وزارت آموزش و پرورش

سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

فیزیک (۳) - پایه دوازدهم دوره دوم متوسطه - ۱۳۲۰۹
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری

احمد احمدی، روح‌الله خلیلی‌پروجنی، محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، سید هدایت
سجادی، مجید عتیقی، سیروان مردوخ‌ی و علیرضا نیکام (اعضای شورای برنامه‌ریزی و گروه تألیف). سیدفرمانی
(ویراستار ادبی)

اداره کل نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی

احمدرضا امینی (مدیر امور فنی و چاپ) - جواد صفری (مدیر هنری) - محمد مهدی ذبیحی‌فرد (طراح جلد)،
راخه زادفتح‌الله (صفحه‌آرا) - فاطمه رئیس‌ان فیروزآباد (رسم) - سیده فاطمه طباطبایی، بهناز بهبود، سیف‌الله بیگ محمد
دلپوند، زهرا رشیدی مقدم، سیده ملک‌آزادی و حمید ثابت کلاچاهی (امور آماده‌سازی)

تهران: خیابان ایرانشهر شمالی - ساختمان شماره ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)

تلفن: ۸۸۲۱۱۶۱-۹، ۸۸۲۱۱۶۱-۹ دورنگار، ۸۸۲۰۹۲۶۶ کدپستی، ۱۵۸۲۷۲۷۲۵۹

وبگاه: www.irtextbook.ir و www.chap.sch.ir

شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، تهران - کیلومتر ۱۷ جاده مخصوص کرج - خیابان ۶۱ (داروپخش)

تلفن: ۳۷۵۱۵-۱۳۹، ۳۷۵۱۵-۱۳۹ دورنگار، ۳۴۹۸۵۱۶۰ صندوق پستی، ۳۷۵۱۵-۱۳۹

شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»

چاپ هشتم ۱۴۰۴

نام کتاب:

پدیدآورنده:

مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف:

شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف:

مدیریت آماده‌سازی هنری:

شناسه افزوده آماده‌سازی:

نشانی سازمان:

ناشر:

چاپخانه:

سال انتشار و نوبت چاپ:

شابک ۹۷۸-۹۶۴-۰۵-۳۱۲۱-۱

ISBN: 978-964-05-3121-1

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، عکس‌برداری، 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، عکس‌برداری، 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

حرکت بر خط راست

۱

۱

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



دینامیک و حرکت دایره‌ای

۲۹

۲۹

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



نوسان و موج

۶۱

۶۱

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



برهم کنش های موج

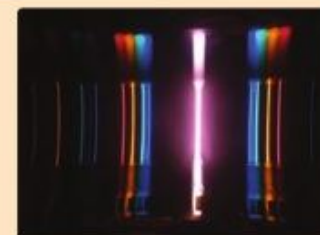
۸۹



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

آشنایی با فیزیک اتمی

۱۱۵



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

آشنایی با فیزیک هسته ای

۱۳۷



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

برهم کنش های موج

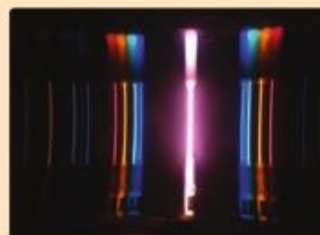
۸۹



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

آشنایی با فیزیک اتمی

۱۱۵



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

آشنایی با فیزیک هسته ای

۱۳۷



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

جدول دوره ای عناصر

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

جدول دوره ای عناصر

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

۳- مفاهیم اساسی

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

بخش موج، از مباحث حرکت نوسانی، امواج مکانیکی (شامل امواج فتر، صوتی و...) و امواج الکترومغناطیسی و نیز برهم‌کنش‌های امواج شامل (بازتاب، شکست، پراش و تداخل) تشکیل شده است. بخشی از دانش مورد نیاز اولیه این قسمت در علوم دوره اول متوسطه و بخشی نیز در شیمی سال دهم مطرح شده است. بخش فیزیک جدید، از مباحث فیزیک اتمی (شامل اثر فوتوالکتریک، طیف خطی، مدل‌های اتمی و لیزر) و فیزیک هسته‌ای (شامل ساختار هسته، پرتوهای طبیعی و نیمه‌عمر، شکافت و همجوشی هسته‌ای) تشکیل شده است. بخشی از دانش مورد نیاز اولیه این قسمت در علوم دوره اول متوسطه و بخشی نیز در درس شیمی سال دهم، مطرح شده است.

۴- مهارت‌های اساسی

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

۵- راهبردهای یاددهی - یادگیری

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

۶- شیوه ارزشیابی

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

۳- مفاهیم اساسی

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

بخش موج، از مباحث حرکت نوسانی، امواج مکانیکی (شامل امواج فتر، صوتی و...) و امواج الکترومغناطیسی و نیز برهم‌کنش‌های امواج شامل (بازتاب، شکست، پراش و تداخل) تشکیل شده است. بخشی از دانش مورد نیاز اولیه این قسمت در علوم دوره اول متوسطه و بخشی نیز در شیمی سال دهم مطرح شده است. بخش فیزیک جدید، از مباحث فیزیک اتمی (شامل اثر فوتوالکتریک، طیف خطی، مدل‌های اتمی و لیزر) و فیزیک هسته‌ای (شامل ساختار هسته، پرتوهای طبیعی و نیمه‌عمر، شکافت و همجوشی هسته‌ای) تشکیل شده است. بخشی از دانش مورد نیاز اولیه این قسمت در علوم دوره اول متوسطه و بخشی نیز در درس شیمی سال دهم، مطرح شده است.

۴- مهارت‌های اساسی

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

۵- راهبردهای یاددهی - یادگیری

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

۶- شیوه ارزشیابی

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

• محتوای اصلی و فرعی در هر فصل کدام موضوع ها هستند؟

• هر فصل را چگونه می توان به واحدهای یادگیری معینی تقسیم کرد و مطابق با زمان بندی پیش برد؟

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

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

گروه فیزیک لازم می داند از دبیرخانه راهبردی فیزیک، اتحادیه انجمن های علمی آموزشی معلمان فیزیک ایران و همکارانی که به طور مستقل در اعتبارسنجی این کتاب با ما همکاری داشته اند، تشکر و قدردانی کند. همچنین این گروه از دریافت پیشنهادهای اصلاحی دبیران محترم، صاحب نظران و دانش آموزان عزیز همچون همیشه استقبال می کند.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب های درسی عمومی و متوسطه نظری



• محتوای اصلی و فرعی در هر فصل کدام موضوع ها هستند؟

• هر فصل را چگونه می توان به واحدهای یادگیری معینی تقسیم کرد و مطابق با زمان بندی پیش برد؟

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

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

گروه فیزیک لازم می داند از دبیرخانه راهبردی فیزیک، اتحادیه انجمن های علمی آموزشی معلمان فیزیک ایران و همکارانی که به طور مستقل در اعتبارسنجی این کتاب با ما همکاری داشته اند، تشکر و قدردانی کند. همچنین این گروه از دریافت پیشنهادهای اصلاحی دبیران محترم، صاحب نظران و دانش آموزان عزیز همچون همیشه استقبال می کند.

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب های درسی عمومی و متوسطه نظری





فصل



حرکت بر خط راست



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

بخش ها

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



فصل



حرکت بر خط راست



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

بخش ها

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

فصل ۱: حرکت بر خط راست

مثال ۱-۲

کفش دوزکی که در جهت محور x در حرکت است، در لحظه‌های $t_1 = 0\text{ s}$ و $t_2 = 7\text{ s}$ و $t_3 = -2\text{ s}$ از مکان‌های $x_1 = -2\text{ cm}$ و $x_2 = 5\text{ cm}$ می‌گذرد.

(الف) بردارهای مکان در لحظه‌های t_1 و t_2 و بردار جابه‌جایی 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:

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

تمرین ۱-۱

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

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

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

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

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



فصل ۱: حرکت بر خط راست

مثال ۱-۲

کفش دوزکی که در جهت محور x در حرکت است، در لحظه‌های $t_1 = 0\text{ s}$ و $t_2 = 7\text{ s}$ و $t_3 = -2\text{ s}$ از مکان‌های $x_1 = -2\text{ cm}$ و $x_2 = 5\text{ cm}$ می‌گذرد.

(الف) بردارهای مکان در لحظه‌های t_1 و t_2 و بردار جابه‌جایی 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:

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

تمرین ۱-۱

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

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

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

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

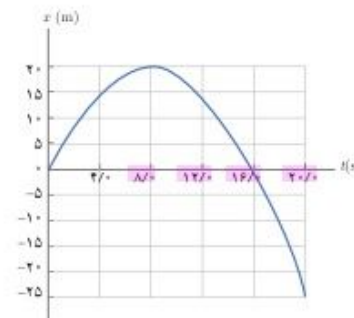
شکل ۱-۳ مکانی که روی یک محور تعیین می‌شود بر حسب یکای طول (در اینجا متر) نشانه گذاری می‌شود و در دو جهت تا بی‌نهایت ادامه دارد. نام محور، در اینجا x ، در قسمت مثبت نوشته می‌شود.



فیزيك ۳۳

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

مثال ۶-۱



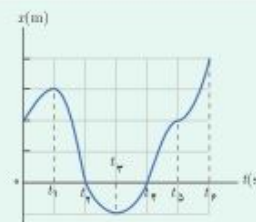
شکل روبه رو، نمودار مکان - زمان موتورسواری را نشان می دهد که روی خط راست حرکت می کند.
الف) با استفاده از داده های روی شکل، سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه های زمانی $0/s$ تا $8/s$ ، $8/s$ تا $4/s$ ، $4/s$ تا $0/s$ ، $16/s$ تا $8/s$ ، $16/s$ تا $4/s$ ، $4/s$ تا $20/s$ حساب کنید.
ب) در کدام یک 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 :

$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20m - 0m}{8s - 0s} = 2.5m/s$	بازه زمانی $0/s$ تا $8/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0m - 20m}{4s - 8s} = 5m/s$	بازه زمانی $8/s$ تا $4/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20m - 0m}{4s - 0s} = 5m/s$	بازه زمانی $0/s$ تا $4/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0m - 20m}{16s - 8s} = -2.5m/s$	بازه زمانی $8/s$ تا $16/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-20m - 20m}{20s - 16s} = -7.5m/s \approx -3.75m/s$	بازه زمانی $16/s$ تا $20/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-20m - 0m}{20s - 16s} = -5m/s \approx -6.25m/s$	بازه زمانی $16/s$ تا $4/s$

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 ۳-۱

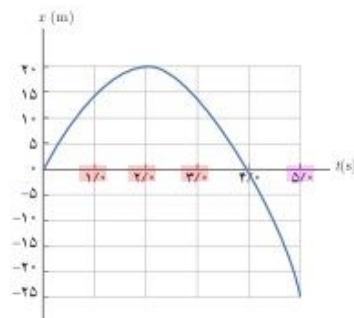


با توجه به نمودار مکان - زمان شکل روبه رو به پرسش های زیر پاسخ دهید :
الف) متحرک چند بار از مبدأ مکان عبور می کند؟
ب) در کدام بازه های زمانی متحرک در حال دور شدن از مبدأ است؟
پ) در کدام بازه های زمانی متحرک در حال نزدیک شدن به مبدأ است؟
ت) جهت حرکت چند بار تغییر کرده است؟ در چه لحظه هایی؟
ث) جابه جایی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

فیزيك ۳۳

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

مثال ۶-۱



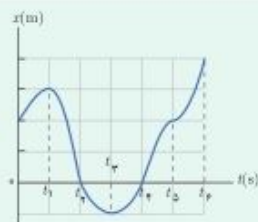
شکل روبه رو، نمودار مکان - زمان خودرویی را نشان می دهد که روی خط راست حرکت می کند.
الف) با استفاده از داده های روی شکل، سرعت متوسط خودرو را در هر یک از بازه های زمانی $0/s$ تا $8/s$ ، $8/s$ تا $4/s$ ، $4/s$ تا $0/s$ ، $16/s$ تا $8/s$ ، $16/s$ تا $4/s$ ، $4/s$ تا $20/s$ حساب کنید.
ب) در کدام یک از این 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 :

$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20m - 0m}{8s - 0s} = 2.5m/s$	بازه زمانی $0/s$ تا $8/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0m - 20m}{4s - 8s} = 5m/s$	بازه زمانی $8/s$ تا $4/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20m - 0m}{4s - 0s} = 5m/s$	بازه زمانی $0/s$ تا $4/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0m - 20m}{16s - 8s} = -2.5m/s$	بازه زمانی $8/s$ تا $16/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-20m - 20m}{20s - 16s} = -7.5m/s \approx -3.75m/s$	بازه زمانی $16/s$ تا $20/s$
$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-20m - 0m}{20s - 16s} = -5m/s \approx -6.25m/s$	بازه زمانی $16/s$ تا $4/s$

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

پرسش ۳-۱



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؟
پ) در کدام بازه های زمانی متحرک در حال نزدیک شدن به مبدأ است؟
ت) جهت حرکت چند بار تغییر کرده است؟ در چه لحظه هایی؟
ث) جابه جایی کل در جهت محور x است یا خلاف آن؟

فیزيك ۳۳

مثال ۲-۱

شکل روبه‌رو نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. d_1 و d_2 خط‌های مماس بر منحنی را در دو لحظه متفاوت نشان می‌دهند. در کدام لحظه سرعت متحرک بیشتر است؟
پاسخ: با توجه به شکل، شیب خط d_2 بیشتر از شیب خط d_1 است. بنابراین سرعت متحرک در لحظه t_2 بیشتر از سرعت آن در لحظه t_1 است ($v_2 > v_1$). توجه کنید که شیب هر دو خط مثبت است و بنابراین سرعت نیز در هر دو لحظه مثبت، یعنی در جهت محور x است.

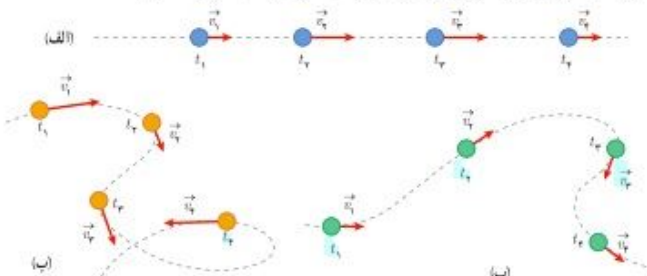
پوشش ۵-۱

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

تمرین ۳-۱

شکل روبه‌رو نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد. خط مماس بر منحنی در لحظه $t = 4/5$ رسم شده است. سرعت متحرک را در این لحظه پیدا کنید.

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



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

فیزيك ۳۳

مثال ۲-۱

شکل روبه‌رو نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. d_1 و d_2 خط‌های مماس بر منحنی را در دو لحظه متفاوت نشان می‌دهند. در کدام لحظه سرعت متحرک بیشتر است؟
پاسخ: با توجه به شکل، شیب خط d_2 بیشتر از شیب خط d_1 است. بنابراین سرعت متحرک در لحظه t_2 بیشتر از سرعت آن در لحظه t_1 است ($v_2 > v_1$). توجه کنید که شیب هر دو خط مثبت است و بنابراین سرعت نیز در هر دو لحظه مثبت، یعنی در جهت محور x است.

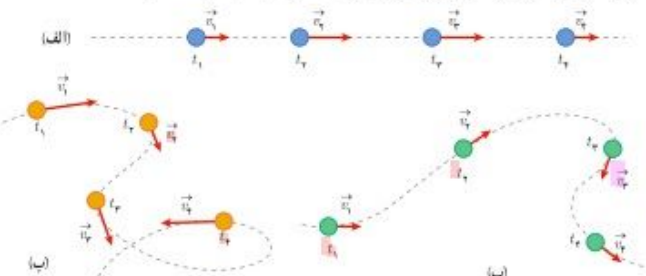
پوشش ۵-۱

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

تمرین ۳-۱

شکل روبه‌رو نمودار مکان - زمان متحرکی را نشان می‌دهد. خط مماس بر منحنی در لحظه $t = 4/5$ رسم شده است. سرعت متحرک را در این لحظه پیدا کنید.

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



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

فصل ۱: حرکت بر خط راست

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

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

مثال ۸-۱

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.



پاسخ: از رابطه ۵-۱ داریم:

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

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

فصل ۱: حرکت بر خط راست

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

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

مثال ۸-۱

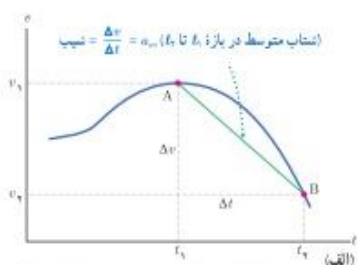
خودرویی از حال سکون در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند. پس از $12s$ ، سرعت خودرو به $24m/s$ در جهت محور x می‌رسد. شتاب متوسط خودرو را در این بازه زمانی به دست آورید.



پاسخ: از رابطه ۵-۱ داریم:

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

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

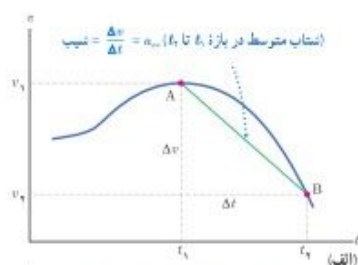


اگر متحرک در یک راستا حرکت کند رابطه ۵-۱ را می‌توان به صورت زیر به کار برد ولی با توجه به ماهیت برداری v_1 و v_2 باید به علامت‌های جبری آنها که نشان‌دهنده جهت آنهاست توجه کنیم.

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

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



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.

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

تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت-زمان: در شکل ۹-۱ الف، نمودار سرعت-زمان متحرکی نشان داده شده است که روی خط راست حرکت می‌کند. با توجه به تعریف شتاب متوسط، معلوم می‌شود، که شتاب متوسط بین دو لحظه برابر شیب خطی است که نمودار سرعت-زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۹-۱ ب دیده می‌شود، اگر Δt به سمت صفر میل کند $(\Delta t \rightarrow 0)$ خط واصل بین نقطه‌های A و B، به خط مماس بر نمودار در نقطه A میل می‌کند. در این حالت، شیب خط مماس برابر شتاب متحرک در لحظه t_1 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که: **شتاب در هر لحظه دلخواه t ، 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 $a_{av} = \Delta v / \Delta t$ درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحه ۱۰۳ یا فضای ۳۰۳ می‌کند خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

^۱ آموزش مسافتی که دانش‌آموزان را در محاسبه $a_{av} = \Delta v / \Delta t$ درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحه ۱۰۳ یا فضای ۳۰۳ می‌کند خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

فیزیک ۳

مثال ۱-۹



نمودار سرعت-زمان موتورسواری که در امتداد محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی $0/s$ تا $12/s$ مطابق شکل روبه‌رو است. شتاب متوسط موتورسوار و جهت آن را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/s$ تا $4/s$ ، $4/s$ تا $8/s$ ، $8/s$ تا $10/s$ ، $10/s$ تا $12/s$ بیابید. **پاسخ:** با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطه ۱-۶، شتاب متوسط موتورسوار، برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با:

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{12 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}}{4 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 3 \text{ m/s}^2$$

بازه زمانی $0/s$ تا $4/s$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{16 \text{ m/s} - 12 \text{ m/s}}{8 \text{ s} - 4 \text{ s}} = 1 \text{ m/s}^2$$

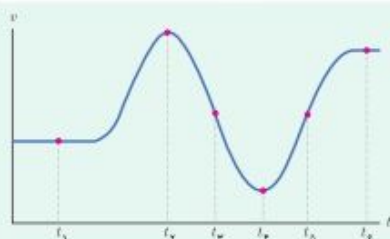
بازه زمانی $4/s$ تا $8/s$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{20 \text{ m/s} - 16 \text{ m/s}}{10 \text{ s} - 8 \text{ s}} = 2 \text{ m/s}^2$$

بازه زمانی $8/s$ تا $10/s$

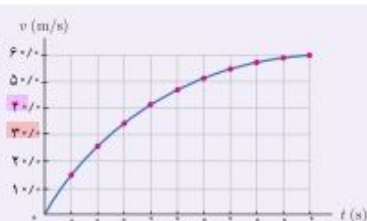
با توجه به علامت مثبت a_{av} در هر سه بازه زمانی، شتاب متوسط در جهت مثبت محور x است. اگر در هر بازه زمانی دلخواه دیگری نیز شتاب متوسط موتورسوار را حساب کنید با توجه به ثابت بودن شیب نمودار سرعت-زمان، اندازه و جهت یکسانی برای شتاب به‌دست می‌آید.

پوش 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 و t_4 تعیین کنید.

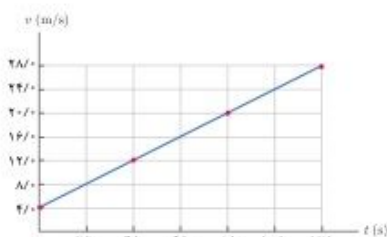
تمرین ۱-۴



نمودار سرعت-زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی $0/s$ تا $20/s$ مطابق شکل روبه‌رو است. الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟ ب) شتاب خودرو را در لحظه $t = 10/s$ به‌دست آورید.

فیزیک ۳

مثال ۱-۹



نمودار سرعت-زمان موتورسواری که در امتداد محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی $0/s$ تا $12/s$ مطابق شکل روبه‌رو است. شتاب متوسط موتورسوار و جهت آن را در هر یک از بازه‌های زمانی $0/s$ تا $4/s$ ، $4/s$ تا $8/s$ ، $8/s$ تا $10/s$ ، $10/s$ تا $12/s$ بیابید. **پاسخ:** با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطه ۱-۶، شتاب متوسط موتورسوار، برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با:

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{12 \text{ m/s} - 0 \text{ m/s}}{4 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 3 \text{ m/s}^2$$

بازه زمانی $0/s$ تا $4/s$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{16 \text{ m/s} - 12 \text{ m/s}}{8 \text{ s} - 4 \text{ s}} = 1 \text{ m/s}^2$$

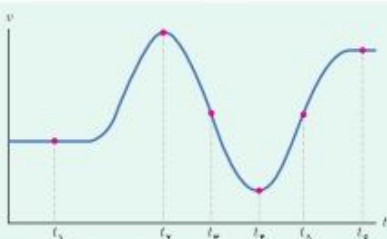
بازه زمانی $4/s$ تا $8/s$

$$a_{av} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{20 \text{ m/s} - 16 \text{ m/s}}{10 \text{ s} - 8 \text{ s}} = 2 \text{ m/s}^2$$

بازه زمانی $8/s$ تا $10/s$

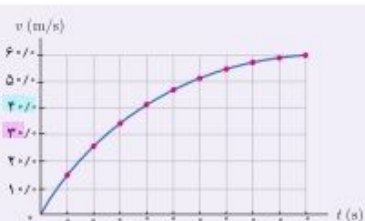
با توجه به علامت مثبت a_{av} در هر سه بازه زمانی، شتاب متوسط در جهت مثبت محور x است. اگر در هر بازه زمانی دلخواه دیگری نیز شتاب متوسط موتورسوار را حساب کنید با توجه به ثابت بودن شیب نمودار سرعت-زمان، اندازه و جهت یکسانی برای شتاب به‌دست می‌آید.

پوش 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 و t_4 تعیین کنید.

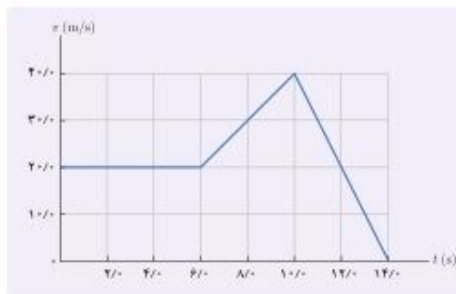
تمرین ۱-۴



نمودار سرعت-زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی $0/s$ تا $20/s$ مطابق شکل روبه‌رو است. الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟ ب) شتاب خودرو را در لحظه $t = 10/s$ به‌دست آورید.

فصل ۱: حرکت بر خط راست

تمرین ۵-۱



نمودار سرعت - زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی صفر تا $12/0s$ مطابق شکل رویه‌رو است.
الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟
ب) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t = 2/0s$ ، $t = 8/0s$ و $t = 11/0s$ به دست آورید.

۲-۱ حرکت با سرعت ثابت

ساده‌ترین نوع حرکت، حرکت با سرعت ثابت است. در این نوع حرکت، اندازه و جهت سرعت متحرک در طول مسیر ثابت است (شکل ۱-۱). پیش از این و در مثال ۵-۱، با نمونه‌ای از حرکت با سرعت ثابت آشنا شدیم. در این مثال شیب نمودار مکان - زمان متحرک در طول حرکت ثابت و در نتیجه سرعت متوسط متحرک در هر بازه زمانی دلخواه، برابر سرعت لحظه‌ای آن است. در این صورت می‌توان نوشت:

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



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

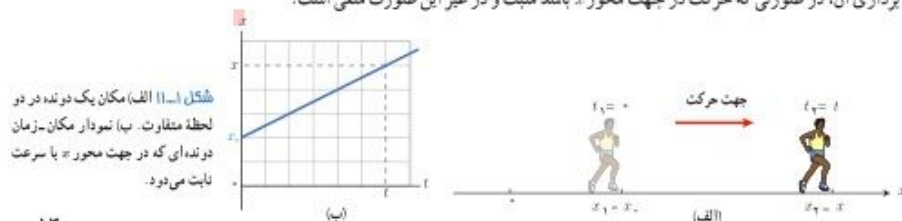
اگر مطابق شکل ۱-۱ متحرک در لحظه $t_1 = 0$ در مکان $x_1 = x_0$ و در لحظه $t_2 = t$ در مکان $x_2 = x$ باشد، رابطه اخیر را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

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

یا:

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

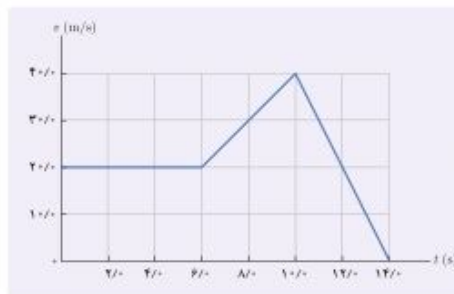
در معادله ۷-۱ معمولاً x_0 را که مکان متحرک در لحظه $t = 0$ است مکان اولیه متحرک می‌نامند. توجه کنید که مکان‌های x و x_0 می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند. سرعت متحرک هم به دلیل ماهیت برداری آن، در صورتی که حرکت در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این صورت منفی است.



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

فصل ۱: حرکت بر خط راست

تمرین ۵-۱



نمودار سرعت - زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازه زمانی صفر تا $12/0s$ مطابق شکل رویه‌رو است.
الف) شتاب متوسط خودرو در این بازه زمانی چقدر است؟
ب) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t = 2/0s$ ، $t = 8/0s$ و $t = 11/0s$ به دست آورید.

۲-۱ حرکت با سرعت ثابت

ساده‌ترین نوع حرکت، حرکت با سرعت ثابت است. در این نوع حرکت، اندازه و جهت سرعت متحرک در طول مسیر ثابت است (شکل ۱-۱). پیش از این و در مثال ۵-۱، با نمونه‌ای از حرکت با سرعت ثابت آشنا شدیم. در این مثال شیب نمودار مکان - زمان متحرک در طول حرکت ثابت و در نتیجه سرعت متوسط متحرک در هر بازه زمانی دلخواه، برابر سرعت لحظه‌ای آن است. در این صورت می‌توان نوشت:

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



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

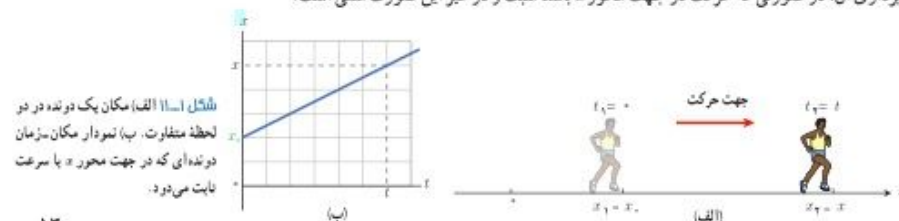
اگر مطابق شکل ۱-۱ متحرک در لحظه $t_1 = 0$ در مکان $x_1 = x_0$ و در لحظه $t_2 = t$ در مکان $x_2 = x$ باشد، رابطه اخیر را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

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

یا:

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

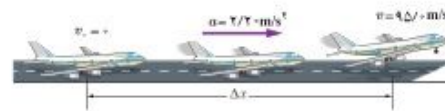
در معادله ۷-۱ معمولاً x_0 را که مکان متحرک در لحظه $t = 0$ است مکان اولیه متحرک می‌نامند. توجه کنید که مکان‌های x و x_0 می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند. سرعت متحرک هم به دلیل ماهیت برداری آن، در صورتی که حرکت در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این صورت منفی است.



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

فیزیک ۳

مثال ۱۱



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

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

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

$$v = at + v_i \Rightarrow 9.5 \text{ m/s} = (2/2 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 43/2 \text{ s}$$

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

(ب)

$$v_{av} = \frac{v_i + v_f}{2} = \frac{0 \text{ m/s} + 9.5 \text{ m/s}}{2} = 47/5 \text{ m/s}$$

(پ) از رابطه ۴-۱ داریم:

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

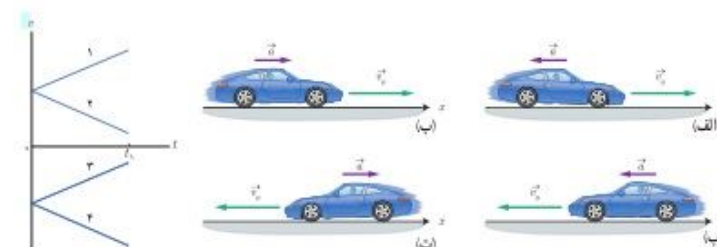
تمرین ۸-۱

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

(الف) سرعت متحرک در لحظه $t = 4/5 \text{ s}$ چقدر است؟ (ب) سرعت متوسط متحرک و جابه‌جایی آن در بازه زمانی صفر تا $t = 4/5 \text{ s}$ چقدر است؟ (پ) نمودار سرعت - زمان این متحرک را رسم کنید.

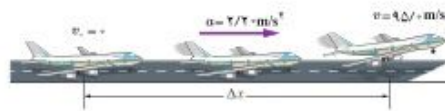
فعالیت ۲-۱

در تمامی حالت‌های شکل زیر، خودروها در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت‌اند. حرکت هر یک از خودروها، توسط کدام یک از نمودارهای $v-t$ 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.



فیزیک ۳

مثال ۱۱



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

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

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

$$v = at + v_i \Rightarrow 9.5 \text{ m/s} = (2/2 \text{ m/s}^2)t + 0 \text{ m/s} \Rightarrow t = 43/2 \text{ s}$$

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

(ب)

$$v_{av} = \frac{v_i + v_f}{2} = \frac{0 \text{ m/s} + 9.5 \text{ m/s}}{2} = 47/5 \text{ m/s}$$

(پ) از رابطه ۴-۱ داریم:

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

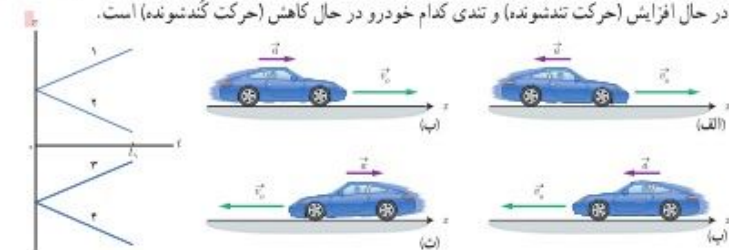
تمرین ۸-۱

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

(الف) سرعت متحرک در لحظه $t = 4/5 \text{ s}$ چقدر است؟ (ب) سرعت متوسط متحرک و جابه‌جایی آن در بازه زمانی صفر تا $t = 4/5 \text{ s}$ چقدر است؟ (پ) نمودار سرعت - زمان این متحرک را رسم کنید.

فعالیت ۲-۱

در تمامی حالت‌های شکل زیر، خودروها در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت‌اند. حرکت هر یک از خودروها، توسط کدام یک از نمودارهای $v-t$ 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.



فیزیک ۳

پ) با توجه به نمودار مکان-زمان، جابه‌جایی متحرک در بازه زمانی $(0/s, 3/s)$ برابر $\Delta x = 0 - (-9/m) = 9/m$ است. (ت) سطح بین منحنی سرعت و محور زمان در نمودار سرعت-زمان، برابر $(\frac{1}{2} \times 6/m/s)(3/s) = 9/m$ است که با نتیجه قسمت پ سازگار است. (ث) از رابطه ۴-۱ داریم:

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

توجه کنید که می‌توانستیم سرعت متوسط در این بازه زمانی را از رابطه $v_{av} = \frac{(v_1 + v_2)}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می‌رسد.

تمرین ۱-۱

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_1 ، سرعت v ، شتاب a متحرک استفاده کرد. برای به‌دست آوردن این معادله از رابطه‌های ۴-۱ و ۴-۱ شروع می‌کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام به‌دست آوردن معادله مکان-زمان دیدیم می‌توان نوشت:

$$x = \left(\frac{v+v_1}{2}\right)t + x_1$$

با به‌دست آوردن t از معادله ۴-۱ و قرار دادن آن در رابطه بالا داریم:

$$x = \left(\frac{v+v_1}{2}\right)\left(\frac{v-v_1}{a}\right) + x_1$$

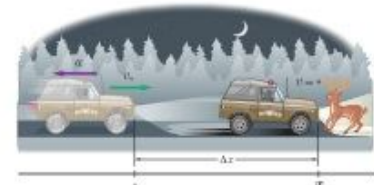
در این صورت داریم:

$$v^2 = v_1^2 + 2a\Delta x \quad (\text{معادله سرعت-جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت}) \quad (11-1)$$

اگرچه این رابطه را برای بازه زمانی صفر تا t به‌دست آوردیم، برای هر بازه زمانی دلخواه t_1 تا t_2 نیز می‌توانیم از رابطه زیر استفاده کنیم که در آن x_1 و v_1 مناسبت با لحظه t_1 و همچنین x_2 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 گوزین بدون حرکتی را در جلوی خود می‌بیند و ترمز می‌گیرد (شکل روبه‌رو). حرکت خودرو با شنایی 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؟

فیزیک ۳

پ) با توجه به نمودار مکان-زمان، جابه‌جایی متحرک در بازه زمانی $(0/s, 3/s)$ برابر $\Delta x = 0 - (-9/m) = 9/m$ است. (ت) سطح بین منحنی سرعت و محور زمان در نمودار سرعت-زمان، برابر $(\frac{1}{2} \times 6/m/s)(3/s) = 9/m$ است که با نتیجه قسمت پ سازگار است. (ث) از رابطه ۴-۱ داریم:

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

توجه کنید که می‌توانستیم سرعت متوسط در این بازه زمانی را از رابطه $v_{av} = \frac{(v_1 + v_2)}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می‌رسد.

تمرین ۱-۱

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_1 ، سرعت v ، شتاب a متحرک استفاده کرد. برای به‌دست آوردن این معادله از رابطه‌های ۴-۱ و ۴-۱ شروع می‌کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام به‌دست آوردن معادله مکان-زمان دیدیم می‌توان نوشت:

$$x = \left(\frac{v+v_1}{2}\right)t + x_1$$

با به‌دست آوردن t از معادله ۴-۱ و قرار دادن آن در رابطه بالا داریم:

$$x = \left(\frac{v+v_1}{2}\right)\left(\frac{v-v_1}{a}\right) + x_1$$

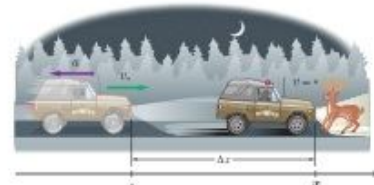
در این صورت داریم:

$$v^2 = v_1^2 + 2a\Delta x \quad (\text{معادله سرعت-جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت}) \quad (11-1)$$

اگرچه این رابطه را برای بازه زمانی صفر تا t به‌دست آوردیم، برای هر بازه زمانی دلخواه t_1 تا t_2 نیز می‌توانیم از رابطه زیر استفاده کنیم که در آن x_1 و v_1 مناسبت با لحظه t_1 و همچنین x_2 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 گوزین بدون حرکتی را در جلوی خود می‌بیند و ترمز می‌گیرد (شکل روبه‌رو). حرکت خودرو با شنایی 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؟

فیزیک ۳

در لحظه $t_4 = 4s$ داریم:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow x_4 = \frac{1}{2}(-2/0 \text{ m/s}^2)(4s)^2 + (-2/0 \text{ m/s})(4s) + 0 \Rightarrow x_4 = 0$$

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

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

در نتیجه متحرک در لحظه $t_4 = 4s$ در مکان $x_4 = x_2 + \Delta x = 0 + 4 \text{ m} = 4 \text{ m}$ قرار دارد.

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

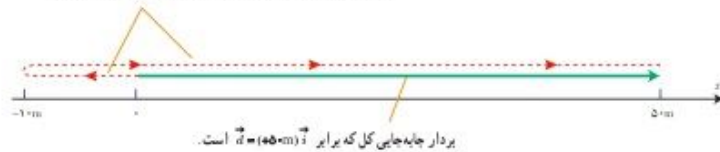
$$\Delta x = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)\Delta t = \left(\frac{2/0 \text{ m/s} + 0}{2}\right)(1s) \Rightarrow \Delta x = 1 \text{ m}$$

در نتیجه متحرک در لحظه $t_4 = 5s$ در مکان $x_4 = x_4 + \Delta x = 4 \text{ m} + 1 \text{ m} = 5 \text{ m}$ قرار دارد.

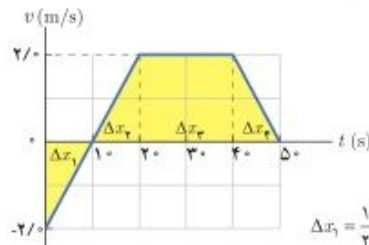


ث) در شکل زیر جابه جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان حرکت نشان داده شده است.

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



بردار جابه جایی کل که برابر $\vec{a} = (5\hat{x} + 0\hat{y}) \text{ m}$ است.



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

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

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

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

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

فیزیک ۳

در لحظه $t_4 = 4s$ داریم:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \Rightarrow x_4 = \frac{1}{2}(-2/0 \text{ m/s}^2)(4s)^2 + (-2/0 \text{ m/s})(4s) + 0 \Rightarrow x_4 = 0$$

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

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

در نتیجه متحرک در لحظه $t_4 = 4s$ در مکان $x_4 = x_2 + \Delta x = 0 + 4 \text{ m} = 4 \text{ m}$ قرار دارد.

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

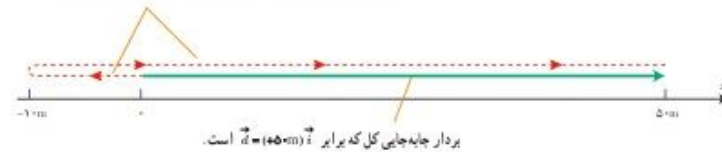
$$\Delta x = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)\Delta t = \left(\frac{2/0 \text{ m/s} + 0}{2}\right)(1s) \Rightarrow \Delta x = 1 \text{ m}$$

در نتیجه متحرک در لحظه $t_4 = 5s$ در مکان $x_4 = x_4 + \Delta x = 4 \text{ m} + 1 \text{ m} = 5 \text{ m}$ قرار دارد.

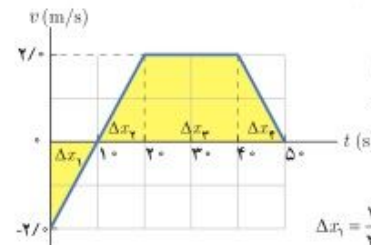


ث) در شکل زیر جابه جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان حرکت نشان داده شده است.

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



بردار جابه جایی کل که برابر $\vec{a} = (5\hat{x} + 0\hat{y}) \text{ m}$ است.



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

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

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

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

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

فصل ۱: حرکت بر خط راست

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

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

همچنین با استفاده از معادله 12.1 سرعت گلوله پس از $1/0 \text{ s}$ برابر است با:

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

حرکت سقوط آزاد، حرکتی با شتاب ثابت $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ است، لذا با توجه به مفهوم شتاب، تبدی گلوله در هر ثانیه 9.8 m/s افزایش می‌یابد. به طوری که تبدی گلوله در پایان ثانیه اول به 9.8 m/s می‌رسد.

(ب) برای پیدا کردن سرعت برخورد گلوله با زمین از معادله 12.1 داریم:

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

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

به دو روش می‌توان زمان کل را به دست آورد. از معادله‌های 12.1 و 12.2 داریم:

$$v = -gt \Rightarrow -4.4 \text{ m/s} = -(9.8 \text{ m/s}^2)t \Rightarrow t = 1/0 \text{ s}$$

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

مثال ۱۶-۱

سنگی از صخره‌ای به ارتفاع $122/5 \text{ m}$ نسبت به سطح زمین آزادانه سقوط می‌کند.

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

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

(ج) جابه‌جایی سنگ را بین دو لحظه $t_1 = 3/0 \text{ s}$ و $t_2 = 4/0 \text{ s}$ به دست آورید.

(د) نمودارهای مکان - زمان، سرعت - زمان و شتاب - زمان سنگ را رسم کنید.

پاسخ: (الف) جهت بالا را مثبت و مبدأ مکان را محل رها شدن سنگ فرض می‌کنیم. به این ترتیب از معادله 12.1 داریم:

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

(ب) رابطه 12.1 را برای امتداد قائم می‌توان به صورت $v_{av} = \Delta y / \Delta t$ نظر گرفت. به این ترتیب داریم:

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

(ج) ابتدا با استفاده از رابطه 12.1 جابه‌جایی سنگ را تا هر یک از لحظه‌های $t_1 = 3/0 \text{ s}$ و $t_2 = 4/0 \text{ s}$ پیدا می‌کنیم. سپس با کم کردن این دو جابه‌جایی از یکدیگر، جابه‌جایی سنگ بین این دو لحظه به دست می‌آید.

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

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

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

فصل ۱: حرکت بر خط راست

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

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

همچنین با استفاده از معادله 12.1 سرعت گلوله پس از $1/0 \text{ s}$ برابر است با:

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

حرکت سقوط آزاد، حرکتی با شتاب ثابت $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ است، لذا با توجه به مفهوم شتاب، تبدی گلوله در هر ثانیه 9.8 m/s افزایش می‌یابد. به طوری که تبدی گلوله در پایان ثانیه اول به 9.8 m/s می‌رسد.

(ب) برای پیدا کردن سرعت برخورد گلوله با زمین از معادله 12.1 داریم:

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

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

به دو روش می‌توان زمان کل را به دست آورد. از معادله‌های 12.1 و 12.2 داریم:

$$v = -gt \Rightarrow -4.4 \text{ m/s} = -(9.8 \text{ m/s}^2)t \Rightarrow t = 1/0 \text{ s}$$

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

مثال ۱۶-۱

سنگی از صخره‌ای به ارتفاع $122/5 \text{ m}$ نسبت به سطح زمین آزادانه سقوط می‌کند.

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

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

(ج) جابه‌جایی سنگ را بین دو لحظه $t_1 = 3/0 \text{ s}$ و $t_2 = 4/0 \text{ s}$ به دست آورید.

(د) نمودارهای مکان - زمان، سرعت - زمان و شتاب - زمان سنگ را رسم کنید.

پاسخ: (الف) جهت بالا را مثبت و مبدأ مکان را محل رها شدن سنگ فرض می‌کنیم. به این ترتیب از معادله 12.1 داریم:

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

(ب) رابطه 12.1 را برای امتداد قائم می‌توان به صورت $v_{av} = \Delta y / \Delta t$ نظر گرفت. به این ترتیب داریم:

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

(ج) ابتدا با استفاده از رابطه 12.1 جابه‌جایی سنگ را تا هر یک از لحظه‌های $t_1 = 3/0 \text{ s}$ و $t_2 = 4/0 \text{ s}$ پیدا می‌کنیم. سپس با کم کردن این دو جابه‌جایی از یکدیگر، جابه‌جایی سنگ بین این دو لحظه به دست می‌آید.

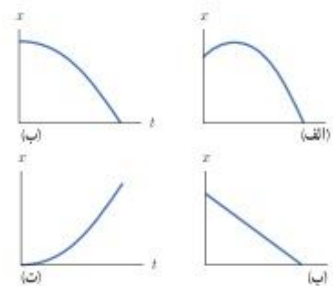
$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0 \Rightarrow y_1 = -\frac{1}{2}(9.8 \text{ m/s}^2)(3/0 \text{ s})^2 + 0 \Rightarrow y_1 = -44/0 \text{ m}$$

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

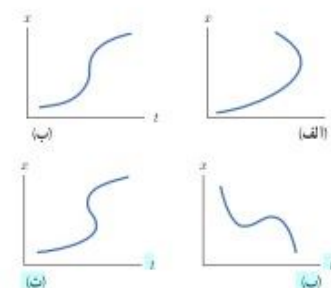
$$\Delta y = y_2 - y_1 = -78/0 \text{ m} - (-44/0 \text{ m}) = -34/0 \text{ m}$$

فیزیک ۳

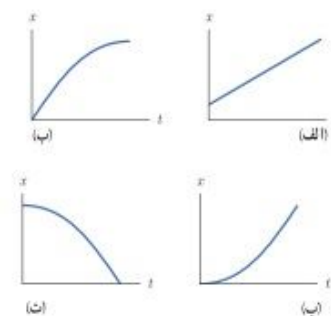
الف) در کدام بازه زمانی دوتنه سریع تر دویده است؟
 ب) در کدام بازه زمانی، دوتنه ایستاده است؟
 پ) سرعت دوتنه را در بازه زمانی ۰s تا ۲۵۰s حساب کنید.
 ت) سرعت دوتنه را در بازه زمانی ۵۰۰s تا ۱۰۰۰s حساب کنید.
 ث) سرعت متوسط دوتنه را در بازه زمانی ۰s تا ۱۰۰۰s حساب کنید.
 ج) توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان-زمان شکل زیر می تواند نشان دهنده نمودار $x-t$ یک متحرک باشد.



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



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



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

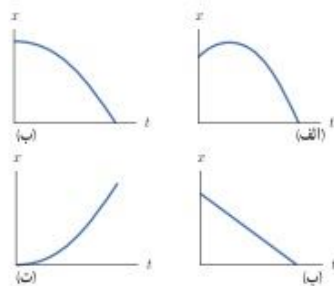


۳. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان-زمان نشان داده شده، حرکت متحرکی را توصیف می کند که سرعت اولیه آن در جهت محور x و شتاب آن بر خلاف جهت محور x است.

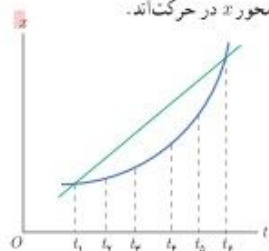


فیزیک ۳

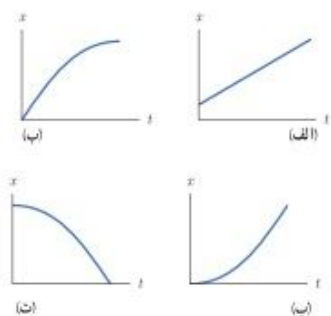
الف) در کدام بازه زمانی دوتنه سریع تر دویده است؟
 ب) در کدام بازه زمانی، دوتنه ایستاده است؟
 پ) سرعت دوتنه را در بازه زمانی ۰s تا ۲۵۰s حساب کنید.
 ت) سرعت دوتنه را در بازه زمانی ۵۰۰s تا ۱۰۰۰s حساب کنید.
 ث) سرعت متوسط دوتنه را در بازه زمانی ۰s تا ۱۰۰۰s حساب کنید.
 ج) توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان-زمان شکل زیر می تواند نشان دهنده نمودار $x-t$ یک متحرک باشد.



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



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



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

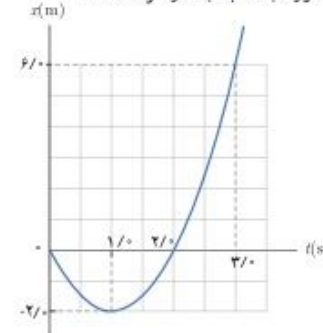


۳. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان-زمان نشان داده شده، حرکت متحرکی را توصیف می کند که سرعت اولیه آن در جهت محور x و شتاب آن بر خلاف جهت محور x است.



فیزيک ۳

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



الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه های $t=5s$ و $t=15s$ به دست آورید.
ب) شتاب متوسط در بازه زمانی $t_1=0s$ تا $t_2=20s$ را به دست آورید.
پ) در هر یک از بازه های زمانی $t_1=0s$ تا $t_2=10s$ و $t_1=10s$ تا $t_2=20s$ خودرو چقدر جابه جا شده است؟
ت) سرعت متحرک را در لحظه $t=10s$ پیدا کنید.
ث) نمودار سرعت - زمان متحرک را رسم کنید.

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

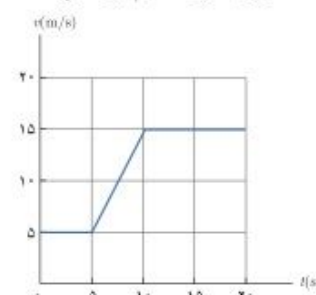
الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟
ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از $4m/s$ به سرعت $18km/h$ می رسد؟
پ) خودرویی پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب $2m/s^2$ شروع به حرکت می کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت $36km/h$ از آن سبقت می گیرد.

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

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

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

نشان می دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می کند.



الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه های $t=5s$ و $t=15s$ به دست آورید.
ب) شتاب متوسط در بازه زمانی $t_1=0s$ تا $t_2=20s$ را به دست آورید.
پ) در هر یک از بازه های زمانی $t_1=0s$ تا $t_2=10s$ و $t_1=10s$ تا $t_2=20s$ خودرو چقدر جابه جا شده است؟
ت) سرعت متوسط خودرو در بازه های $t_1=0s$ تا $t_2=10s$ و $t_1=10s$ تا $t_2=20s$ را به دست آورید.

۴-۱ حرکت سقوط آزاد

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

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

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

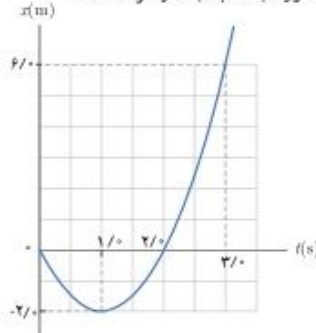
۳. سنگی از بام ساختمانی بدون سرعت اولیه و در شرایط خلأ به طرف زمین رها می شود.

الف) اگر سنگ در 2 ثانیه آخر حرکت خود 6 متر را طی کند، ارتفاع ساختمان چند متر است؟

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

فیزيک ۳

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



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

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

الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟
ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از $4m/s$ به سرعت $18km/h$ می رسد؟

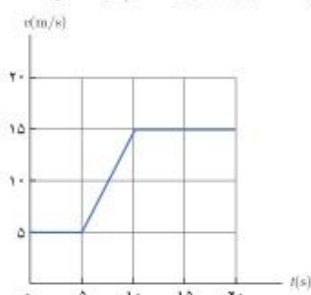
۲۱. خودرویی پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب $2m/s^2$ شروع به حرکت می کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت $36km/h$ از آن سبقت می گیرد.

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

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

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

نشان می دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می کند.



الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه های $t=5s$ و $t=15s$ به دست آورید.
ب) شتاب متوسط در بازه زمانی $t_1=0s$ تا $t_2=20s$ را به دست آورید.
پ) در هر یک از بازه های زمانی $t_1=0s$ تا $t_2=10s$ و $t_1=10s$ تا $t_2=20s$ خودرو چقدر جابه جا شده است؟
ت) سرعت متوسط خودرو در بازه های $t_1=0s$ تا $t_2=10s$ و $t_1=10s$ تا $t_2=20s$ را به دست آورید.

۴-۱ حرکت سقوط آزاد

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

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

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

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

الف) اگر سنگ در 2 ثانیه آخر حرکت خود 6 متر را طی کند، ارتفاع ساختمان چند متر است؟

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

۲

فصل



دینامیک و حرکت دایره‌ای



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

بخش‌ها

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

۲

فصل



دینامیک و حرکت دایره‌ای



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

بخش‌ها

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

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

نسبت وارون دارد.

توجه: در رابطه ۱-۲، m نیرو نیست. تمام نیروهای وارد بر یک جسم با هم جمع برداری می‌شوند تا نیروی خالص (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 (ma) است.

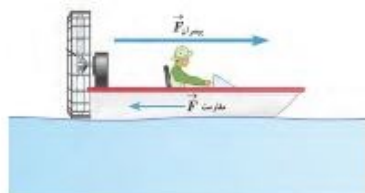
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m}$$

و یا:

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

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

مثال ۱-۲



نیروی موتور یک قایق موتوری که جرم آن با سرشیش 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 پشران در یک لحظه 1300 N باشد، نیروی مقاومت در آن لحظه چقدر است؟

ب) چقدر طول می‌کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به $15/0 \text{ m/s}$ برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه‌جا می‌شود؟

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

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

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

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

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

$$F_{مقاومت} = 500 \text{ N}$$

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

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

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

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.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

نسبت وارون دارد.

توجه: در رابطه ۱-۲، m نیرو نیست. تمام نیروهای وارد بر یک جسم با هم جمع برداری می‌شوند تا نیروی خالص (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 (ma) است.

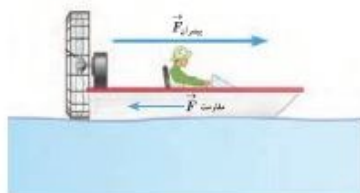
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m}$$

و یا:

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

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

مثال ۱-۲



نیروی موتور یک قایق موتوری که جرم آن با سرشیش 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 پشران 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 $15/0 \text{ m/s}$ برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه‌جا می‌شود؟

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

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

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

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

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

$$F_{مقاومت} = 500 \text{ N}$$

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

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

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

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.

مثال ۳-۲



دو شخص به جرم‌های $75/0 \text{ kg}$ و $50/0 \text{ kg}$ با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف رویه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی $100/0 \text{ N}$ 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 ($\vec{F}_{21}$). با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

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

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{12}}{m_2} = \frac{(100/0 \text{ N}) \hat{i}}{50/0 \text{ kg}} = (2/0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \hat{i} = (2/0 \cdot \text{m/s}^2) \hat{i}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{21}}{m_1} = \frac{-(100/0 \text{ N}) \hat{i}}{75/0 \text{ kg}} = -(1/33 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \hat{i} = -(1/33 \text{ m/s}^2) \hat{i}$$

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

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

۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

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

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

شتاب $\times$ جرم جسم = وزن جسم

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

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

(وزن جسم)

(۳-۲)



شکل ۲-۴: وزن یک جسم نیروی گرانشی ($\vec{W}$) وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی ($\vec{W}^*$) وارد می‌کند.

مثال ۳-۲



دو شخص به جرم‌های $75/0 \text{ kg}$ و $50/0 \text{ kg}$ با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف رویه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی $100/0 \text{ N}$ 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 ($\vec{F}_{21}$). با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم:

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

$$\vec{a}_2 = \frac{\vec{F}_{12}}{m_2} = \frac{(100/0 \text{ N}) \hat{i}}{50/0 \text{ kg}} = (2/0 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \hat{i} = (2/0 \cdot \text{m/s}^2) \hat{i}$$

$$\vec{a}_1 = \frac{\vec{F}_{21}}{m_1} = \frac{-(100/0 \text{ N}) \hat{i}}{75/0 \text{ kg}} = -(1/33 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg}}) \hat{i} = -(1/33 \text{ m/s}^2) \hat{i}$$

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

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

۲-۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

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

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

شتاب $\times$ جرم جسم = وزن جسم

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

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

(وزن جسم)

(۳-۲)



شکل ۲-۴: وزن یک جسم نیروی گرانشی ($\vec{W}$) وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی ($\vec{W}^*$) وارد می‌کند.

فیزیک ۳

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 به دست آورید.
ب) وزن یک جسم در سطح یک سیاره برابر با نیروی گرانشی است که از طرف آن سیاره بر جسم وارد می‌شود. وزن این قطعه طلا را در سطح ماه و مریخ به دست آورید و با هم مقایسه کنید. ($g_{\text{سیاره}} = 9.8\text{ N/kg}$ ، $g_{\text{ماه}} = 1.6\text{ N/kg}$ ، $g_{\text{مریخ}} = 3.7\text{ N/kg}$)

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

مثال ۴-۲

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 به دست آورید و حرکت آن را تحلیل کنید. برای سادگی g را 10 N/kg فرض کنید.

پاسخ: با توجه به شکل، نیروی وزن به طرف پایین و مقاومت هوا به طرف بالا است. اگر محور مختصات را رو به بالا انتخاب کنیم، برای محاسبه شتاب 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 50 m/s و برای قنطرات باران حدود 7 m/s است.

۴-۲. نیروی مقاومت شاره به معنای D (پس‌کش) است.

۴-۲. توجه کنید، نیروی مقاومت شاره با نیروی شناری که از سال دهم با آن آشنا هستید، متفاوت است.

فیزیک ۳

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 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 به دست آورید.
ب) وزن یک جسم در سطح یک سیاره برابر با نیروی گرانشی است که از طرف آن سیاره بر جسم وارد می‌شود. وزن این قطعه طلا را در سطح ماه و مریخ به دست آورید و با هم مقایسه کنید. ($g_{\text{سیاره}} = 9.8\text{ N/kg}$ ، $g_{\text{ماه}} = 1.6\text{ N/kg}$ ، $g_{\text{مریخ}} = 3.7\text{ N/kg}$)

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

مثال ۴-۲

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 به دست آورید و حرکت آن را تحلیل کنید. برای سادگی g را 10 N/kg فرض کنید.

پاسخ: با توجه به شکل، نیروی وزن به طرف پایین و مقاومت هوا به طرف بالا است. اگر محور مختصات را رو به بالا انتخاب کنیم، برای محاسبه شتاب 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

۴-۲. توجه کنید، نیروی مقاومت شاره با نیروی شناری که از سال دهم با آن آشنا هستید، متفاوت است.

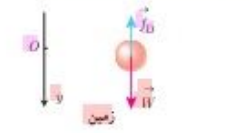
۴-۲. نیروی مقاومت شاره به معنای D (پس‌کش) است.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن هم‌اندازه 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 ۵-۲

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 برابر با حاصل ضرب جرم در شتاب است. نیروی مقاومت هوا را با f_D و وزن را با W نشان می‌دهیم و برای بررسی ساده‌تر حرکت گوی‌ها، جهت مثبت محور y را به‌طرف پایین انتخاب می‌کنیم:



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

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

طبق رابطه سرعت - جابه‌جایی می‌توانیم بنویسیم:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2a_2 h \Rightarrow v_2^2 - v_1^2 = 2a_2 h \Rightarrow v_2 = \sqrt{2a_2 h} \Rightarrow v_2 > v_1$$

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

تمرین ۲-۲

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

نیروی عمودی سطح: مطابق شکل ۷-۲، لبتایی را روی سطح افقی میزی در نظر بگیرید. بر لبتاب ساکن روی میز افقی چه نیروهایی وارد می‌شود؟ با توجه به اینکه نیروی وزن بر لبتاب 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 لبتاب وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، **نیروی عمودی سطح** (کنکاه) می‌گویند و آن را با F_N نشان می‌دهند.

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

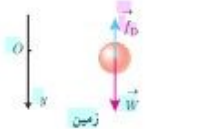
نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح اسفنجی یا یک تشک قرار دهیم تغییر شکل اسفنج یا تشک به‌خوبی دیده می‌شود. حتی یک زمین به‌ظاهر سفت و سخت نیز وقتی جسمی روی آن قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل مربوط به نیروهای بین مولکولی است که در فیزیک ۱ با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

شکل ۷-۲ نیروهای وارد بر لبتاب متوازن‌اند.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۵-۲

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



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

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

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

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

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

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

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

$$v_2 > v_1$$

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

تمرین ۲-۲

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

نیروی عمودی سطح: مطابق شکل ۷-۲، لبتایی را روی سطح افقی میزی در نظر بگیرید. بر لبتاب ساکن روی میز افقی چه نیروهایی وارد می‌شود؟ با توجه به اینکه نیروی وزن بر لبتاب 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 لبتاب وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، **نیروی عمودی سطح** (کنکاه) می‌گویند و آن را با F_N نشان می‌دهند.

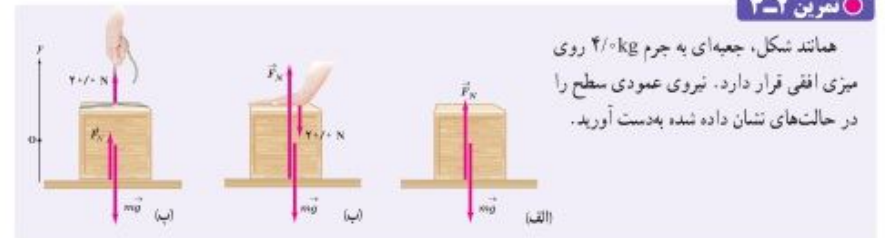
$$\vec{F}_{\text{net}} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N + \vec{W} = 0 \Rightarrow \vec{F}_N = -\vec{W} \Rightarrow F_N = W$$

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

شکل ۷-۲ نیروهای وارد بر لبتاب متوازن‌اند.

فیزيك ۳

تمرین ۳-۲



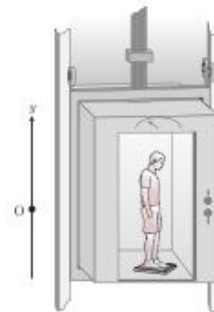
همانند شکل، جعبه‌ای به جرم $4/0 \text{ kg}$ روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده بدست آورید.

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



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

مثال ۶-۲



شخصی درون آسانسوری ساکن، روی یک ترازوی فنری ایستاده است. در این حالت ترازو عدد ۵۸۸ N را نشان می‌دهد. الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ ب) وقتی آسانسور شتاب رو به بالای $2/0 \text{ m/s}^2$ دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ب) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین $2/0 \text{ m/s}^2$ دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ت) اگر کابل آسانسور پاره شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ($g = 9/80 \text{ N/kg}$)

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

الف) در حالتی که آسانسور ساکن است می‌توانیم بنویسیم:

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

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

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

ب)

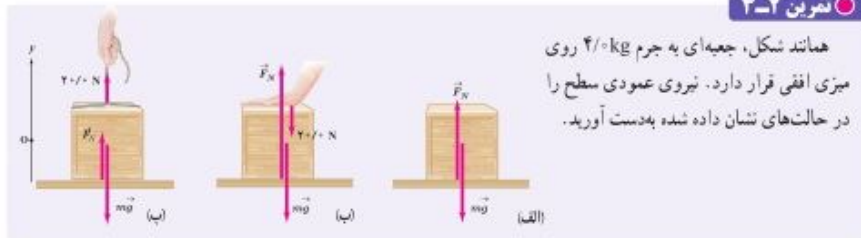
$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = (60/0 \text{ kg})(9/80 \text{ N/kg}) + (60/0 \text{ kg})(2/0 \text{ N/kg})$$

$$F_N = 700 \text{ N}$$

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

فیزيك ۳

تمرین ۳-۲



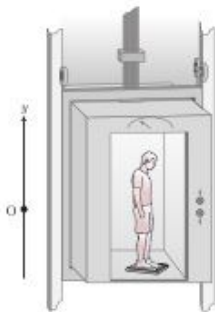
همانند شکل، جعبه‌ای به جرم $4/0 \text{ kg}$ روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده بدست آورید.

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



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

مثال ۶-۲



شخصی درون آسانسوری ساکن، روی یک ترازوی فنری ایستاده است. در این حالت ترازو عدد ۵۸۸ N را نشان می‌دهد. الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ ب) وقتی آسانسور شتاب رو به بالای $2/0 \text{ m/s}^2$ دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ب) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین $2/0 \text{ m/s}^2$ دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ت) اگر کابل آسانسور پاره شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ($g = 9/80 \text{ N/kg}$)

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

الف) در حالتی که آسانسور ساکن است می‌توانیم بنویسیم:

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

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

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

ب)

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

$$F_N = 700 \text{ N}$$

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

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

(ب)

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

جهت شتاب رو به پایین است.

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

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

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

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

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

پرسش ۲-۶

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

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

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

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

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

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

اگر یک خودروی ساکن بر سطح افقی خیابان را (که در وضعیت پارک است) هل دهید، و نتوانید آن را به حرکت درآورید، در این حالت نیرویی در خلاف جهت هل دادن شما بین لاستیک‌ها و سطح به وجود آمده است که با حرکت خودرو مخالفت می‌کند (شکل ۲-۹). این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک ایستایی** است و آن را با f_s نشان می‌دهند. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننده‌اش ترمز کرده و جرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. در این حالت نیز نیرویی در خلاف جهت حرکت از طرف سطح بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک جنبشی** است و آن را با f_k نشان می‌دهند.

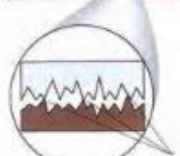
اصطکاک بین دو جسم به جنس سطح دو جسم، و زبری و نرمی آنها و... بستگی دارد؛ مثلاً اصطکاک بین کفش و سطح زمین به جنس زیره کفش و سطحی که روی آن حرکت می‌کنیم بستگی دارد.

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

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



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



شکل ۲-۱۰

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

(ب)

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

جهت شتاب رو به پایین است.

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

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

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

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

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

پرسش ۲-۶

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

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

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

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

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

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

اگر یک خودروی ساکن بر سطح افقی خیابان را (که در وضعیت پارک است) هل دهید، و نتوانید آن را به حرکت درآورید، در این حالت نیرویی در خلاف جهت هل دادن شما بین لاستیک‌ها و سطح به وجود آمده است که با حرکت خودرو مخالفت می‌کند (شکل ۲-۹). این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک ایستایی** است و آن را با f_s نشان می‌دهند. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننده‌اش ترمز کرده و جرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. در این حالت نیز نیرویی در خلاف جهت حرکت از طرف سطح بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک جنبشی** است و آن را با f_k نشان می‌دهند.

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

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

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



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



شکل ۲-۱۰

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

با استفاده از رابطه ۲-۶ داریم:

$$f_k = \mu_k F_N \Rightarrow f_k = 0.4 \times 0.735 \text{ N} \Rightarrow f_k = 294 \text{ N}$$

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

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

نمونه ۲-۵

در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین ۰/۶۰۰ و جسم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای به حرکت درآوردن جعبه چقدر است؟



شکل ۱۴-۲: فنرهای به کار رفته در جریخ‌های خودرو

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

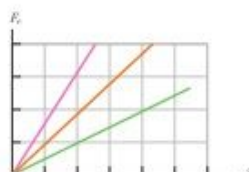
برای بیشتر فنرها با تقریب قابل قبولی، اندازه نیروی کشسانی فنر با اندازه تغییر طول آن (x) رابطه مستقیم دارد:

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

ضریب k در رابطه ۲-۷، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است و به اندازه، شکل و ساختار ماده‌ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد. در رابطه ۲-۷ نیرو بر حسب نیوتون (N)، x بر حسب متر (m) و k بر حسب نیوتون بر متر (N/m) است. معادله ۲-۷ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلیسی (۱۶۳۵-۱۷۰۳ م.) که این رابطه را کشف کرد، **قانون هوک** می‌نامند. برای یک فنر انعطاف‌پذیر، k عددی کوچک (حدود 100 N/m) و برای یک فنر سفت k عددی بزرگ (حدود 10000 N/m) است. نمودار نیروی کشسانی بر حسب تغییر طول برای سه فنر با k های متفاوت در شکل ۱۶-۲ رسم شده است.

فعالیت ۲-۴

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



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

۱- زیرووس «در نمودار نیروی کشسانی فنر (F_s) سرواز k elastic به معنی کشسان است.

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

با استفاده از رابطه ۲-۶ داریم:

$$f_k = \mu_k F_N \Rightarrow f_k = 0.4 \times 0.735 \text{ N} \Rightarrow f_k = 294 \text{ N}$$

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

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

نمونه ۲-۵

در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین ۰/۶۰۰ و جسم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای به حرکت درآوردن جعبه چقدر است؟



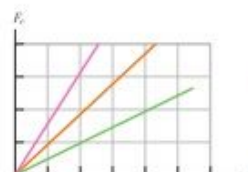
شکل ۱۴-۲: فنرهای به کار رفته در جریخ‌های خودرو

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

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

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

ضریب k در رابطه ۲-۷، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است و به اندازه، شکل و ساختار ماده‌ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد. در رابطه ۲-۷ نیرو بر حسب نیوتون (N)، x بر حسب متر (m) و k بر حسب نیوتون بر متر (N/m) است. معادله ۲-۷ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلیسی (۱۶۳۵-۱۷۰۳ م.) که این رابطه را کشف کرد، **قانون هوک** می‌نامند. برای یک فنر انعطاف‌پذیر، k عددی کوچک (حدود 100 N/m) و برای یک فنر سفت k عددی بزرگ (حدود 10000 N/m) است. نمودار نیروی کشسانی بر حسب تغییر طول برای سه فنر با k های متفاوت در شکل ۱۶-۲ رسم شده است.



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

۱- زیرووس «در نمودار نیروی کشسانی فنر (F_s) سرواز k elastic به معنی کشسان است.

فیزیک ۳

مثال ۸-۲

فتری به طول $L = 1/10 \text{ cm}$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنه 200 گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L = 12/10 \text{ cm}$ می‌رسد.
(الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟
(ب) اگر وزنه‌ای 300 گرمی را به فنر وصل کنیم، پس از رسیدن به تعادل طول فنر چند سانتی‌متر می‌شود؟
پاسخ: (الف) محور مختصات را همانند شکل انتخاب می‌کنیم و نیروهای وارد بر جسم را رسم و با استفاده از قانون دوم نیوتون مسئله را حل می‌کنیم.

$$F_c - W = ma \Rightarrow F_c - W = 0 \quad F_c = kx \Rightarrow kx = mg$$

$$k(12/10 \times 10^{-2} \text{ m} - 1/10 \times 10^{-2} \text{ m}) = (200 \times 10^{-3} \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg})$$

$$k = 9/8 \text{ N/m}$$

$$kx = mg \Rightarrow (9/8 \text{ N/m})x = (300 \times 10^{-3} \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg}) \Rightarrow$$

$$x = 0/3 \text{ m} = 3/10 \text{ cm}$$

$$x = L - L_0 \Rightarrow 3/10 \text{ cm} = L - 1/10 \text{ cm} \Rightarrow L = 13/10 \text{ cm}$$

(ب)

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



شکل ۱۷-۲: طناب جسم را با نیروی کشش T می‌کشد.

مثال ۹-۲

در شکل روبه‌رو، کارگری جعبه‌ای ساکنی را با طنابی افقی با نیروی ثابت افقی 310 N می‌کشد. اگر جرم جعبه 10 kg و ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی بین جعبه و سطح به ترتیب $0/30$ و $0/25$ باشد،
(الف) آیا جعبه شروع به حرکت می‌کند؟



فیزیک ۳

مثال ۸-۲

فتری به طول $L = 1/10 \text{ cm}$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنه 200 گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L = 12/10 \text{ cm}$ می‌رسد.
(الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟
(ب) اگر وزنه‌ای 300 گرمی را به فنر وصل کنیم، پس از رسیدن به تعادل طول فنر چند سانتی‌متر می‌شود؟
پاسخ: (الف) محور مختصات را همانند شکل انتخاب می‌کنیم و نیروهای وارد بر جسم را رسم و با استفاده از قانون دوم نیوتون مسئله را حل می‌کنیم.

$$F_c - W = ma \Rightarrow F_c - W = 0 \quad F_c = kx \Rightarrow kx = mg$$

$$k(12/10 \times 10^{-2} \text{ m} - 1/10 \times 10^{-2} \text{ m}) = (200 \times 10^{-3} \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg})$$

$$k = 9/8 \text{ N/m}$$

$$kx = mg \Rightarrow (9/8 \text{ N/m})x = (300 \times 10^{-3} \text{ kg})(9/8 \text{ N/kg}) \Rightarrow$$

$$x = 0/3 \text{ m} = 3/10 \text{ cm}$$

$$x = L - L_0 \Rightarrow 3/10 \text{ cm} = L - 1/10 \text{ cm} \Rightarrow L = 13/10 \text{ cm}$$

(ب)

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



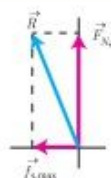
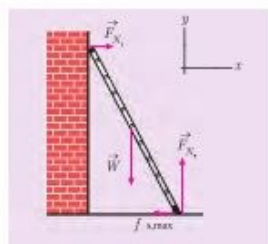
شکل ۱۷-۲: طناب جسم را با نیروی کشش T می‌کشد.

مثال ۹-۲

در شکل روبه‌رو، کارگری جعبه‌ای ساکنی را با طنابی افقی با نیروی ثابت افقی 310 N می‌کشد. اگر جرم جعبه 10 kg و ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی بین جعبه و سطح به ترتیب $0/30$ و $0/25$ باشد،
(الف) آیا جعبه شروع به حرکت می‌کند؟



فیزیک ۳



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

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

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

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

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

که بزرگی آن برابر است با:

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

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

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

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

۳-۲ نکته 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 $\vec{F}_{\text{net}}$ در بازه زمانی Δt از $\vec{v}_1$ به $\vec{v}_2$ برسد. در این صورت قانون دوم نیوتون به صورت زیر درمی‌آید:

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



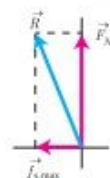
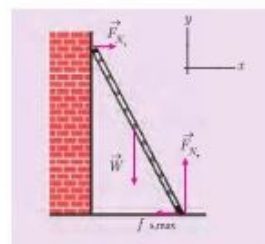
شکل ۳-۱۸ سرعت جسم تحت تأثیر نیروی خالص ثابت $\vec{F}_{\text{net}}$ از $\vec{v}_1$ به $\vec{v}_2$ می‌رسد.

با فرض ثابت بودن جرم جسم (m) می‌توانیم جرم را در کنار سرعت ($\vec{v}$) قرار دهیم.

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

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

فیزیک ۳



یک دستگاه مختصات انتخاب می‌کنیم.

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

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

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

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

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

که بزرگی آن برابر است با:

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

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

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

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

۳-۲ نکته 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 $\vec{F}_{\text{net}}$ در بازه زمانی Δt از $\vec{v}_1$ به $\vec{v}_2$ برسد. در این صورت قانون دوم نیوتون به صورت زیر درمی‌آید:

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



شکل ۳-۱۸ سرعت جسم تحت تأثیر نیروی خالص ثابت $\vec{F}_{\text{net}}$ از $\vec{v}_1$ به $\vec{v}_2$ می‌رسد.

با فرض ثابت بودن جرم جسم (m) می‌توانیم جرم را در کنار سرعت ($\vec{v}$) قرار دهیم.

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

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

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

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

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

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

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

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

تمرین ۲-۲

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

مثال ۱۱-۲

گلوله‌ای به جرم $۱۰^{-۲} \text{ kg}$ با سرعت $\vec{v} = (۵/\text{m/s}) \hat{i}$ در حال حرکت است. الف) تکانه گلوله را تعیین کنید. ب) انرژی جنبشی گلوله را به دست آورید.

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

$$\begin{aligned} \vec{p} = m\vec{v} &= (۱۰^{-۲} \times ۱۰^{-۲} \text{ kg})(۵/\text{m/s}) \hat{i} \\ &= (۵ \times ۱۰^{-۴} \text{ kg.m/s}) \hat{i} \Rightarrow p = ۵ \times ۱۰^{-۴} \text{ kg.m/s} \end{aligned}$$

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

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{(۵ \times ۱۰^{-۴} \text{ kg.m/s})^2}{(۲ \times ۱۰^{-۲} \times ۱۰^{-۲} \text{ kg})} = ۰/۱۲۵ \text{ J}$$

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

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

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

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

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

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

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

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

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

تمرین ۲-۲

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

مثال ۱۱-۲

گلوله‌ای به جرم $۱۰^{-۲} \text{ kg}$ با سرعت $\vec{v} = (۵/\text{m/s}) \hat{i}$ در حال حرکت است. الف) تکانه گلوله را تعیین کنید. ب) انرژی جنبشی گلوله را به دست آورید.

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

$$\begin{aligned} \vec{p} = m\vec{v} &= (۱۰^{-۲} \times ۱۰^{-۲} \text{ kg})(۵/\text{m/s}) \hat{i} \\ &= (۵ \times ۱۰^{-۴} \text{ kg.m/s}) \hat{i} \Rightarrow p = ۵ \times ۱۰^{-۴} \text{ kg.m/s} \end{aligned}$$

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

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{(۵ \times ۱۰^{-۴} \text{ kg.m/s})^2}{(۲ \times ۱۰^{-۲} \times ۱۰^{-۲} \text{ kg})} = ۰/۱۲۵ \text{ J}$$

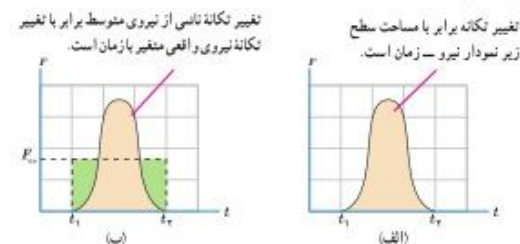
در شرایط واقعی نیروی وارد بر یک جسم به ندرت ثابت است. اگر نیرو ثابت نباشد، معادله‌های داده شده را فقط برای بازه‌های زمانی‌ای می‌توان به کار برد که بسیار کوچک باشند و بتوان نیرو را در این بازه‌ها تقریباً ثابت در نظر گرفت. برای بازه زمانی بزرگ به جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصله زمانی مورد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

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

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

فیزیک ۳

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



شکل ۱۹-۲ الف) نیروی خالص وارد بر یک جسم می‌تواند بر حسب زمان تغییر کند. ب) مقدار نیروی متوسط (F_{av}) (خط چین افقی) به گونه‌ای است که مساحت مستطیل $(F_{av} \Delta t)$ برابر با مساحت سطح زیر منحنی شکل الف باشد.

مثال ۱۲-۲



شکل دوباره صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم 1200 kg به دیواری برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب 54 km/h و 9 km/h باشد و تصادف 0.15 s طول بکشد.

الف) تغییر تکانه خودرو را پیدا کنید.

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

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

$$v_1 = +54 \text{ km/h} = +15 \text{ m/s} \text{ و } v_2 = -9 \text{ km/h} = -2.5 \text{ m/s} \quad \xrightarrow{\quad 0 \quad} x$$

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

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

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

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

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

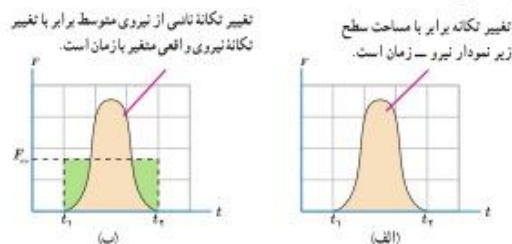
یعنی نیروی خالص متوسطی که از دیوار به خودرو وارد می‌شود در خلاف جهت محور x (یعنی به طرف چپ) است. توجه داریم اگر خودرو پس از برخورد، برنگردد نیروی متوسط وارد بر خودرو کوچک‌تر از مقداری است که اکنون به دست آوردیم.

۴-۲ حرکت دایره‌ای یکنواخت

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

فیزیک ۳

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



شکل ۱۹-۲ الف) نیروی خالص وارد بر یک جسم می‌تواند بر حسب زمان تغییر کند. ب) مقدار نیروی متوسط (F_{av}) (خط چین افقی) به گونه‌ای است که مساحت مستطیل $(F_{av} \Delta t)$ برابر با مساحت سطح زیر منحنی شکل الف باشد.

مثال ۱۲-۲



شکل دوباره صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم 1200 kg به دیواری برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب 54 km/h و 9 km/h باشد و تصادف 0.15 s طول بکشد.

الف) تغییر تکانه خودرو را پیدا کنید.

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

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

$$v_1 = +54 \text{ km/h} = +15 \text{ m/s} \text{ و } v_2 = -9 \text{ km/h} = -2.5 \text{ m/s} \quad \xrightarrow{\quad 0 \quad} x$$

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

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

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

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

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

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

۴-۲ حرکت دایره‌ای یکنواخت

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

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۱۹-۲

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

پاسخ: برای محاسبه نیروی که دو کره همگن به هم وارد می‌کنند می‌توانیم فرض کنیم همه جرم‌های دو کره در مرکز آنها قرار دارد، بنابراین کره‌ها را به صورت ذراتی در نظر می‌گیریم که همان جرم کره‌ها را داشته باشند. به کمک رابطه ۱۵-۲، نیروی گرانشی را که دو کره به یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

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

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

مثال ۲۰-۲



ماهواره‌ها در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار تقریباً دایره‌ای به دور زمین می‌چرخند. اگر جرم ماهواره 2000 kg و فاصله آن از سطح زمین 2600 km باشد، کمیت‌های زیر را محاسبه کنید:

(الف) نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین

(ب) تندی مداری ماهواره

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

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

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

$$F = G \frac{M_e m}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(2000 \text{ kg})}{(9.000 \times 10^6 \text{ m})^2} = 9.85 \text{ N}$$

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

$$F_{\text{net}} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow 9.85 \text{ N} = (2000 \text{ kg}) \frac{v^2}{9.000 \times 10^6 \text{ m}} \Rightarrow v = 6.66 \times 10^3 \text{ m/s}$$

(پ) با استفاده از رابطه بین سرعت و دوره یعنی رابطه ۱۴-۲، می‌توانیم دوره را محاسبه کنیم:

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

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

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

مثال ۱۹-۲

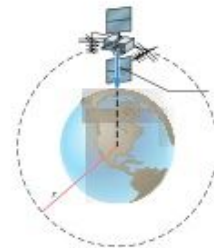
دو کره همگن به جرم‌های 800 kg و 1200 kg را در نظر بگیرید که فاصله مرکز آنها از یکدیگر 100 m است. نیروی گرانشی را که این دو کره بر یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه کنید.

پاسخ: برای محاسبه نیروی که دو کره همگن به هم وارد می‌کنند می‌توانیم فرض کنیم همه جرم‌های دو کره در مرکز آنها قرار دارد، بنابراین کره‌ها را به صورت ذراتی در نظر می‌گیریم که همان جرم کره‌ها را داشته باشند. به کمک رابطه ۱۵-۲، نیروی گرانشی را که دو کره به یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

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

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

مثال ۲۰-۲



ماهواره‌ها در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار تقریباً دایره‌ای به دور زمین می‌چرخند. اگر جرم ماهواره 2000 kg و فاصله آن از سطح زمین 2600 km باشد، کمیت‌های زیر را محاسبه کنید:

(الف) نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین

(ب) تندی مداری ماهواره

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

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

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

$$F = G \frac{M_e m}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2) \frac{(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(2000 \text{ kg})}{(9.000 \times 10^6 \text{ m})^2} = 9.85 \text{ N}$$

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

$$F_{\text{net}} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow 9.85 \text{ N} = (2000 \text{ kg}) \frac{v^2}{9.000 \times 10^6 \text{ m}} \Rightarrow v = 6.66 \times 10^3 \text{ m/s}$$

(پ) با استفاده از رابطه بین سرعت و دوره یعنی رابطه ۱۴-۲، می‌توانیم دوره را محاسبه کنیم:

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

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

پوش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

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

۱. سیمی را در نظر بگیرید که به شاخه درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.

الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیم را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. (ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. دانش‌آموزی به جرم 50 kg روی یک ترازوی 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.

۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 90% کیلوگرمی را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.



الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟

ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح چقدر است؟
ب) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنه 4 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 14 cm می‌شود، و وقتی وزنه 5 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 15 cm می‌شود.



الف) ثابت فنر چقدر است؟

ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

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

ب) گشتی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.

ب) قایقرانی در حال پارو زدن است.

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

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

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

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

الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟

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

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

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

۸. 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؟

پوش‌ها و مسئله‌های فصل ۲

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

۱. سیمی را در نظر بگیرید که به شاخه درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.

الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیم را قبل و بعد از جدا شدن از درخت نشان دهید. (ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. دانش‌آموزی به جرم 50 kg روی یک ترازوی 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.

۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی 200 N جسم 90% کیلوگرمی را هل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی 300 N جسم را هل می‌دهد، جسم در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.



الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟

ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح چقدر است؟
ب) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی 200 N جسم را هل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم 0.2 باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟



۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنه 4 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 14 cm می‌شود، و وقتی وزنه 5 kg را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر 15 cm می‌شود.

الف) ثابت فنر چقدر است؟ (ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

۵. در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟

الف) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.

ب) گشتی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.

ب) قایقرانی در حال پارو زدن است.

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

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

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

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

الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟

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

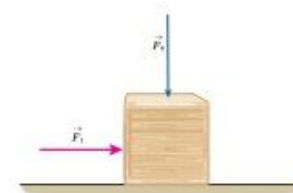
ب) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟
جرم خودرو را 1200 kg فرض کنید.

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

۸. 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؟

فیزيك ۳۳

۹. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی 200 N بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم F_2 که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟



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

۱۰. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن 50 kg است، شتاب 2 m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک 0.20 به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.
پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا حرکت کند.
ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین حرکت کند.
۱۱. قطعه‌چوبی را با سرعت افقی 10 m/s روی سطحی افقی برتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.20 است.

الف) چوب پس از بیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟
ب) اگر از یک قطعه‌چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه‌چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت برتاب شود، مسافت پیموده شده آن چند برابر می‌شود؟

۱۲. وزنه‌ای به جرم 2 kg را به انتهای فنری به طول 12 cm که ثابت آن 20 N/cm است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های زیر محاسبه کنید.

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

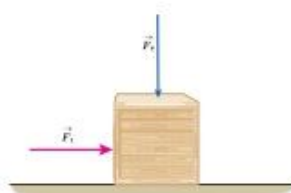
۱۳. برای یک راننده دانشن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد کل مسافت توقف، دو قسمت دارد: مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظه دیدن مانع تا ترمز گرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمز گرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).



الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
ب) زمان واکنش راننده‌ای 0.6 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18 m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.
پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 5 s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
ت) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را 1500 kg فرض کنید.
۱۴. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 220 N و

فیزيك ۳۳

۸. در شکل زیر، نیروی F_1 به بزرگی 200 N بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم F_2 که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟



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

۹. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن 50 kg است، شتاب 2 m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیروی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.
ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک 0.20 به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.
پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.
ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.
۱۰. قطعه‌چوبی را با سرعت افقی 10 m/s روی سطحی افقی برتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح 0.20 است.

الف) چوب پس از بیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟
ب) اگر از یک قطعه‌چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه‌چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت برتاب شود، مسافت پیموده شده آن چند برابر می‌شود؟

۱۱. وزنه‌ای به جرم 2 kg را به انتهای فنری به طول 12 cm که ثابت آن 20 N/cm است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های زیر محاسبه کنید.

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

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



الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.
ب) زمان واکنش راننده‌ای 0.6 s است. در طی این زمان، خودرو مسافت 18 m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازه آن را حساب کنید.
پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از 5 s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.
ت) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را 1500 kg فرض کنید.
۱۳. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم 1500 kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری 220 N و

فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

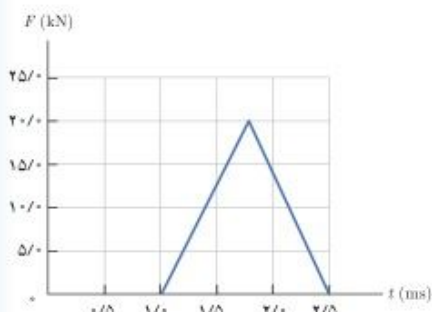
الف) علت این پدیده‌ها را توضیح دهید. ب) نقش کمربند ایمنی و کیسه هوا در کم شدن آسیب‌ها در تصادف‌ها را بیان کنید.

۱۷. تویی به جرم 280 kg با تندی 150 m/s به طور افقی به بازیکنی نزدیک می‌شود. بازیکن با مشت به توپ ضربه می‌زند و باعث می‌شود توپ با تندی 220 m/s در جهت مخالف برگردد.

الف) اندازه تغییر تکانه توپ را محاسبه کنید.

ب) اگر مشت بازیکن 0.06 s با توپ در تماس باشد، اندازه نیروی متوسط وارد بر مشت بازیکن از طرف توپ را به دست آورید.

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



۲-۴ حرکت دایره‌ای یکنواخت

۱۸. برده‌های یک بالگرد در هر دقیقه، 1000 دور می‌چرخند. طول برده‌ها را 4 m فرض کنید و کمیت‌های زیر را برای برده‌ها محاسبه کنید.

الف) دوره تناوب برده‌ها

ب) تندی در وسط و نوک برده‌ها

ب) شتاب مرکز گرا در وسط و نوک برده‌ها

۱۹. حداقل ضربه اصطکاک ایستایی بین جرخ‌های خودرو و سطح جاده جقدر باشد تا خودرو بتواند با تندی 54 km/h پیچ افقی مسطوحی را که شعاع آن 50 m است، دور بزند؟

280 N است.



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

ب) اگر خودرو با شتاب ثابت 20 m/s^2 به طرف راست کشیده شود، نیروی کشش طناب جقدر است؟

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

الف) نیروهای وارد بر کتاب را رسم کنید.

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

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

۲-۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

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



فصل ۲: دینامیک و حرکت دایره‌ای

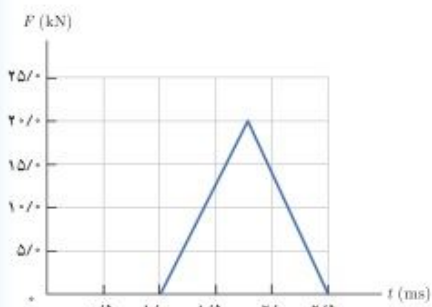
الف) علت این پدیده‌ها را توضیح دهید. ب) نقش کمربند ایمنی و کیسه هوا در کم شدن آسیب‌ها در تصادف‌ها را بیان کنید.

۱۷. تویی به جرم 280 kg با تندی 150 m/s به طور افقی به بازیکنی نزدیک می‌شود. بازیکن با مشت به توپ ضربه می‌زند و باعث می‌شود توپ با تندی 220 m/s در جهت مخالف برگردد.

الف) اندازه تغییر تکانه توپ را محاسبه کنید.

ب) اگر مشت بازیکن 0.06 s با توپ در تماس باشد، اندازه نیروی متوسط وارد بر مشت بازیکن از طرف توپ را به دست آورید.

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



۲-۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

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

۱۸. برده‌های یک بالگرد در هر دقیقه، 1000 دور می‌چرخند. طول برده‌ها را 4 m فرض کنید و کمیت‌های زیر را برای برده‌ها محاسبه کنید.

الف) دوره تناوب برده‌ها

ب) تندی در وسط و نوک برده‌ها

ب) شتاب مرکز گرا در وسط و نوک برده‌ها

۱۹. حداقل ضربه اصطکاک ایستایی بین جرخ‌های خودرو و سطح جاده جقدر باشد تا خودرو بتواند با تندی 54 km/h پیچ افقی مسطوحی را که شعاع آن 50 m است، دور بزند؟

280 N است.



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

ب) اگر خودرو با شتاب ثابت 20 m/s^2 به طرف راست کشیده شود، نیروی کشش طناب جقدر است؟

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

الف) نیروهای وارد بر کتاب را رسم کنید.

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

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



فیزیک ۳

۲-۵ نیروی گرانشی

۱۱۴. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟
 ب) دو جسم در فاصله 2.0×10^8 m از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک 1.0×10^{-4} N جذب می کنند. اگر جرم یکی از اجسام 5.0×10^3 kg باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟
۱۱۵. ماهواره ای به جرم 600 kg در مداری دایره ای به ارتفاع 2800 کیلومتر از سطح زمین، به دور آن می چرخد.
 الف) نیروی گرانشی وارد بر ماهواره
 ب) شتاب ماهواره
 ب) تندی ماهواره
 ت) دوره تناوب ماهواره را در این ارتفاع به دست آورید.
۱۱۶. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می رسد؟
 ب) اگر جرم ماهواره ای 250 kg باشد، وزن آن در ارتفاع 36000 کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟

۶۰

فیزیک ۳

۲-۵ نیروی گرانشی

۱۱۴. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟
 ب) دو جسم در فاصله 2.0×10^8 m از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک 1.0×10^{-4} N جذب می کنند. اگر جرم یکی از اجسام 5.0×10^3 kg باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟
۱۱۵. ماهواره ای به جرم 600 kg در مداری دایره ای به ارتفاع 2800 کیلومتر از سطح زمین، به دور آن می چرخد.
 الف) نیروی گرانشی وارد بر ماهواره
 ب) شتاب ماهواره
 ب) تندی ماهواره
 ت) دوره تناوب ماهواره را در این ارتفاع به دست آورید.
۱۱۶. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می رسد؟
 ب) اگر جرم ماهواره ای 250 kg باشد، وزن آن در ارتفاع 36000 کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟

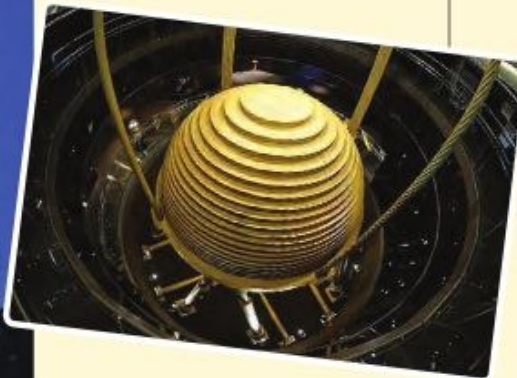
۶۰

۳

فصل



نوسان و موج



بخش‌ها

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

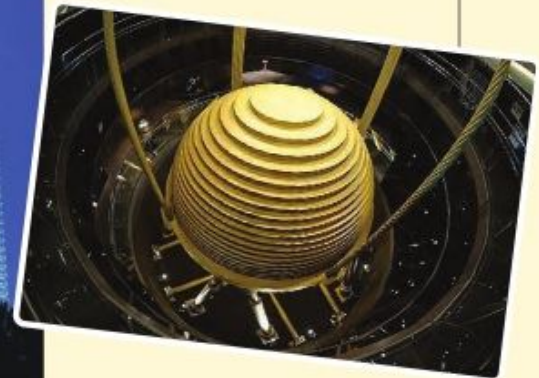
- ۱-۳ نوسان دوره‌ای
- ۲-۳ حرکت هماهنگ ساده
- ۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده
- ۴-۳ تشدید
- ۵-۳ موج و انواع آن
- ۶-۳ مشخصه‌های موج

۳

فصل



نوسان و موج



بخش‌ها

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

- ۱-۳ نوسان دوره‌ای
- ۲-۳ حرکت هماهنگ ساده
- ۳-۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده
- ۴-۳ تشدید
- ۵-۳ موج و انواع آن
- ۶-۳ مشخصه‌های موج

فیزیک ۳

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

۱-۳ نوسان دوره‌ای

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



شکل ۱-۳: نمونه‌ای از نمودار الکترو قلب نگاره (انوار قلب) یک شخص

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

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

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

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

پوشش ۱-۳

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

۱- Electrocardiogram (ECG)

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

فیزیک ۳

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

۱-۳ نوسان دوره‌ای

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



شکل ۱-۳: نمونه‌ای از نمودار الکترو قلب نگاره (انوار قلب) یک شخص

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

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

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

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

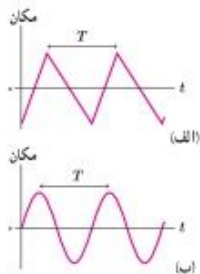
پوشش ۱-۳

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

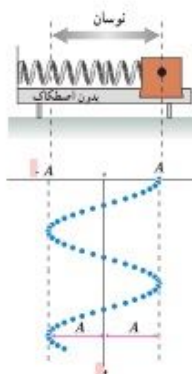
۱- Electrocardiogram (ECG)

فصل ۳: نوسان و موج

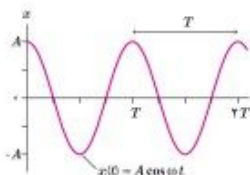
۲-۳ حرکت هماهنگ ساده



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



شکل ۳-۳: سامانه جرم و فنر، نمونه منتهی از یک حرکت هماهنگ ساده است.



شکل ۳-۴: نمودار مکان - زمان برای حرکت هماهنگ ساده

در بخش پیش با نمونه‌ای 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)^۲ 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 ۳-۳، یک جسم متصل به فنری را نشان می‌دهد که روی سطح افقی بدون اصطکاک قرار گرفته است. اگر جسم به اندازه چند سانتی متر 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، پیشینه فاصله جسم از نقطه تعادل است. توجه کنید که دامنه، فاصله بین دو انتهای مسیر نیست.

همان‌طور که دیدیم، در حرکت هماهنگ ساده نمودار مکان - زمان، نموداری سینوسی است. یعنی مکان (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 پیشینه خود، یعنی $x = +A$ ، باشد. بنابراین مکان $x(t)$ نوسانگر را می‌توان چنین نوشت:

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

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

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

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

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

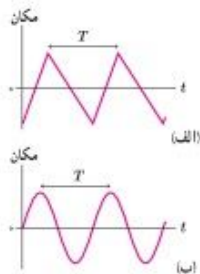
۱- Sinusoidal. به طور عمومی به همه تابع‌های سینوسی و کسینوسی، تابع سینوسی می‌گویند.

۲- Simple Harmonic Motion ۳- Turning Points

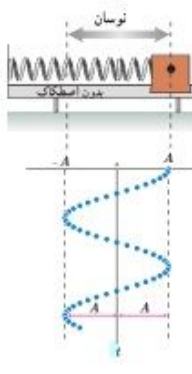
۴- بررسی روابط سرعت - زمان و سرعت - مکان در حرکت هماهنگ ساده، خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید در ارزشیابی این درس مورد پوشش قرار گیرد.

فصل ۳: نوسان و موج

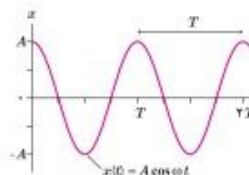
۲-۳ حرکت هماهنگ ساده



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



شکل ۳-۳: سامانه جرم و فنر، نمونه منتهی از یک حرکت هماهنگ ساده است.



شکل ۳-۴: نمودار مکان - زمان برای حرکت هماهنگ ساده

در بخش پیش با نمونه‌ای 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)^۲ 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 ۳-۳، یک جسم متصل به فنری را نشان می‌دهد که روی سطح افقی بدون اصطکاک قرار گرفته است. اگر جسم به اندازه چند سانتی متر 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، پیشینه فاصله جسم از نقطه تعادل است. توجه کنید که دامنه، فاصله بین دو انتهای مسیر نیست.

همان‌طور که دیدیم، در حرکت هماهنگ ساده نمودار مکان - زمان، نموداری سینوسی است. یعنی مکان (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 پیشینه خود، یعنی $x = +A$ ، باشد. بنابراین مکان $x(t)$ نوسانگر را می‌توان چنین نوشت:

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

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

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

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

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

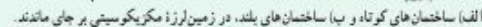
۱- Sinusoidal. به طور عمومی به همه تابع‌های سینوسی و کسینوسی، تابع سینوسی می‌گویند.

۲- Simple Harmonic Motion ۳- Turning Points

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

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان اند، عبارت‌اند از، $\frac{\pi}{4}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{8}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{16}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{32}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{64}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{128}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{256}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{512}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1024}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2048}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4096}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{8192}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{16384}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{32768}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{65536}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{131072}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{262144}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{524288}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1048576}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2097152}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4194304}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{8388608}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{16777216}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{33554432}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{67108864}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{134217728}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{268435456}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{536870912}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1073741824}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2147483648}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4294967296}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{8589934592}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{17179869184}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{34359738368}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{68719476736}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{137438953472}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{274877906944}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{549755813888}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1099511627776}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2199023255552}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4398046511104}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{8796093022208}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{17592186044416}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{35184372088832}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{70368744177664}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{140737488355328}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{281474976710656}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{562949953421312}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1125899906842624}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2251799813685248}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4503599627370496}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{9007199254740992}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{18014398509481984}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{36028797018963968}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{72057594037927936}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{144115188075855872}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{288230376151711744}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{576460752303423488}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1152921504606846976}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2305843009213693952}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4611686018427387904}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{9223372036854775808}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{18446744073709551616}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{36893488147419103232}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{73786976294838206464}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{147573952589676412928}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{295147905179352825856}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{590295810358705651712}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1180591620717411303424}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2361183241434822606848}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4722366482869645213696}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{9444732965739290427392}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{18889465931478580854784}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{37778931862957161709568}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{75557863725914323419136}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{151115727451828646838272}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{302231454903657293676544}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{604462909807314587353088}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1208925819614629174706176}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2417851639229258349412352}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4835703278458516698824704}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{9671406556917033397649408}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{19342813113834066795298816}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{38685626227668133590597632}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{77371252455336267181195264}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{154742504910672534362390528}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{309485009821345068724781056}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{618970019642690137449562112}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1237940039285380274899124224}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2475880078570760549798248448}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4951760157141521099596496896}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{9903520314283042199192993792}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{19807040628566084398385987584}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{39614081257132168796771975168}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{79228162514264337593543950336}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{158456325028528675187087900672}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{316912650057057350374175801344}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{633825300114114700748351602688}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1267650600228229401496703205376}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2535301200456458802993406410752}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{5070602400912917605986812821504}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{10141204801825835211973625643008}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{20282409603651670423947251286016}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{40564819207303340847894502572032}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{81129638414606681695789005144064}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{162259276829213363391578010288128}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{324518553658426726783156020576256}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{649037107316853453566312041152512}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1298074214633706907132624082305024}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2596148429267413814265248164610048}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{5192296858534827628530496329220096}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{10384593717069655257060992658440192}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{20769187434139310514121985316880384}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{41538374868278621028243970633760768}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{83076749736557242056487941267521536}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{166153499473114484112975882535043072}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{332306998946228968225951765070086144}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{664613997892457936451903530140172288}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{1329227995784915872903807060280344576}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{26584559915698317458076141205606$

در پی زمین لرزه عظیمی (به بزرگی ۸/۱ در مقیاس ریشتر) که در ساحل غربی مکزیک در سال ۱۹۸۵ اتفاق افتاد ساختمان‌های نیمه بلند فرو ریختند، ولی ساختمان‌های کوتاه‌تر و بلندتر پابرجا ماندند. علت این پدیده را توضیح دهید.



مثال ۱۳۰ - با برتاب سنگ در آب، فرو رفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.



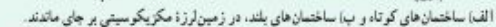
اگر مانند شکل ۱۱-۳ یک سر فنر بلند کشیده شده‌ای را به سرعت به چپ و راست تکان دهی، موجی مطابق شکل در طول فنر منتشر می‌شود که به آن **تپ** می‌گویند. اگر سر آزاد فنر را مانند شکل ۱۲-۳ رو به بالا حرکت دهی، بخش مجاور آن نیز از طریق کشش بین این دو بخش شروع به بالا رفتن می‌کند. وقتی بخش مجاور به بالا حرکت کند، این بخش نیز به نوبه خود شروع به بالا کشیدن بخش بعدی می‌کند و این روند ادامه می‌یابد. به همین ترتیب، پایین کشیدن سر آزاد

۱۔ یہ این فٹر، فٹر اسلینکی (Slinky) میں گوند،

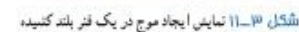
فصل ۳۰: نوسان و جرم

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان اند، عبارت‌اند از، $\frac{\pi}{8}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{6}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{4}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{2}\text{m}$ ، $\frac{\pi}{3}\text{m}$ و $\frac{\pi}{5}\text{m}$. فرض کنید میله دستخوش نوسان‌هایی افقی با بسامد زاویه‌ای در گستره $\frac{2\pi}{3}\text{rad/s}$ تا $\frac{4\pi}{3}\text{rad/s}$ بشود. کدام آونگ‌ها با دامنه بزرگ‌تری به نوسان درمی‌آیند؟ (توجه کنید گرچه تشدید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنه نوسان در نزدیک این بسامد همچنان بزرگ است).

در پی زمین لرزه عظیمی (به بزرگی ۸/۱ در مقیاس ریشتر) که در ساحل غربی مکزیک در سال ۱۹۸۵ اتفاق افتاد ساختمان‌های نیمه‌بلند فرو ریختند، ولی ساختمان‌های کوتاه‌تر و بلندتر پایرجا ماندند. علت این پدیده را توضیح دهید.



شکل ۱۳-۱: با پرتاب سنگ در آب، فرو رفتگی‌ها
برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش
می‌شوند.



اگر مانند شکل ۱۱-۳ یک سر فنر بلند کشیده شده‌ای را به سرعت به چپ و راست تکان دهی، موجی مطابق شکل در طول فنر منتشر می‌شود که به آن **تپ** می‌گویند. اگر سر آزاد فنر را مانند شکل ۱۲-۳ رو به بالا حرکت دهی، بخش مجاور آن نیز از طریق کشش بین این دو بخش شروع به بالا رفتن می‌کند. وقتی بخش مجاور به بالا حرکت کند، این بخش نیز به نوبه خود شروع به بالا کشیدن بخش بعدی می‌کند و این روند ادامه می‌یابد. به همین ترتیب، پایین کشیدن سر آزاد

۱۔ یہ این فیر، فیر اسلینکی (Slinky) میں گوند۔

فصل ۱۳: نوسان و موج



شکل ۱۳-۱۶ تشکیل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تست موج

روی سطح آب، به‌وضوح در سایه تشکیل شده بر ورقه کاغذ دیده می‌شود. اگر مانند شکل ۱۳-۱۵، تیغه‌ای را بر سطح آب به نوسان درآوریم، موجی تخت بر سطح آب تشکیل می‌شود و اگر به جای تیغه از یک گوی کوچک استفاده کنیم به یک موج دایره‌ای می‌رسیم که از نقطه تماس با سطح آب در تمام جهت‌ها حرکت می‌کند (شکل ۱۳-۱۶). در هر دو حالت، به هر یک از برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های ایجادشده روی سطح آب، یک **جبهه موج** می‌گویند. به برآمدگی‌ها، **قله** (ستیف) و به فرورفتگی‌ها **دژه** (پاستیف) گفته می‌شود. فاصله بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، **طول موج** نامیده می‌شود و آن را با λ نشان می‌دهند (شکل ۱۳-۱۷). طول موج λ برابر با مسافتی است که موج در مدت دوره تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.



شکل ۱۳-۱۷ (الف) طرحی از تشکیل جبهه‌های موج تخت بر سطح آب یک تست موج.
(ب) جبهه‌های موج، در روشی مناسب برای نمایش یک موج پیش‌رونده هستند. در رسم جبهه‌های موج معمولاً جبهه‌های مربوط به قله‌ها را رسم می‌کنند.

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

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

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

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

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

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

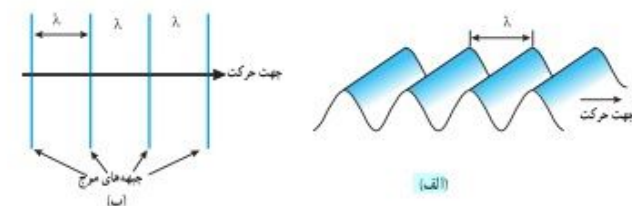
تجربه و محاسبات نظری نشان می‌دهد که تندی انتشار موج به جنس و ویژگی‌های محیط انتشار بستگی دارد.

فصل ۱۳: نوسان و موج



شکل ۱۳-۱۶ تشکیل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تست موج

روی سطح آب، به‌وضوح در سایه تشکیل شده بر ورقه کاغذ دیده می‌شود. اگر مانند شکل ۱۳-۱۵، تیغه‌ای را بر سطح آب به نوسان درآوریم، موجی تخت بر سطح آب تشکیل می‌شود و اگر به جای تیغه از یک گوی کوچک استفاده کنیم به یک موج دایره‌ای می‌رسیم که از نقطه تماس با سطح آب در تمام جهت‌ها حرکت می‌کند (شکل ۱۳-۱۶). در هر دو حالت، به هر یک از برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های ایجادشده روی سطح آب، یک **جبهه موج** می‌گویند. به برآمدگی‌ها، **قله** (ستیف) و به فرورفتگی‌ها **دژه** (پاستیف) گفته می‌شود. فاصله بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، **طول موج** نامیده می‌شود و آن را با λ نشان می‌دهند (شکل ۱۳-۱۷). طول موج λ برابر با مسافتی است که موج در مدت دوره تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.



شکل ۱۳-۱۷ (الف) طرحی از تشکیل جبهه‌های موج تخت بر سطح آب یک تست موج.
(ب) جبهه‌های موج، در روشی مناسب برای نمایش یک موج پیش‌رونده هستند. در رسم جبهه‌های موج معمولاً جبهه‌های مربوط به قله‌ها را رسم می‌کنند.

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

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

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

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

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

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

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

مثال ۵-۳

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب نشست 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 $5/0$ cm و اگر در تنشی به عمق $3/5$ cm نوسان کند، این فاصله $6/0$ cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این نشست در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ: فاصله دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان طور 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 $\lambda_1 = 5/0$ m و $T = 1/10$ s در رابطه ۹-۳ خواهیم داشت:

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

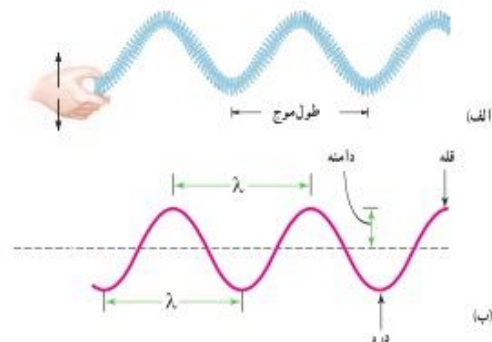
و با قرار دادن $\lambda_2 = 6/0$ m و $T = 1/10$ s در رابطه ۹-۳ خواهیم داشت:

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



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

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

مثال ۵-۳

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب نشست 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 $5/0$ cm و اگر در تنشی به عمق $3/5$ cm نوسان کند، این فاصله $6/0$ cm می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این نشست در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ: فاصله دو برآمدگی مجاور، طول موج است و همان طور 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 $\lambda_1 = 5/0$ m و $T = 1/10$ s در رابطه ۹-۳ خواهیم داشت:

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

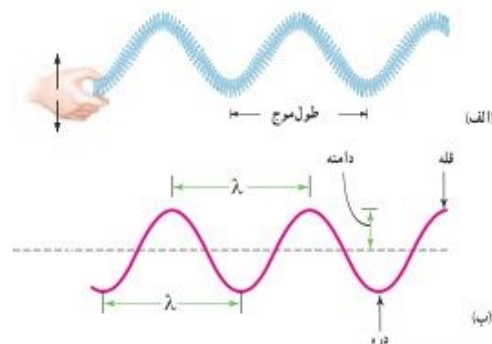
و با قرار دادن $\lambda_2 = 6/0$ m و $T = 1/10$ s در رابطه ۹-۳ خواهیم داشت:

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



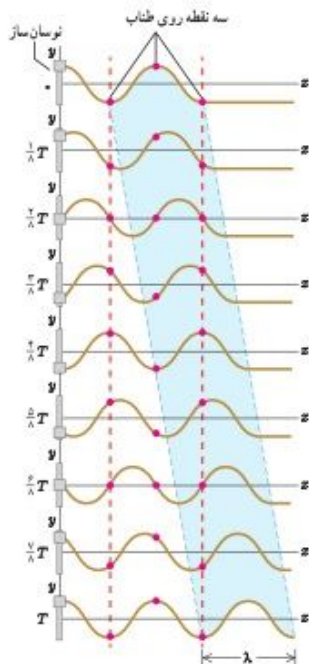
از اینجا درمی‌یابیم که تندی انتشار موج سطحی روی آب‌های کم عمق، به عمق آب که یکی از ویژگی‌های محیط انتشار موج است بستگی دارد.

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

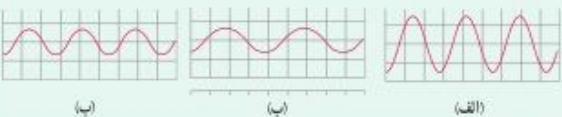
فصل ۱۳: نوسان و موج



شکل ۱۹-۳: نوسان در یک نقطه از یک موج عرضی منتشر شده در یک تار کشیده شده

پرسش ۴-۳

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



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

همان‌طور که پیش از این گفتیم تندی انتشار موج به جنس و ویژگی‌های محیط انتشار بستگی دارد. برای مثال، تندی انتشار موج عرضی در یک فنر، تار یا ریسمان کشیده به نیروی کشش (F) و جگالی خطی جرم ($\mu = m/L$) بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

مثال ۶-۳



فتری به جرم 0.6 kg و طول 4.0 m را با نیروی 1.2 N می‌کشیم. الف) تندی انتشار موج در این فنر چقدر است؟ ب) سر آزاد فنر را با چه پسمادی تکان دهیم تا طول موج ایجاد شده در فنر 1.0 m شود؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۱۰-۳ تندی انتشار موج را به دست می‌آوریم. در اینجا $F = 1.2 \text{ N}$ است و جگالی خطی جرم برابر است با:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0.6 \text{ kg}}{4.0 \text{ m}} = 0.15 \text{ kg/m}$$

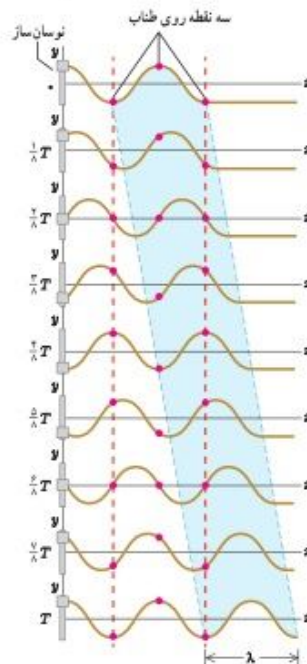
بنابراین تندی انتشار v چنین می‌شود:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{1.2 \text{ N}}{0.15 \text{ kg/m}}} = 2.83 \text{ m/s} \approx 2.8 \text{ m/s}$$

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

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2.83 \text{ m/s}}{1.0 \text{ m}} = 2.83 \text{ Hz} \approx 2.8 \text{ Hz}$$

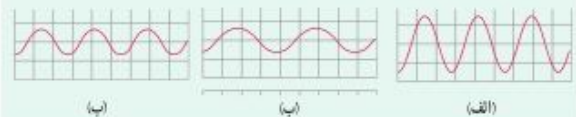
فصل ۱۳: نوسان و موج



شکل ۱۹-۳: نوسان در یک نقطه از یک موج عرضی منتشر شده در یک تار کشیده شده

پرسش ۴-۳

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



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

همان‌طور که پیش از این گفتیم تندی انتشار موج به جنس و ویژگی‌های محیط انتشار بستگی دارد. برای مثال، تندی انتشار موج عرضی در یک فنر، تار یا ریسمان کشیده به نیروی کشش (F) و جگالی خطی جرم ($\mu = m/L$) بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

مثال ۶-۳



فتری به جرم 0.6 kg و طول 4.0 m را با نیروی 1.2 N می‌کشیم. الف) تندی انتشار موج در این فنر چقدر است؟ ب) سر آزاد فنر را با چه پسمادی تکان دهیم تا طول موج ایجاد شده در فنر 1.0 m شود؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطه ۱۰-۳ تندی انتشار موج را به دست می‌آوریم. در اینجا $F = 1.2 \text{ N}$ است و جگالی خطی جرم برابر است با:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0.6 \text{ kg}}{4.0 \text{ m}} = 0.15 \text{ kg/m}$$

بنابراین تندی انتشار v چنین می‌شود:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{1.2 \text{ N}}{0.15 \text{ kg/m}}} = 2.83 \text{ m/s} \approx 2.8 \text{ m/s}$$

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

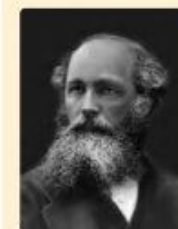
$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2.83 \text{ m/s}}{1.0 \text{ m}} = 2.83 \text{ Hz} \approx 2.8 \text{ Hz}$$

فیزیک ۳

نمونه ۳-۴



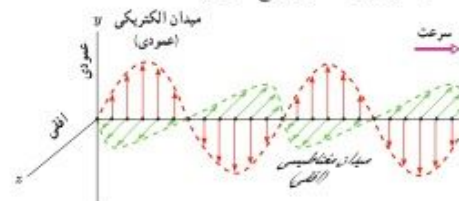
در سازه‌های زهی همانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت 0.628m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار 0.008g و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار 0.022g است. تارها تحت کششی برابر 226N قرار دارند. تندی انتشار 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 دانش‌آموزی بسیار کنجکاو بود و به ساختن اسباب‌ها و دستگاه‌های فنی خیلی علاقه داشت و پدرش هم او را به این کار تشویق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت تشریحی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی حلقه‌های سیم‌آزاجل و همچنین نظریه جنبشی گازها مطالعات ارزشمندی 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 فلوئیدی کرد و راه جدیدی را بر روی دستگاه‌های مانند رادار، تلویزیون، رادار و غیره گشود که هنگامی بر 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 $(P_{av} \propto A^2 f^2)$.

امواج الکترومغناطیسی: در کتاب فیزیک ۲ آموختیم که بار الکتریکی، میدان الکتریکی ایجاد می‌کند و جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اگر بارهای الکتریکی ساکن باشند، میدان الکتریکی حاصل از آنها با زمان تغییر نمی‌کند. به همین ترتیب اگر جریان الکتریکی ثابت باشند، 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 ناشی از تغییرات هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشد. شکل ۲-۳، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمه تولید موج نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: 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.

فیزیک ۳

نمونه ۳-۴



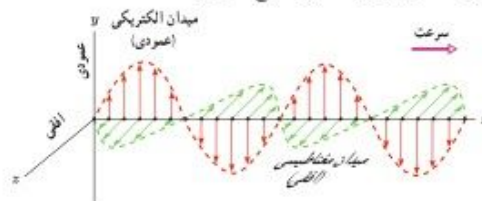
در سازه‌های زهی همانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت 0.628m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار 0.008g و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار 0.022g است. تارها تحت کششی برابر 226N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر است؟



جیمز کلارک ماکسول (۱۸۳۱-۱۸۷۹ م.) در شهر ادینبورگ اسکاتلند زاده شد. جیمز در دوران دانش‌آموزی بسیار کنجکاو بود و به ساختن اسباب‌ها و دستگاه‌های فنی خیلی علاقه داشت و پدرش هم او را به این کار تشویق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت تشریحی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی حلقه‌های سیم‌آزاجل و همچنین نظریه جنبشی گازها مطالعات ارزشمندی 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 فلوئیدی کرد و راه جدیدی را بر روی دستگاه‌های مانند رادار، تلویزیون، رادار و غیره گشود که هنگامی بر 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 باشند، 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 ناشی از تغییرات هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشد. شکل ۲-۳، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمه تولید موج نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: 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.

فصل ۳: نوسان و موج



شکل ۳-۱۳: قاعده دست راست برای یافتن جهت انتشار موج الکترومغناطیسی

- چند مشخصه بارز چنین موجی به قرار زیر است:

 - ۱- میدان الکتریکی $\vec{E}$ همواره عمود بر میدان مغناطیسی $\vec{B}$ است.
 - ۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی $\vec{E}$ و $\vec{B}$ همواره بر جهت حرکت موج عمودند و در نتیجه موج الکترومغناطیسی، یک موج عرضی است.
 - ۳- میدان‌ها با بسامد یکسان و همگام با یکدیگر تغییر می‌کنند.

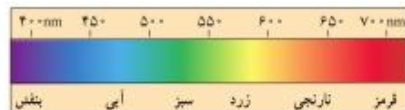
جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان مطابق شکل ۳-۱۳ از قاعده دست راست تعیین کرد.

پرسش ۳-۲

در یک لحظه خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت z و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت y است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های x, y, z را مانند شکل ۳-۲ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ به دست می‌آید، که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر $4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ و ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و برابر $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}$ است. مقدار c با استفاده از این رابطه $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ می‌شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش‌تر توسط فیزیکدان فرانسوی آرماند لوئیس فیزو (۱۸۹۶-۱۸۱۹ م.) به روش تجربی به دست آمده بود. این نتیجه‌ای بسیار مهم بود، زیرا نشان می‌داد نور، یک موج الکترومغناطیسی است.

نظریه ماکسول نیاز به تأیید تجربی داشت. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با ایجاد نوسان‌های الکتریکی پُر بسامدی، آزمایش‌های مشهوری در تأیید نظریه ماکسول انجام داد. هرتز نشان داد که امواج رادیویی نیز با همان تندی نور مرئی در آزمایشگاه حرکت می‌کنند و این حاکی از سرشت یکسان امواج رادیویی و نور مرئی بود.



مثال ۳-۲

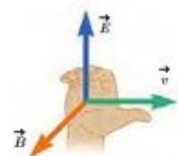
گستره تقریبی طول موج نور مرئی در خلأ از ۴۰۰ nm (نور بنفش) تا ۷۰۰ nm (نور قرمز) است. گستره بسامد مربوط به نور مرئی را بر حسب هرتز تعیین کنید.

پاسخ: نور یک نوع موج است و برای آن می‌توان از رابطه $v = f\lambda$ استفاده کرد. اما برای این موج v برابر با تندی نور است. بنابراین برای دو حد بالا و پایین بسامد طیف نور مرئی به ترتیب داریم:

$$f_{\text{بنفش}} = \frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{400 \times 10^{-9} \text{ m}} = 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_{\text{قرمز}} = \frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{700 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

فصل ۳: نوسان و موج



شکل ۳-۱۳: قاعده دست راست برای یافتن جهت انتشار موج الکترومغناطیسی

- چند مشخصه بارز چنین موجی به قرار زیر است:

 - ۱- میدان الکتریکی $\vec{E}$ همواره عمود بر میدان مغناطیسی $\vec{B}$ است.
 - ۲- میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی $\vec{E}$ و $\vec{B}$ همواره بر جهت حرکت موج عمودند و در نتیجه موج الکترومغناطیسی، یک موج عرضی است.
 - ۳- میدان‌ها با بسامد یکسان و همگام با یکدیگر تغییر می‌کنند.

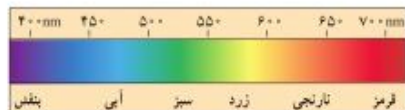
جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان مطابق شکل ۳-۱۳ از قاعده دست راست تعیین کرد.

پرسش ۳-۲

در یک لحظه خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت z و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت y است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های x, y, z را مانند شکل ۳-۲ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ به دست می‌آید، که در آن μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر $4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ و ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و برابر $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}$ است. مقدار c با استفاده از این رابطه $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ می‌شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش‌تر توسط فیزیکدان فرانسوی آرماند لوئیس فیزو (۱۸۹۶-۱۸۱۹ م.) به روش تجربی به دست آمده بود. این نتیجه‌ای بسیار مهم بود، زیرا نشان می‌داد نور، یک موج الکترومغناطیسی است.

نظریه ماکسول نیاز به تأیید تجربی داشت. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با ایجاد نوسان‌های الکتریکی پُر بسامدی، آزمایش‌های مشهوری در تأیید نظریه ماکسول انجام داد. هرتز نشان داد که امواج رادیویی نیز با همان تندی نور مرئی در آزمایشگاه حرکت می‌کنند و این حاکی از سرشت یکسان امواج رادیویی و نور مرئی بود.



مثال ۳-۲

گستره تقریبی طول موج نور مرئی در خلأ از ۴۰۰ nm (نور بنفش) تا ۷۰۰ nm (نور قرمز) است. گستره بسامد مربوط به نور مرئی را بر حسب هرتز تعیین کنید.

پاسخ: نور یک نوع موج است و برای آن می‌توان از رابطه $v = f\lambda$ استفاده کرد. اما برای این موج v برابر با تندی نور است. بنابراین برای دو حد بالا و پایین بسامد طیف نور مرئی به ترتیب داریم:

$$f_{\text{بنفش}} = \frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{400 \times 10^{-9} \text{ m}} = 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$f_{\text{قرمز}} = \frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{700 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

فیزيك ۳

تمرین ۳-۵



طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{1}{4}$ طول موج دریافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر ۸/۵cm باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می کند تعیین کنید.

فعالیت ۳-۴



مطابق شکل روبه رو یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظه تخلیه هوای شیشه ای 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 می شود، در حالی که امواج الکترومغناطیسی همچنان به گوشی می رسند. از این آزمایش چه نتیجه ای می گیرید؟

فیزيك ۳

تمرین ۳-۵



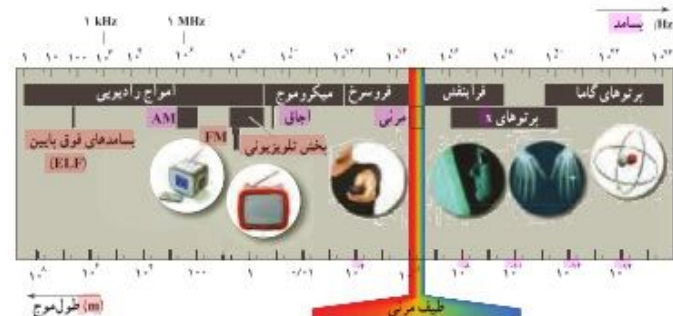
طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{1}{4}$ طول موج دریافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر ۸/۵cm باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می کند تعیین کنید.

فعالیت ۳-۴



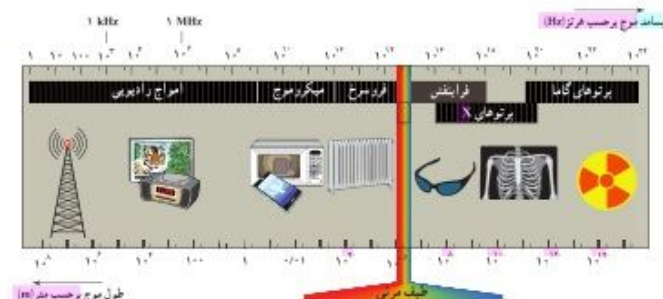
مطابق شکل روبه رو یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظه تخلیه هوای شیشه ای آویزان کنید. با برقراری تماس با گوشی، صدای آن را خواهید شنید. ولی با به کار افتادن پمپ تخلیه هوا، صدا به تدریج ضعیف و سرانجام خاموش می شود، در حالی که امواج الکترومغناطیسی همچنان به گوشی می رسند. از این آزمایش چه نتیجه ای می گیرید؟

همان طور که پیش تر گفتیم امواج مکانیکی برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند. اما انتشار امواج الکترومغناطیسی به محیط مادی نیاز ندارد و این امواج، انرژی را نه به صورت انرژی جنبشی و انرژی بتانسیل ذرات محیط، بلکه به صورت انرژی میدان های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می کنند. مثلاً کل انرژی دریافتی از خورشید که باعث بقای زندگی روی کره زمین می شود 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 می رسد، تقریباً ۱۰۰ میلیون گیگاوات است. جالب است که بدانید مرتبه بزرگی توان تولیدی یک نیروگاه هسته ای، ۱ گیگاوات است. طیف امواج الکترومغناطیسی: امروزه طیف وسیعی از امواج الکترومغناطیسی را می شناسیم. این طیف شامل امواج رادیویی، میکروموج، فرسرخ، طیف نور مرئی، فرابنفش، پرتوهای X و پرتوهای گاما است، که از کمترین بسامد تا بیشترین بسامد گسترده شده اند (شکل ۳-۲۲). تمام این امواج به رغم تفاوت فراوان در روش های تولید و کاربردهای آنها، امواجی الکترومغناطیسی هستند و همگی با تندی نور در خلأ حرکت می کنند و هیچ گسستگی ای در این طیف وجود ندارد.



شکل ۳-۲۲ طیف امواج الکترومغناطیسی

همان طور که پیش تر گفتیم امواج مکانیکی برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند. اما انتشار امواج الکترومغناطیسی به محیط مادی نیاز ندارد و این امواج، انرژی را نه به صورت انرژی جنبشی و انرژی بتانسیل ذرات محیط، بلکه به صورت انرژی میدان های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می کنند. مثلاً کل انرژی دریافتی از خورشید که باعث بقای زندگی روی کره زمین می شود 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 می رسد، تقریباً ۱۰۰ میلیون گیگاوات (از مرتبه ۱۰ وات) است. جالب است که بدانید مرتبه بزرگی توان تولیدی یک نیروگاه هسته ای، ۱ گیگاوات است. طیف امواج الکترومغناطیسی: امروزه طیف وسیعی از امواج الکترومغناطیسی را می شناسیم. این طیف شامل امواج رادیویی، میکروموج، فرسرخ، طیف نور مرئی، فرابنفش، پرتوهای X و پرتوهای گاما است، که از کمترین بسامد تا بیشترین بسامد گسترده شده اند (شکل ۳-۲۲). تمام این امواج به رغم تفاوت فراوان در روش های تولید و کاربردهای آنها، امواجی الکترومغناطیسی هستند و همگی با تندی نور در خلأ حرکت می کنند و هیچ گسستگی ای در این طیف وجود ندارد.



شکل ۳-۲۲ طیف امواج الکترومغناطیسی

فصل ۳: نوسان و موج



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 دیافراگم را توضیح دهید.

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

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

جدول ۳-۱ تندی صوت در محیط‌های مختلف

محیط	تندی (m/s)
گازها*	
هوا (۰°C)	۳۳۱
هوا (۲۰°C)	۳۴۳
هلیوم (۰°C)	۹۶۵
هیدروژن (۰°C)	۱۲۸۴
مایع‌ها	
متیل الکل (۲۵°C)	۱۱۲۳
آب (۰°C)	۱۴۰۲
آب (۲۰°C)	۱۴۸۲
آب دریا (۲۰°C) و شوری ۲/۵	۱۵۲۲
جامدها	
فلزات	۵۹۲۱
گرانیت	۶۰۰۰
آلومینیم	۶۲۲۰

* فشار همه گازها ۱ atm است.

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

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

فعالیت ۳-۶

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



۱= Fast timer

فصل ۳: نوسان و موج



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

جدول ۳-۱ تندی صوت در محیط‌های مختلف

محیط	تندی (m/s)
گازها*	
هوا (۰°C)	۳۳۱
هوا (۲۰°C)	۳۴۳
هلیوم (۰°C)	۹۶۵
هیدروژن (۰°C)	۱۲۸۴
مایع‌ها	
متیل الکل (۲۵°C)	۱۱۲۳
آب (۰°C)	۱۴۰۲
آب (۲۰°C)	۱۴۸۲
آب دریا (۲۰°C) و شوری ۲/۵	۱۵۲۲
جامدها	
فلزات	۵۹۲۱
گرانیت	۶۰۰۰
آلومینیم	۶۲۲۰

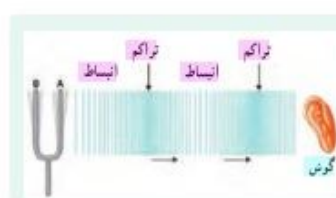
* فشار همه گازها ۱ atm است.

را برعکس می‌کند و به سمت داخل می‌رود. حرکت رو به داخل دیافراگم، هوای جلوی آن را منبسط می‌کند. این انبساط که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود، مشابه 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 دیافراگم 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 دما نیز بستگی دارد و از این رو معمولاً تندی صوت در مواد، همراه با دمای متناظر آنها نوشته می‌شود.

فعالیت ۳-۶

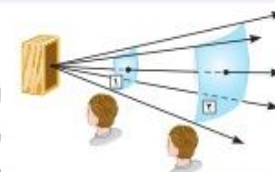
اندازه‌گیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری کند. وقتی چکش را به صفحه فلزی بکوبیم، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست میکروفون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



۱= Fast timer

تمرین ۳-۶

شخصی با چکش به انتهای میله باریک بلندی ضربه‌ای می‌زند. تندی صوت در این میله ۱۵ برابر تندی صوت در هوا است. شخص دیگری که گوش خود را نزدیک به انتهای دیگر میله گذاشته است، دو صدا را که یکی از میله می‌آید و دیگری از هوای اطراف میله، با اختلاف زمانی ۱/۲۸ s می‌شنود. اگر تندی صوت در هوا ۳۴۰ m/s باشد، طول میله چقدر است؟



شکل ۳-۱۱ با انتشار صوت از جنس، انرژی به‌طور عمود، نخست از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می‌گذرد.

شدت و تراز شدت صوت: انتشار صوت از هر چشمه صوتی همراه با انتقال بی‌دری انرژی از ناحیه‌ای از محیط به ناحیه‌ای دیگر از آن است. در واقع چشمه صوت، این انرژی را با به حرکت درآوردن لایه‌ای از محیط که در تماس مستقیم با چشمه است به محیط می‌دهد. انرژی از این لایه به لایه بعدی و از آنجا به لایه‌های بعدی دیگر منتقل و در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی‌ای است که توسط موج به واحد سطح، عمود بر راستای انتشار صوت می‌رسد یا از آن عبور می‌کند (شکل ۳-۲۶).

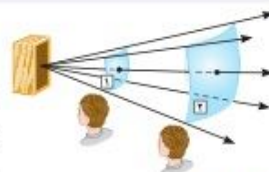
جدول ۳-۱۱ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	شدت صوت (W/m^2)	تراز شدت صوت (dB)
نفس کشیدن در فاصله ۳m	10^{-11}	۱۰
بیج در فاصله ۱m	10^{-10}	۲۰
کتابخانه	10^{-9}	۳۰
خیابان بی‌سروصدا	10^{-8}	۴۰
رستوران ساکت	10^{-7}	۵۰
صحبت معمولی در فاصله ۱m	10^{-6}	۶۰
خیابان بی‌سروصدا	10^{-5}	۷۰
در تریبی جاروبرقی	10^{-4}	۸۰
قطار در عبور از یک تقاطع	10^{-3}	۹۰
کارگاه ماشین‌آلات بر سروصدا	10^{-2}	۱۰۰
دستگاه بخش صوت در بیشترین صدای خود	10^{-1}	۱۱۰
مته سنگ‌شکن	10^0	۱۲۰
مونور جت در فاصله ۳۰m	10^1	۱۳۰

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

تمرین ۳-۶

شخصی با چکش به انتهای میله باریک بلندی ضربه‌ای می‌زند. تندی صوت در این میله ۱۵ برابر تندی صوت در هوا است. شخص دیگری که گوش خود را نزدیک به انتهای دیگر میله گذاشته است، دو صدا را که یکی از میله می‌آید و دیگری از هوای اطراف میله، با اختلاف زمانی ۱/۲۸ s می‌شنود. اگر تندی صوت در هوا ۳۴۰ m/s باشد، طول میله چقدر است؟



شکل ۳-۱۱ با انتشار صوت از جنس، انرژی به‌طور عمود، نخست از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می‌گذرد.

شدت و تراز شدت صوت: انتشار صوت از هر چشمه صوتی همراه با انتقال بی‌دری انرژی از ناحیه‌ای از محیط به ناحیه‌ای دیگر از آن است. در واقع چشمه صوت، این انرژی را با به حرکت درآوردن لایه‌ای از محیط که در تماس مستقیم با چشمه است به محیط می‌دهد. انرژی از این لایه به لایه بعدی و از آنجا به لایه‌های بعدی دیگر منتقل و در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی‌ای است که توسط موج به واحد سطح، عمود بر راستای انتشار صوت می‌رسد یا از آن عبور می‌کند (شکل ۳-۲۶).

جدول ۳-۱۱ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	شدت صوت (W/m^2)	تراز شدت صوت (dB)
نفس کشیدن در فاصله ۳m	10^{-11}	۱۰
بیج در فاصله ۱m	10^{-10}	۲۰
کتابخانه	10^{-9}	۳۰
خیابان بی‌سروصدا	10^{-8}	۴۰
رستوران ساکت	10^{-7}	۵۰
صحبت معمولی در فاصله ۱m	10^{-6}	۶۰
خیابان بی‌سروصدا	10^{-5}	۷۰
در تریبی جاروبرقی	10^{-4}	۸۰
قطار در عبور از یک تقاطع	10^{-3}	۹۰
کارگاه ماشین‌آلات بر سروصدا	10^{-2}	۱۰۰
دستگاه بخش صوت در بیشترین صدای خود	10^{-1}	۱۱۰
مته سنگ‌شکن	10^0	۱۲۰
مونور جت در فاصله ۳۰m	10^1	۱۳۰

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

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. شدت صوت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری شدت صوت‌های مختلف در می‌یابیم نسبت شدت‌های صوت در گستره شنوایی انسان می‌تواند در حدود 10^{12} باشد (جدول ۳-۱۱). برای بررسی چنین گستره وسیعی از شدت‌ها راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایه ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به‌جای شدت I یک موج صوتی، ساده‌تر این است که از تراز شدت صوت (تراز صوتی) که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم:

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

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۸۴۷-۱۹۴۲ م.) انتخاب شده است. همچنین I_0 شدت مرجع ($10^{-12} W/m^2$) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گستره شنوایی انسان است. یک موج صوتی با شدت $I = I_0$ تراز شدت صوتی برابر ۰ dB دارد. جدول ۳-۱۱، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

فصل ۳: نوسان و موج

مثال ۱-۳

تراز شدت صوت یک مخلوط کن که انتشار صوت آن به صورت شکل ۲-۳۲ است در سطح ۲، 80 dB است. الف) شدت این صدا چقدر است؟ ب) اگر مساحت سطح ۲ برابر $4/00 \text{ m}^2$ باشد، آهنگ متوسط انتقال انرژی از این سطح را محاسبه کنید. پاسخ: با استفاده از رابطه ۱۲-۳ داریم:

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

$$(I/I_0) = 10^{8/10} \Rightarrow I = 10^{8/10} (1/00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2) = 1/00 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$$

$$I = \frac{P_{av}}{A} \Rightarrow P_{av} = IA = (1/00 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2) (4/00 \text{ m}^2) = 4/00 \times 10^{-4} \text{ W} \quad \text{ب)}$$

تمرین ۷-۳

با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد 100 برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

ادراک شنوایی: وقتی دیپازونی را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی‌داریم، دیپازون نوسان‌هایی انجام می‌دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین جنبه‌هایی β موسیقی یا به اختصار β گفته می‌شود. با شنیدن هر β ، 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 دیپازون 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 دیپازون با بسامد مشخص را با ضربه‌هایی متفاوت به ارتعاش واداریم، با آنکه بسامد صدایی که می‌شنویم تغییر نمی‌کند، اما صداهایی با بلندی متفاوت را حس می‌کنیم که این به شدت ضربه‌ها بستگی دارد. بلندی متفاوت با شدت است. شدت را می‌توان با یک آنکارساز 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 2000 Hz تا 5000 Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن 20 Hz تا $20,000 \text{ Hz}$ است.

اثر دوپلر: فرض کنید یک ماشین آتش‌نشانی در حالی که آژیر آن روشن است در کنار خودروی شما متوقف باشد. شما همان بسامدی را از آژیر می‌شنوید که راننده ماشین آتش‌نشانی می‌شنود. ولی اگر خودروی شما به ماشین آتش‌نشانی نزدیک و یا از آن دور شود، بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. همچنین اگر خودروی شما ساکن باشد و ماشین آتش‌نشانی به شما نزدیک و سپس از شما دور شود باز هم بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. اینها مثال‌هایی از اثر دوپلر است که به افتخار کانف

۱. Tone

۲. Pitch

۳. Loudness

فصل ۳: نوسان و موج

مثال ۱-۳

تراز شدت صوت یک مخلوط کن که انتشار صوت آن به صورت شکل ۲-۳۲ است در سطح ۲، 80 dB است. الف) شدت این صدا چقدر است؟ ب) اگر مساحت سطح ۲ برابر $4/00 \text{ m}^2$ باشد، آهنگ متوسط انتقال انرژی از این سطح را محاسبه کنید. پاسخ: با استفاده از رابطه ۱۲-۳ داریم:

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

$$(I/I_0) = 10^{8/10} \Rightarrow I = 10^{8/10} (1/00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2) = 1/00 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$$

$$I = \frac{P_{av}}{A} \Rightarrow P_{av} = IA = (1/00 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2) (4/00 \text{ m}^2) = 4/00 \times 10^{-4} \text{ W} \quad \text{ب)}$$

تمرین ۷-۳

با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد 100 برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

ادراک شنوایی: وقتی دیپازونی را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی‌داریم، دیپازون نوسان‌هایی انجام می‌دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین جنبه‌هایی β موسیقی یا به اختصار β گفته می‌شود. با شنیدن هر β ، 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 دیپازون 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 دیپازون با بسامد مشخص را با ضربه‌هایی متفاوت به ارتعاش واداریم، با آنکه بسامد صدایی که می‌شنویم تغییر نمی‌کند، اما صداهایی با بلندی متفاوت را حس می‌کنیم که این به شدت ضربه‌ها بستگی دارد. بلندی متفاوت با شدت است. شدت را می‌توان با یک آنکارساز 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 2000 Hz تا 5000 Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن 20 Hz تا $20,000 \text{ Hz}$ است.

اثر دوپلر: فرض کنید یک ماشین آتش‌نشانی در حالی که آژیر آن روشن است در کنار خودروی شما متوقف باشد. شما همان بسامدی را از آژیر می‌شنوید که راننده ماشین آتش‌نشانی می‌شنود. ولی اگر خودروی شما به ماشین آتش‌نشانی نزدیک و یا از آن دور شود، بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. همچنین اگر خودروی شما ساکن باشد و ماشین آتش‌نشانی به شما نزدیک و سپس از شما دور شود باز هم بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. اینها مثال‌هایی از اثر دوپلر است که به افتخار کانف

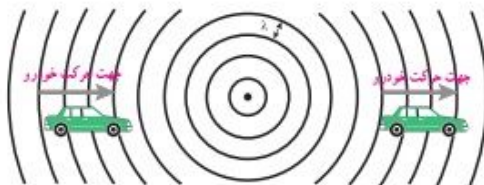
۱. Tone

۲. Pitch

۳. Loudness

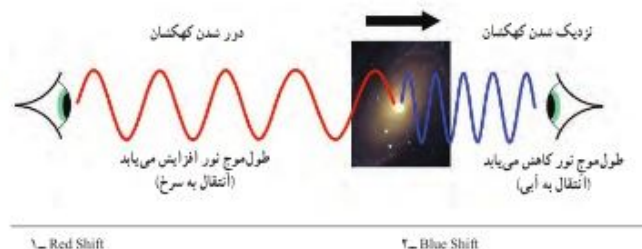
فصل ۳: نوسان و موج

ب) چشمه ساکن و ناظر (شنونده) متحرک: در این حالت تجمع جبهه‌های موج در دو سوی چشمه یکسان است. اگر ناظر به طرف چشمه حرکت کند، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود که این منجر به افزایش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود. در حالی که اگر ناظر از چشمه دور شود، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج کمتری مواجه می‌شود که این منجر به کاهش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود (شکل ۳-۲۸).



شکل ۳-۲۸ در مدت زمان یکسان خودرویی که به چشمه ساکن صوت نزدیک می‌شود با جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که خودرویی که از این چشمه دور می‌شود با جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای موج‌های الکترومغناطیسی همانند نور یا امواج رادیویی نیز اثر دوپلر برقرار است، ولی بررسی آن با اثر دوپلر در صوت متفاوت است. هر گاه چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابه‌جایی دوپلری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصد‌های نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری سماوی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلری نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها به دست آورد. این جابه‌جایی دوپلری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سماوی نسبت به ناظر (آشکارساز) است. وقتی چشمه نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً *انتقال به سرخ* می‌گویند و وقتی چشمه نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً *انتقال به آبی* می‌گویند (شکل ۳-۲۹).



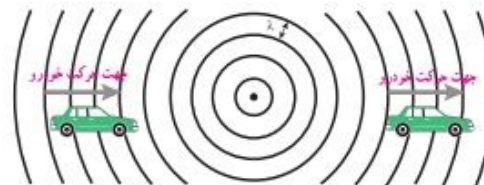
شکل ۳-۲۹ اگر کهکسانی به ما نزدیک یا از ما دور شود، بسامد و طول موج دریافتی از آن تغییر می‌کند.

۱- Red Shift

۲- Blue Shift

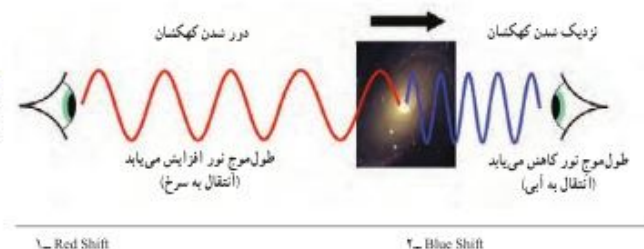
فصل ۳: نوسان و موج

ب) چشمه ساکن و ناظر (شنونده) متحرک: در این حالت تجمع جبهه‌های موج در دو سوی چشمه یکسان است. اگر ناظر به طرف چشمه حرکت کند، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود که این منجر به افزایش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود. در حالی که اگر ناظر از چشمه دور شود، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج کمتری مواجه می‌شود که این منجر به کاهش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود (شکل ۳-۲۸).



شکل ۳-۲۸ در مدت زمان یکسان خودرویی که به چشمه ساکن صوت نزدیک می‌شود با جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که خودرویی که از این چشمه دور می‌شود با جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی: همان‌طور که گفتیم برای موج‌های الکترومغناطیسی همانند نور یا امواج رادیویی نیز اثر دوپلر برقرار است، ولی بررسی آن با اثر دوپلر در صوت متفاوت است. هر گاه چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. اندازه‌گیری این تغییرات (جابه‌جایی دوپلری) نقش مهمی در اخترشناسی دارد. در رصد‌های نجومی ستارگان، کهکشان‌ها و سایر چشمه‌های نوری سماوی، چه هنگامی که از ما دور می‌شوند و چه هنگامی که به ما نزدیک می‌شوند، با اندازه‌گیری جابه‌جایی دوپلری نور آنها می‌توان اطلاعاتی در مورد تندی و چگونگی حرکت آنها به دست آورد. این جابه‌جایی دوپلری صرفاً ناشی از حرکت آن اجرام سماوی نسبت به ناظر (آشکارساز) است. وقتی چشمه نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً *انتقال به سرخ* می‌گویند و وقتی چشمه نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً *انتقال به آبی* می‌گویند (شکل ۳-۲۹).



شکل ۳-۲۹ اگر کهکسانی به ما نزدیک یا از ما دور شود، بسامد و طول موج دریافتی از آن تغییر می‌کند.

۱- Red Shift

۲- Blue Shift

فیزيك ۳۳

پوش ۸۳

شكل زیر چشمه نوری را نشان می دهد که در حال حرکت به طرف راست است. چشمه، نوری با بسامد f را گسیل می کند. بسامد نوری که آشکارساز ساکن دریافت می کند بیشتر از f است یا کمتر؟



همچنین همان طور که در فصل بعد خواهید دید، می توان با ارسال یک موج الکترومغناطیسی به سوی خودرویی در حال حرکت و دریافت بازتاب این موج و در نظر گرفتن اثر دوپلر، **تندی** خودرو را به دست آورد؛ روشی که در دوربین های پلیس برای کنترل تندی خودروها در جاده ها به کار می رود (شكل ۳-۳).



شكل ۳-۳ تعیین تندی خودروها به کمک اثر دوپلر

فیزيك ۳۳

پوش ۸۳

شكل زیر چشمه نوری را نشان می دهد که در حال حرکت به طرف راست است. چشمه، نوری با بسامد f را گسیل می کند. بسامد نوری که آشکارساز ساکن دریافت می کند بیشتر از f است یا کمتر؟



همچنین همان طور که در فصل بعد خواهید دید، می توان با ارسال یک موج الکترومغناطیسی به سوی خودرویی در حال حرکت و دریافت بازتاب این موج و در نظر گرفتن اثر دوپلر، **تندی** خودرو را به دست آورد؛ روشی که **پلیس** در کنترل تندی خودروها در **جاده ها** به کار می برد (شكل ۳-۳).



شكل ۳-۳ تعیین تندی خودروها به کمک اثر دوپلر

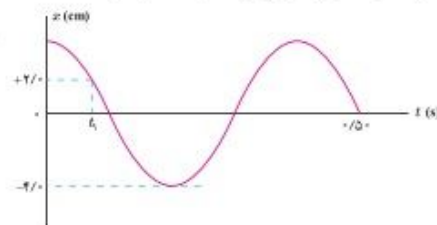
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

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

۱. یک وزنه 20 N را از انتهای یک فنر قائم می‌آوریم، فنر 20 cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنه 50 N متصل است روی میز بدون اصطکاک به نوسان درمی‌آوریم. دوره تناوب این نوسان چقدر است؟

۲. هرگاه جسمی به جرم m به فتری متصل شود و به نوسان درآید، با دوره تناوب $2/0\text{ s}$ نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم $2/0\text{ kg}$ افزایش یابد، دوره تناوب $2/0\text{ s}$ می‌شود. مقدار m چقدر است؟
۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن 1600 kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت 10^5 N/m سوار شده است. دوره تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جالهای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکنواخت روی فنرهای چهارجریخ توزیع شده است.

۴. دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $3/0 \times 10^{-3}\text{ m}$ و بسامد آن $5/0\text{ Hz}$ هرتز است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را در یک دوره رسم کنید.
۵. نمودار مکان-زمان نوسانگر جرم-فتری مطابق شکل زیر است: (الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید.
(ب) مقدار t_1 را به دست آورید.
(پ) اندازه شتاب نوسانگر را در لحظه t_1 محاسبه کنید.



۱-۳ و ۲-۳ انرژي در حرکت هماهنگ ساده

۶. دامنه نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت فنر 74 N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با $4/0\text{ cm}$ است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، $8/0 \times 10^{-4}\text{ J}$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم $1/0\text{ kg}$ به فتری افقی با ثابت $6/0\text{ N/cm}$ متصل است. فنر به اندازه $9/0\text{ cm}$ فشرده و سپس رها می‌شود و جسم روی سطح افقی شروع به نوسان می‌کند. با چشم‌پوشی از اصطکاک (الف) دامنه نوسان و تندی بیشینه جسم چقدر است؟
(ب) وقتی تندی جسم $1/6\text{ m/s}$ است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۸. معادله حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به صورت $x = (0/050\text{ m})\cos(2\pi t)$ است.
(الف) در چه زمانی، پس از لحظه صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به بیشترین مقدار خود می‌رسد؟
(ب) در چه زمانی، پس از لحظه صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به صفر می‌رسد؟
(پ) تندی نوسانگر چقدر باشد تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

۹. (الف) ساعتی آونگ‌دار (با آونگ ساده) در تهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه‌ای در استوا برده شود، عقب می‌افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلو افتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟
(الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید.
(ب) مقدار t_1 را به دست آورید.
(پ) به نظر شما آیا با افزایش دما، یک ساعت آونگ‌دار جلو می‌افتد یا عقب؟

۱۰. هر فرد معمولاً با چرخش اندک بدنش به چپ و راست، راه می‌رود و بدین ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود $5/0\text{ Hz}$ دارند. لرزش شدید بل هوایی میلیبوم در آغاز هزاره جدید را به عبور منظم گروهی از افراد از این بل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب چنین لرزشی شده باشد؟



Millennium bridge

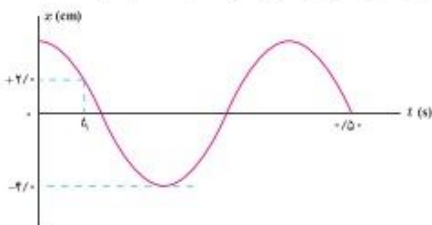
پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

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

۱. یک وزنه 20 N را از انتهای یک فنر قائم می‌آوریم، فنر 20 cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنه 50 N متصل است روی میز بدون اصطکاک به نوسان درمی‌آوریم. دوره تناوب این نوسان چقدر است؟

۲. هرگاه جسمی به جرم m به فتری متصل شود و به نوسان درآید، با دوره تناوب $2/0\text{ s}$ نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم $2/0\text{ kg}$ افزایش یابد، دوره تناوب $2/0\text{ s}$ می‌شود. مقدار m چقدر است؟
۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن 1600 kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت 10^5 N/m سوار شده است. دوره تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از جالهای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکنواخت روی فنرهای چهارجریخ توزیع شده است.

۴. دامنه نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $3/0 \times 10^{-3}\text{ m}$ و بسامد آن $5/0\text{ Hz}$ هرتز است. معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان-زمان آن را در یک دوره رسم کنید.
۵. نمودار مکان-زمان نوسانگر جرم-فتری مطابق شکل زیر است: (الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید.
(ب) مقدار t_1 را به دست آورید.
(پ) اندازه شتاب نوسانگر را در لحظه t_1 محاسبه کنید.



۱-۳ و ۲-۳ انرژي در حرکت هماهنگ ساده

۶. دامنه نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت فنر 74 N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با $4/0\text{ cm}$ است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، $8/0 \times 10^{-4}\text{ J}$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم $1/0\text{ kg}$ به فتری افقی با ثابت $6/0\text{ N/cm}$ متصل است. فنر به اندازه $9/0\text{ cm}$ فشرده و سپس رها می‌شود و جسم روی سطح افقی شروع به نوسان می‌کند. با چشم‌پوشی از اصطکاک (الف) دامنه نوسان و تندی بیشینه جسم چقدر است؟
(ب) وقتی تندی جسم $1/6\text{ m/s}$ است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۸. معادله حرکت هماهنگ ساده یک نوسانگر در SI به صورت $x = (0/050\text{ m})\cos(2\pi t)$ است.
(الف) در چه زمانی، پس از لحظه صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به بیشترین مقدار خود می‌رسد؟
(ب) در چه زمانی، پس از لحظه صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به صفر می‌رسد؟
(پ) تندی نوسانگر چقدر باشد تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

۹. (الف) ساعتی آونگ‌دار (با آونگ ساده) در تهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه‌ای در استوا برده شود، عقب می‌افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلو افتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟
(الف) معادله حرکت این نوسانگر را بنویسید.
(ب) مقدار t_1 را به دست آورید.
(پ) به نظر شما آیا با افزایش دما، یک ساعت آونگ‌دار جلو می‌افتد یا عقب؟

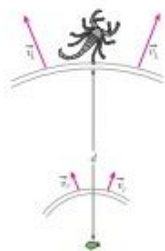
۱۰. هر فرد معمولاً با چرخش اندک بدنش به چپ و راست، راه می‌رود و بدین ترتیب نیروهای کوچکی به زمین زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود $5/0\text{ Hz}$ دارند. لرزش شدید بل هوایی میلیبوم در آغاز هزاره جدید را به عبور منظم گروهی از افراد از این بل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب چنین لرزشی شده باشد؟



Millennium bridge

فصل ۳: نوسان و موج

که در سطح مایه منتشر می‌شوند، بر دو نوع اند: امواج عرضی با تندی $v_T = 50 \text{ m/s}$ و امواج طولی با تندی $v_L = 1500 \text{ m/s}$. 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 $\Delta t = 4/0 \text{ ms}$ باشد، طعمه در چه فاصله‌ای از عقرب قرار دارد؟



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

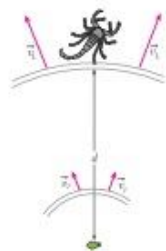
الف) شکل موج (ب) دامنه موج (ب) بسامد موج (ت) دمای هوا
 در سونوگرافی معمولاً از کاوه‌ای دستی موسوم به تراگذار فراصوتی برای تشخیص پزشکی استفاده می‌شود که دقیقاً روی ناحیه مورد نظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می‌شود. این کاوه در بسامد $6/7 \text{ MHz}$ عمل می‌کند. الف) بسامد زاویه‌ای در این کاوه نوسان چقدر است؟
 ب) اگر تندی موج صوتی در بافتی نرم از بدن 1500 m/s باشد، طول موج این موج در این بافت چقدر است؟



γ_{probe}
 $\gamma_{\text{Ultrasonic Transducer}}$

فصل ۳: نوسان و موج

که در سطح مایه منتشر می‌شوند، بر دو نوع اند: امواج عرضی با تندی $v_T = 50 \text{ m/s}$ و امواج طولی با تندی $v_L = 1500 \text{ m/s}$. 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 $\Delta t = 4/0 \text{ ms}$ باشد، طعمه در چه فاصله‌ای از عقرب قرار دارد؟



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

الف) شکل موج (ب) دامنه موج (ب) بسامد موج (ت) دمای هوا
 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 $6/7 \text{ MHz}$ عمل می‌کند. الف) بسامد زاویه‌ای در این کاوه نوسان چقدر است؟
 ب) اگر تندی موج صوتی در بافتی نرم از بدن 1500 m/s باشد، طول موج این موج در این بافت چقدر است؟



γ_{probe}
 $\gamma_{\text{Ultrasonic Transducer}}$

۴

فصل

برهم کنش های موج



در این تصویر نقشی شگفت انگیز از امواج دریا موسوم به دریای شطرنجی (Cross Sea) را می بینید. این نقش افسون کننده چگونه ممکن است ایجاد شده باشد؟

بخش ها

- ۱-۴ بازتاب موج
- ۲-۴ شکست موج
- ۳-۴ برآش موج
- ۴-۴ تداخل امواج

۴

فصل

برهم کنش های موج

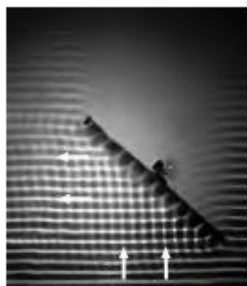


در این تصویر نقشی شگفت انگیز از امواج دریا موسوم به دریای شطرنجی (Cross Sea) را می بینید. این نقش افسون کننده چگونه ممکن است ایجاد شده باشد؟

بخش ها

- ۱-۴ بازتاب موج
- ۲-۴ شکست موج
- ۳-۴ برآش موج
- ۴-۴ تداخل امواج

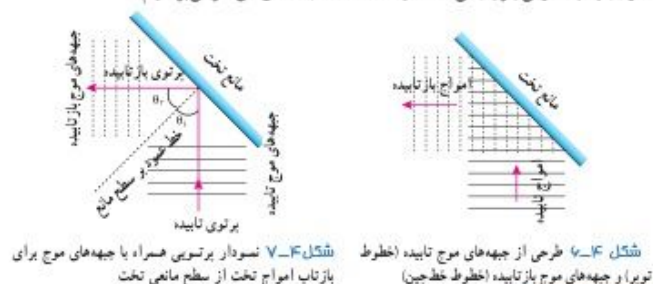
فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج



شکل ۴-۵ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تحت موج

به خاطر داریم وقتی تیغه تختی را بر سطح آب تحت موج به نوسان درمی‌آوریم، امواج تختی بر سطح آب تشکیل می‌شود. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع‌هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این موانع باز می‌تابند. به‌جنین بازتابی، بازتاب در دو بُعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل یک مانع، مانعی تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۴-۵). شکل ۴-۶ طرحی از چنین بازتابی را نشان می‌دهد. با استفاده از جبهه‌های موج می‌توانیم به‌طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع بی‌پایه بریم. طرح معادل دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از **نمودار پرتویی** است. یک پرتو، پیکان مستقیمی عمود بر جبهه‌های موج است که جهت انتشار موج را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نمودار پرتویی شکل ۴-۶ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۴-۷ رسم کرد. زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فروبی) را **زاویه تابش** می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند^۲ و زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را **زاویه بازتابش** می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند^۳. آزمایش‌هایی نظیر آنچه در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، و همه انواع دیگر موج، مانند امواج دایره‌ای یا کروی نیز، همواره زاویه بازتابش برابر با زاویه تابش است یعنی: $\theta_r = \theta_i$ که به آن، **قانون بازتاب عمومی** گفته می‌شود.

نمونه دیگری از بازتاب امواج مکانیکی، بازتاب امواج صوتی است. صوت می‌تواند از یک سطح سخت مانند دیوار بازتابش کند. این مثالی از بازتاب امواج در سه بُعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند. در فعالیت ۴-۱ به تحقیق این امر می‌پردازیم.



فعالیت ۴-۱



نمایش از **اسباب** آزمایش بازتاب صوت

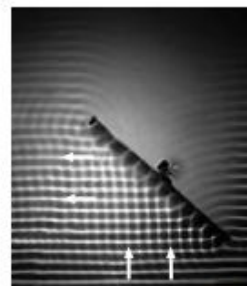
با **اسباب** نشان داده شده در شکل روبه‌رو، می‌توان زاویه تابش و زاویه بازتابش را در امواج صوتی اندازه‌گیری کرد. با استفاده از این **اسباب**، قانون بازتاب عمومی را برای امواج صوتی **تحقیق** کنید.

۱- توجه کنید که طول مانع باید در مقایسه با طول موج λ بسیار بزرگ باشد. دلیل این الزام را در بحث برائ امواج می‌بینید.

۲- θ_i سرورازة کلمه incident به معنی تابش است.

۳- θ_r سرورازة کلمه reflection به معنی بازتابش است.

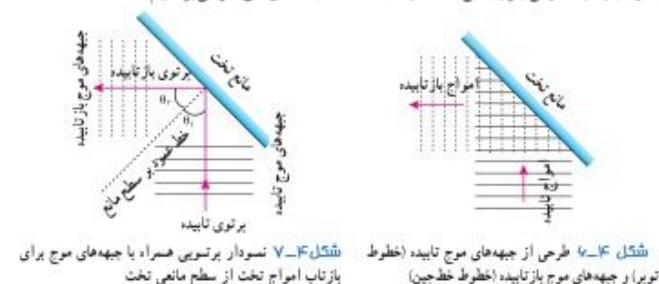
فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج



شکل ۴-۵ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تحت موج

به خاطر داریم وقتی تیغه تختی را بر سطح آب تحت موج به نوسان درمی‌آوریم، امواج تختی بر سطح آب تشکیل می‌شود. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع‌هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این موانع باز می‌تابند. به‌جنین بازتابی، بازتاب در دو بُعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل یک مانع، مانعی تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۴-۵). شکل ۴-۶ طرحی از چنین بازتابی را نشان می‌دهد. با استفاده از جبهه‌های موج می‌توانیم به‌طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع بی‌پایه بریم. طرح معادل دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از **نمودار پرتویی** است. یک پرتو، پیکان مستقیمی عمود بر جبهه‌های موج است که جهت انتشار موج را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نمودار پرتویی شکل ۴-۶ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۴-۷ رسم کرد. زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فروبی) را **زاویه تابش** می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند^۲ و زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را **زاویه بازتابش** می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند^۳. آزمایش‌هایی نظیر آنچه در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، و همه انواع دیگر موج، مانند امواج دایره‌ای یا کروی نیز، همواره زاویه بازتابش برابر با زاویه تابش است یعنی: $\theta_r = \theta_i$ که به آن، **قانون بازتاب عمومی** گفته می‌شود.

نمونه دیگری از بازتاب امواج مکانیکی، بازتاب امواج صوتی است. صوت می‌تواند از یک سطح سخت مانند دیوار بازتابش کند. این مثالی از بازتاب امواج در سه بُعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند. در فعالیت ۴-۱ به تحقیق این امر می‌پردازیم.



فعالیت ۴-۱



نمایش از **وسایل** آزمایش بازتاب صوت

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

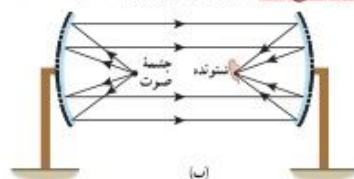
۱- توجه کنید که طول مانع باید در مقایسه با طول موج λ بسیار بزرگ باشد. دلیل این الزام را در بحث برائ امواج می‌بینید.

۲- θ_i سرورازة کلمه incident به معنی تابش است.

۳- θ_r سرورازة کلمه reflection به معنی بازتابش است.

فیزيک ۳۳

امواج صوتی می‌توانند مانند سایر امواج از سطوح خمیده نیز بازتابیده شوند. شاید در پارک‌های تفریحی دو سطح کاورا در برابر هم دیده باشید که وقتی شخصی در کانون یکی از این سطوح صحبت می‌کند، شخص دیگری در کانون سطح کاور دیگر آن را می‌شنود (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸ الف) دو سطح بازتابنده کاور در یک پارک تفریحی و ب) طرحی از بازتاب امواج صوتی از دو سطح کاور مقابل هم با استفاده از نمودار پرتویی

فعالیت ۲-۴



درباره میکروفون سهموی که از آن برای ثبت صداهای ضعیف و دستگاه لیتوتریپسی^۱ که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود تحقیق کنید.

پژواک^۲: در برابر دیواره یا صخره پلندی که چند ده متر از شما فاصله دارد، بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی، بازتاب صدای دست زدن خود را خواهید شنید. اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شنونده‌ای برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی **پژواک** می‌گویند. اگر تأخیر زمانی بین این دو صوت کمتر از $\frac{1}{10}$ باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

فناوری و کاربرد: مکان‌یابی پژواکی

مکان‌یابی پژواکی^۳ روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند. مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر که در فصل پیش آموختیم، در تعیین مکان اجسام متحرک و نیز تعیین تندی آنها به کار می‌رود. برخی از جانوران نظیر خفاش و دلفین از این روش استفاده می‌کنند. همین‌طور در فناوری‌هایی نظیر اندازه‌گیری تندی شارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود. خفاش، فوآنی از امواج فراصوتی را گسیل می‌کند که این بسته به نوع خفاش از دهان یا سوراخ‌های بینی آن گسیل می‌شود. این امواج از اشیایی که در مسیر خفاش قرار دارند باز می‌تابد و بدین ترتیب خفاش را از اشیایی که بر سر راه او قرار دارند آگاه می‌سازد. البته بسته به اینکه شیء بازتابنده، خود خفاش، یا هر دو متحرک باشند، خفاش تغییر بسامدی ناشی از اثر دوپلر را در موج بازتابیده ادراک می‌کند و بدین وسیله می‌تواند سرعت خود یا شیء متحرک را تعیین کند. خفاش‌ها از این ویژگی برای شناسایی و شکار طعمه‌های خود استفاده می‌کنند. همچنین در دستگاه سونار که در کشتی‌ها برای مکان‌یابی اجسام زیر آب به کار می‌رود، و در سونوگرافی نیز از مکان‌یابی پژواکی استفاده می‌شود.

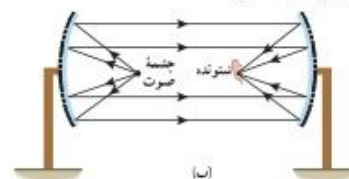
^۱— Lithotripsy

^۲— Echo

^۳— Echolocation

فیزيک ۳۳

امواج صوتی می‌توانند مانند سایر امواج از سطوح خمیده نیز بازتابیده شوند. شاید در برخی از پارک‌های تفریحی، دو سطح کاورا در برابر هم دیده باشید که وقتی شخصی در کانون یکی از این سطوح صحبت می‌کند، شخص دیگری در کانون سطح کاور دیگر آن را می‌شنود (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸ الف) دو سطح بازتابنده کاور در یک پارک تفریحی و ب) طرحی از بازتاب امواج صوتی از دو سطح کاور مقابل هم با استفاده از نمودار پرتویی

فعالیت ۲-۴



درباره میکروفون سهموی که از آن برای ثبت صداهای ضعیف و دستگاه لیتوتریپسی^۱ که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود تحقیق کنید.

پژواک^۲: در برابر دیواره یا صخره پلندی که چند ده متر از شما فاصله دارد، بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی، بازتاب صدای دست زدن خود را خواهید شنید. اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شنونده‌ای برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی **پژواک** می‌گویند. اگر تأخیر زمانی بین این دو صوت کمتر از $\frac{1}{10}$ باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

فناوری و کاربرد: مکان‌یابی پژواکی

مکان‌یابی پژواکی^۳ روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند. مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر که در فصل پیش آموختیم، در تعیین مکان اجسام متحرک و نیز تعیین تندی آنها به کار می‌رود. برخی از جانوران نظیر خفاش و دلفین از این روش استفاده می‌کنند. همین‌طور در فناوری‌هایی نظیر اندازه‌گیری تندی شارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود. خفاش، فوآنی از امواج فراصوتی را گسیل می‌کند که این بسته به نوع خفاش از دهان یا سوراخ‌های بینی آن گسیل می‌شود. این امواج از اشیایی که در مسیر خفاش قرار دارند باز می‌تابد و بدین ترتیب خفاش را از اشیایی که بر سر راه او قرار دارند آگاه می‌سازد. البته بسته به اینکه شیء بازتابنده، خود خفاش، یا هر دو متحرک باشند، خفاش تغییر بسامدی ناشی از اثر دوپلر را در موج بازتابیده ادراک می‌کند و بدین وسیله می‌تواند سرعت خود یا شیء متحرک را تعیین کند. خفاش‌ها از این ویژگی برای شناسایی و شکار طعمه‌های خود استفاده می‌کنند. همچنین در دستگاه سونار که در کشتی‌ها برای مکان‌یابی اجسام زیر آب به کار می‌رود، و در سونوگرافی نیز از مکان‌یابی پژواکی استفاده می‌شود.

^۱— Lithotripsy

^۲— Echo

^۳— Echolocation

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تمرین ۱-۴

کمترین فاصله بین شما و یک دیوار بلند جقدر باشد تا پژواک صدای خود را از صدای اصلی تمیز دهید؟ تندی صوت در هوا را 340 m/s در نظر بگیرید.

مثال ۱-۴

والی اعتبار یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکان‌هایی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی ای که این وال تولید می‌کند حدود 100 kHz است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۱-۳ حدود 1520 m/s است، الف) طول موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای مانی که در فاصله 10 m از آن قرار گرفته، جقدر است؟

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

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1520 \times 10^3 \text{ m/s}}{100 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 15.2 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.52 \text{ cm}$$

همان‌طور که بعداً در بحث پراش خواهیم دید برای تشخیص یک جسم، اندازه آن باید در حدود طول موج به کار رفته یا بزرگ‌تر از آن باشد. بنابراین، وال اجسامی در حدود این طول موج یا بزرگ‌تر را می‌تواند تشخیص دهد.

ب) زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و مانع برابر است با:

$$t = \frac{x}{v} = \frac{2L}{v} = \frac{2 \times 10 \text{ m}}{1520 \times 10^3 \text{ m/s}} = 0.132 \text{ s}$$

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

تمرین ۱-۴

کمترین فاصله بین شما و یک دیوار بلند جقدر باشد تا پژواک صدای خود را از صدای اصلی تمیز دهید؟ تندی صوت در هوا را 340 m/s در نظر بگیرید.

مثال ۱-۴

والی اعتبار یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکان‌هایی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی ای که این وال تولید می‌کند حدود 100 kHz است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۱-۳ حدود 1520 m/s است، الف) طول موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای مانی که در فاصله 10 m از آن قرار گرفته، جقدر است؟

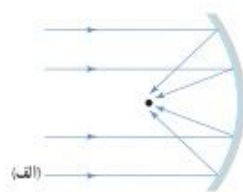
پاسخ: الف) با استفاده از رابطه $\lambda = v/f$ داریم:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1520 \times 10^3 \text{ m/s}}{100 \times 10^3 \text{ s}^{-1}} = 15.2 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.52 \text{ cm}$$

همان‌طور که بعداً در بحث پراش خواهیم دید برای تشخیص یک جسم، اندازه آن باید در حدود طول موج به کار رفته یا بزرگ‌تر از آن باشد. بنابراین، وال اجسامی در حدود این طول موج یا بزرگ‌تر را می‌تواند تشخیص دهد.

ب) زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و مانع برابر است با:

$$t = \frac{x}{v} = \frac{2L}{v} = \frac{2 \times 10 \text{ m}}{1520 \times 10^3 \text{ m/s}} = 0.132 \text{ s}$$



الف)



ب)

شکل ۹-۴ الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کار در نقطه‌ای مقابل سطح، کانونی می‌شود. ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

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

امواج الکترومغناطیسی تخت تابیده به یک سطح کاو پس از بازتابش، مانند شکل ۹-۴ الف در یک نقطه کانونی می‌شوند. این نمونه دیگری از بازتاب در سه بعد است. از همین سازوکار برای دریافت امواج رادیویی توسط آنتن‌های بشقابی و با امواج فروسرخ برای گرم کردن آب یا مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی (شکل ۹-۴ ب) استفاده می‌شود.

فعالیت ۳-۴

رادار دوبلری: از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی پژواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید.



الف)



ب)

شکل ۹-۴ الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح، کانونی می‌شود. ب) تصویری از یک اجاق خورشیدی

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

امواج الکترومغناطیسی تخت تابیده به یک سطح کاو پس از بازتابش، مانند شکل ۹-۴ الف در یک نقطه کانونی می‌شوند. این نمونه دیگری از بازتاب در سه بعد است. از همین سازوکار برای دریافت امواج رادیویی توسط آنتن‌های بشقابی و با امواج فروسرخ برای گرم کردن آب یا مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی (شکل ۹-۴ ب) استفاده می‌شود.

فعالیت ۳-۴

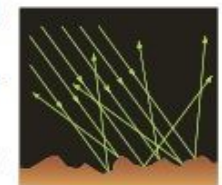
رادار دوبلری: از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی پژواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید.



فیزيك ۳

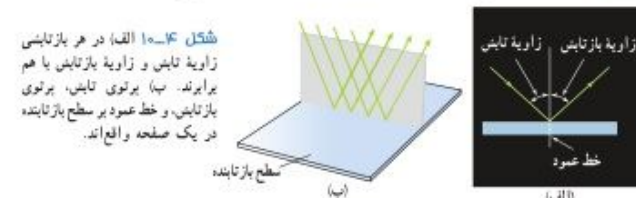


کریستین هویگس (۱۶۹۵-۱۶۲۹م.)
در لاهه هلند به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیمن و پرا تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله‌های در زمینه ریاضی و اخترشناسی نوشت که مورد توجه ره دکارت، ریاضی‌دان نامی، قرار گرفت. هویگس در زمان خود دانشمندی با دوق و منکر بود. در سال ۱۶۵۷ ساعت‌آونگی را اختراع کرد که پیش از آن دانشمندان مانند گالیله روی آن کار کرده بودند، اما به جای نرسیده بودند. علاوه بر این، او پژوهش‌های با ارزش روی نور نیز انجام داد و نظریه مشهور 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 یا موج‌های روی آب تشبیه کرد. نظریه موجی 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 اخترشناس برجسته‌ای نیز بود و اسباب‌ها و دستگاه‌های نوری زیادی را اختراع کرد. اختراع روزنچ را نیز به او نسبت داده‌اند.



شکل ۱۱-۳ 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 بر توتی تابش، بر توتی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

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 ۱۱-۴). افزون بر این، برای نور مرئی نیز همچون سایر امواج، بر توتی تابش، بر توتی بازتابش و خط عمود بر سطح بازتابنده، در هر بازتابشی در یک صفحه واقع‌اند (شکل ۱۱-۴).



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. بر توتی‌های نور به‌طور کانونه‌ای از پستی و بلندی‌های سطح بازتابنده و در تمام جهات پراکنده می‌شوند (شکل ۱۱-۴). به دلیل این بازتاب است که شما این صفحه کاغذ، دیوار، دستان، دوست خود، و... را می‌بینید. در بازتاب آینه‌ای از یک آینه تخت، بازتابش یک دسته بر توتی موازی را فقط در یک جهت می‌توانید ببینید، ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته بر توتی موازی را می‌توانید در جهت‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که ابعاد ناهمواری‌های سطح در حدود طول موج نور یا بیشتر باشد؛ مثلاً یک کاغذ در ظاهر بسیار هموار به نظر می‌رسد اما از دید میکروسکوپی این سطح از اجزای متمایز و کوچکی تشکیل شده است که بسیار بزرگ‌تر از $1\mu\text{m}$ هستند. با توجه به اینکه طول موج نور مرئی در حدود $0.5\mu\text{m}$ است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می‌شود. در مقابل، ناهمواری‌های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچک‌تر از $1\mu\text{m}$ است و بنابراین برای نور مرئی سطوحی هموار محسوب می‌شوند.

۲-۴ شکست موج

رنگ‌های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و... مثال‌های رایجی از شکسته شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به اندازه موج‌های نوری اهمیت ندارد. وقتی موج به مرز جدایی دو محیط می‌رسد بخشی از آن بازتابیده می‌شود و بخشی دیگر عبور می‌کند که این افزون بر جذب موج است که در هر دو محیط رخ می‌دهد؛ مثلاً عبور یک تب در طول طنای را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی

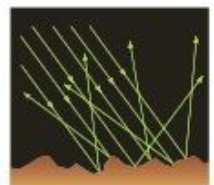
۱= specular reflection

۲= diffuse reflection

فیزيك ۳

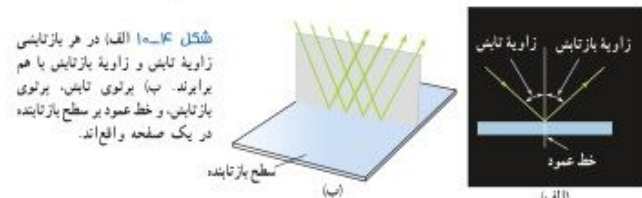


کریستین هویگس (۱۶۹۵-۱۶۲۹م.)
در لاهه هلند به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیمن و پرا تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله‌های در زمینه ریاضی و اخترشناسی نوشت که مورد توجه ره دکارت، ریاضی‌دان نامی، قرار گرفت. هویگس در زمان خود دانشمندی با دوق و منکر بود. در سال ۱۶۵۷ ساعت‌آونگی را اختراع کرد که پیش از آن دانشمندان مانند گالیله روی آن کار کرده بودند، اما به جای نرسیده بودند. علاوه بر این، او پژوهش‌های با ارزش روی نور نیز انجام داد و نظریه مشهور 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 یا موج‌های روی آب تشبیه کرد. نظریه موجی 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 اخترشناس برجسته‌ای نیز بود و اسباب‌ها و دستگاه‌های نوری زیادی را اختراع کرد. اختراع روزنچ را نیز به او نسبت داده‌اند.



شکل ۱۱-۳ 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 بر توتی تابش، بر توتی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

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 ۱۱-۴). افزون بر این، برای نور مرئی نیز همچون سایر امواج، بر توتی تابش، بر توتی بازتابش و خط عمود بر سطح بازتابنده، در هر بازتابشی در یک صفحه واقع‌اند (شکل ۱۱-۴).



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. بر توتی‌های نور به‌طور کانونه‌ای از پستی و بلندی‌های سطح بازتابنده، و در تمام جهات پراکنده می‌شوند (شکل ۱۱-۴). به دلیل این بازتاب است که شما این صفحه کاغذ، دیوار، دستان، دوست خود، و... را می‌بینید. در بازتاب آینه‌ای از یک آینه تخت، بازتابش یک دسته بر توتی موازی را فقط در یک جهت می‌توانید ببینید، ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته بر توتی موازی را می‌توانید در جهت‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که ابعاد ناهمواری‌های سطح در حدود طول موج نور یا بیشتر باشد؛ مثلاً یک کاغذ در ظاهر بسیار هموار به نظر می‌رسد اما از دید میکروسکوپی این سطح از اجزای متمایز و کوچکی تشکیل شده است که بسیار بزرگ‌تر از $1\mu\text{m}$ هستند. با توجه به اینکه طول موج نور مرئی در حدود $0.5\mu\text{m}$ است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می‌شود. در مقابل، ناهمواری‌های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچک‌تر از $1\mu\text{m}$ است و بنابراین برای نور مرئی سطوحی هموار محسوب می‌شوند.

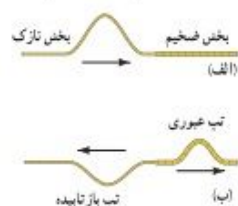
۲-۴ شکست موج

رنگ‌های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و... مثال‌های رایجی از شکسته شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به اندازه موج‌های نوری اهمیت ندارد. وقتی موج به مرز جدایی دو محیط می‌رسد بخشی از آن بازتابیده می‌شود و بخشی دیگر عبور می‌کند که این افزون بر جذب موج است که در هر دو محیط رخ می‌دهد؛ مثلاً عبور یک تب در طول طنای را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی

۱= specular reflection

۲= diffuse reflection

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

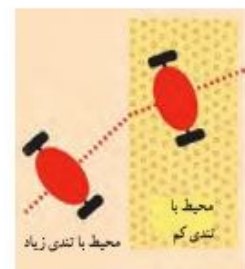


شکل ۱۳-۴ الف) تپ فرودی از سمت چپ طاب وارد بخش ضخیم تر آن می‌شود. ب) بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۱۳-۴ الف)، بخشی از این تپ بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۱۳-۴ ب). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط جسمه موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطه $\lambda = v/f$ ، طول موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

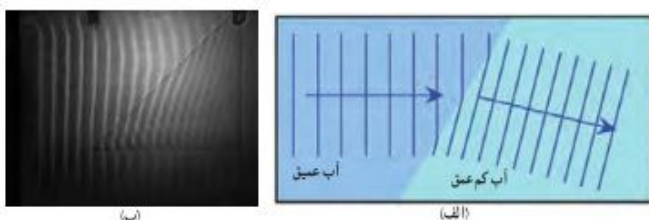
پرسش ۱-۴

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



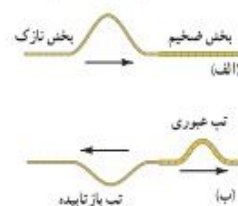
شکل ۱۳-۴ الف) وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا جری که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.

در حالت‌های دو به 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 کم عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش از جبهه موج که زودتر به ناحیه کم عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیه جبهه موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصله بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۱۳-۴ در مرز دو ناحیه تغییر جهت می‌دهند. این مطلب را می‌توان در نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیب‌دار نیز مشاهده کرد که با رسیدن جبهه‌های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می‌شود، جهت انتشار جبهه‌های موج تغییر می‌کند. شاید برای تفهیم این موضوع، مثال یک اسباب‌بازی چرخ‌دار که با عبور از کف صاف اتاق وارد قالیچه‌ای می‌شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب‌بازی به قالیچه، تندی آن کم می‌شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می‌کند (شکل ۱۳-۴).



شکل ۱۳-۴ الف) طرحی از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم عمق در تشت موج و ب) تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تشت موج

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج

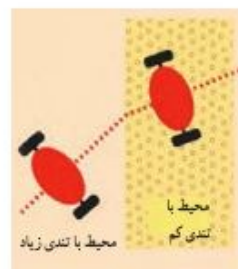


شکل ۱۳-۴ الف) تپ فرودی از سمت چپ طاب وارد بخش ضخیم تر آن می‌شود. ب) بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۱۳-۴ الف)، بخشی از این تپ بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۱۳-۴ ب). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط جسمه موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطه $\lambda = v/f$ ، طول موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

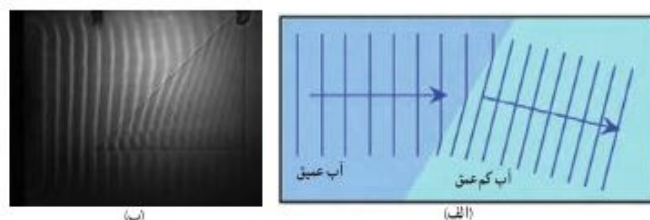
پرسش ۱-۴

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



شکل ۱۳-۴ الف) وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا جری که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.

در حالت‌های دو به 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 کم عمق، 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 کم عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش از جبهه موج که زودتر به ناحیه کم عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیه جبهه موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصله بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۱۳-۴ در مرز دو ناحیه تغییر جهت می‌دهند. این مطلب را می‌توان در نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیب‌دار نیز مشاهده کرد که با رسیدن جبهه‌های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می‌شود، جهت انتشار جبهه‌های موج تغییر می‌کند. شاید برای تفهیم این موضوع، مثال یک اسباب‌بازی چرخ‌دار که با عبور از کف صاف اتاق وارد قالیچه‌ای می‌شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب‌بازی به قالیچه، تندی آن کم می‌شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می‌کند (شکل ۱۳-۴).



شکل ۱۳-۴ الف) طرحی از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم عمق در تشت موج و ب) تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تشت موج

فیزیک ۳

جدول ۱-۴ ضریب شکست چند ماده مختلف *

محیط	ضریب شکست
خلاء	دقیقاً ۱
هوا (شرایط متعارف)	۱/۰۰۰۲۹
یخ	۱/۳۲
آب (۲۰°C)	۱/۳۳
استون	۱/۳۶
اتانول	۱/۳۶
محلول آب قند (۳۰٪)	۱/۳۸
محلول آب قند (۸۰٪)	۱/۴۹
بنزن	۱/۵۰
پلاستیک پلیکسی گلاس	۱/۵۱
شیشه خالص	۱/۵۲
سدیم کلرید (شک خوراکی)	۱/۵۴
کوارتز (SiO ₂)	۱/۵۴
الماس	۲/۴۲

* برای طول موج ۵۸۹nm (نور زرد سدیم)

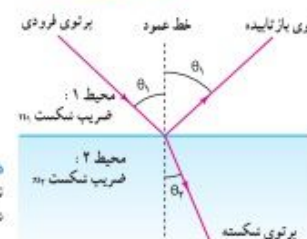
که در آن c تندی نور در خلاء با مقدار دقیق $۲۹۹\ ۷۹۲\ ۴۵۸\text{ m/s}$ است که در محاسبات، آن را برابر با $۳/۰۰ \times ۱۰^۸\text{ m/s}$ در نظر می گیریم؛ چون تندی نور در خلاء بیشترین تندی ممکن است، ضریب شکست همواره بزرگ تر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلاء است). جدول ۱-۴ ضریب شکست برای چند ماده مختلف را به دست می دهد. بنابراین برای دو محیط خاص ۱ و ۲، ضریب شکست ها به ترتیب $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ است که v_1 و v_2 تندی نور در آن دو محیط است. حال اگر پرتوی نوری از محیط ۱ با زاویه تابش θ_1 وارد محیط ۲ شود و با زاویه θ_2 شکست پیدا کند (شکل ۱-۴)، از قانون شکست عمومی (رابطه ۱-۴) درمی یابیم:

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

و یا

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{(قانون شکست اسنل)} \quad (۳-۴)$$

این رابطه را به افتخار فیزیک دان هلندی، ویلبرد اسنل (۱۶۲۶-۱۵۸۰م.) که آن را به طور تجربی کشف کرد، قانون شکست اسنل می نامند.



شکل ۱-۴ طرحی از بازتاب و شکست نور، در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفاف دیگر

فیزیک ۳

جدول ۱-۴ ضریب شکست چند ماده مختلف *

محیط	ضریب شکست
خلاء	دقیقاً ۱
هوا (شرایط متعارف)	۱/۰۰۰۲۹
یخ	۱/۳۲
آب (۲۰°C)	۱/۳۳
استون	۱/۳۶
اتانول	۱/۳۶
محلول آب قند (۳۰٪)	۱/۳۸
محلول آب قند (۸۰٪)	۱/۴۹
بنزن	۱/۵۰
پلاستیک پلیکسی گلاس	۱/۵۱
شیشه خالص	۱/۵۲
سدیم کلرید (شک خوراکی)	۱/۵۴
کوارتز (SiO ₂)	۱/۵۴
الماس	۲/۴۲

* برای طول موج ۵۸۹nm (نور زرد سدیم)

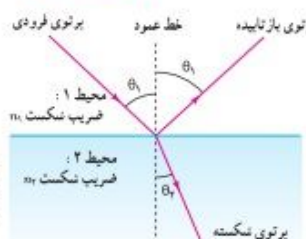
که در آن c تندی نور در خلاء با مقدار دقیق $۲۹۹\ ۷۹۲\ ۴۵۸\text{ m/s}$ است که در محاسبات، آن را برابر با $۳/۰۰ \times ۱۰^۸\text{ m/s}$ در نظر می گیریم؛ چون تندی نور در خلاء بیشترین تندی ممکن است، ضریب شکست همواره بزرگ تر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلاء است). جدول ۱-۴ ضریب شکست برای چند ماده مختلف را به دست می دهد. بنابراین برای دو محیط خاص ۱ و ۲، ضریب شکست ها به ترتیب $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ است که v_1 و v_2 تندی نور در آن دو محیط است. حال اگر پرتوی نوری از محیط ۱ با زاویه تابش θ_1 وارد محیط ۲ شود و با زاویه θ_2 شکست پیدا کند (شکل ۱-۴)، از قانون شکست عمومی (رابطه ۱-۴) درمی یابیم:

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

و یا

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{(قانون شکست اسنل)} \quad (۳-۴)$$

این رابطه را به افتخار فیزیک دان هلندی، ویلبرد اسنل (۱۶۲۶-۱۵۸۰م.) که آن را به طور تجربی کشف کرد، قانون شکست اسنل می نامند.



شکل ۱-۴ طرحی از بازتاب و شکست نور، در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفاف دیگر

مثال ۲-۴

پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیغه شیشه ای متوازی السطوحی، با زاویه تابش $۶۰/۰^\circ$ فرود می آید. الف) زاویه شکست (θ_2) پرتو در شیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_3) پرتو از شیشه چقدر است؟

پاسخ: الف) برای ورود پرتوی نور از هوا به شیشه قانون شکست اسنل را به کار می بریم. با توجه به جدول ۱-۴ ضریب شکست هوا $n_1 = ۱/۰۰$ و ضریب شکست شیشه $n_2 = ۱/۵۲$ است.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (۱/۰۰)(\sin ۶۰/۰^\circ) = (۱/۵۲)(\sin \theta_2)$$

$$\sin \theta_2 = ۰/۵۶۹۸ \Rightarrow \theta_2 = ۳۴/۷^\circ$$

ب) برای خروج پرتوی نور از شیشه نیز دوباره قانون اسنل را به کار می بریم. توجه کنید که زاویه تابش در اینجا برابر زاویه شکست در شیشه است؛ یعنی $\theta_1 = \theta_2$.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (۱/۵۲)(۰/۵۶۹۸) = (۱/۰۰)(\sin \theta_3)$$

$$\sin \theta_3 = ۰/۸۶۶۱ \Rightarrow \theta_3 = ۶۰/۰^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می توانستید مقدار θ_3 را بیابید.

مثال ۲-۴

پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیغه شیشه ای متوازی السطوحی، با زاویه تابش $۶۰/۰^\circ$ فرود می آید. الف) زاویه شکست (θ_2) پرتو در شیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_3) پرتو از شیشه چقدر است؟

پاسخ: الف) برای ورود پرتوی نور از هوا به شیشه قانون شکست اسنل را به کار می بریم. با توجه به جدول ۱-۴ ضریب شکست هوا $n_1 = ۱/۰۰$ و ضریب شکست شیشه $n_2 = ۱/۵۲$ است.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (۱/۰۰)(\sin ۶۰/۰^\circ) = (۱/۵۲)(\sin \theta_2)$$

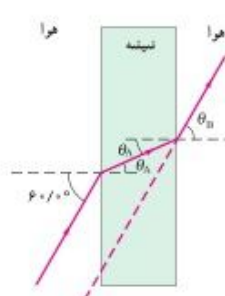
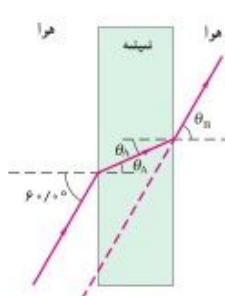
$$\sin \theta_2 = ۰/۵۶۹۸ \Rightarrow \theta_2 = ۳۴/۷^\circ$$

ب) برای خروج پرتوی نور از شیشه نیز دوباره قانون اسنل را به کار می بریم. توجه کنید که زاویه تابش در اینجا برابر زاویه شکست در شیشه است؛ یعنی $\theta_1 = \theta_2$.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow (۱/۵۲)(۰/۵۶۹۸) = (۱/۰۰)(\sin \theta_3)$$

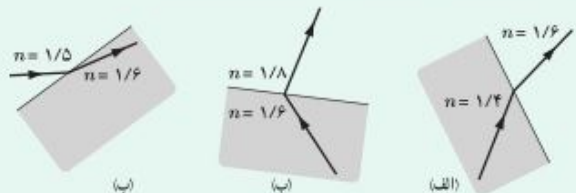
$$\sin \theta_3 = ۰/۸۶۶۱ \Rightarrow \theta_3 = ۶۰/۰^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می توانستید مقدار θ_3 را بیابید.



پرسش ۳-۴

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



(ب)

(ب)

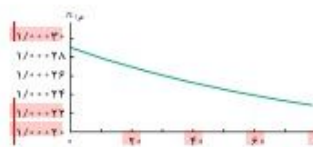
(الف)

فعالیت ۴-۴

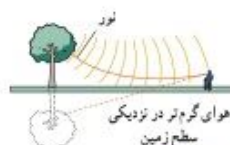
اندازه‌گیری ضریب شکست : با توجه به مثال ۲-۴، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغه متوازی‌السطوح شفاف را اندازه گرفت.



شکل ۴-۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده



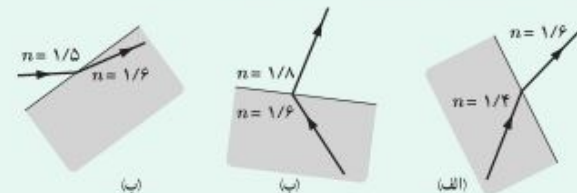
شکل ۴-۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما



شکل ۴-۲۱ مدل‌سازی پدیده سراب به کمک جبهه‌های موج. ناظری که برتوهای نور در پدیده سراب به چشم می‌رسد، گمان می‌برد که این برتوها از یک تصویر آمده‌اند.

پرسش ۳-۴

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



(ب)

(ب)

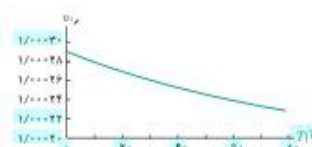
(الف)

فعالیت ۴-۴

اندازه‌گیری ضریب شکست : با توجه به مثال ۲-۴، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغه متوازی‌السطوح شفاف را اندازه گرفت.



شکل ۴-۱۹ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده



شکل ۴-۲۰ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

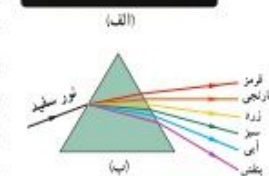
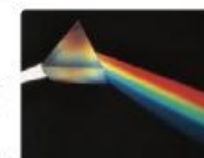


شکل ۴-۲۱ مدل‌سازی پدیده سراب به کمک جبهه‌های موج. ناظری که برتوهای نور در پدیده سراب به چشم می‌رسد، گمان می‌برد که این برتوها از یک تصویر آمده‌اند.

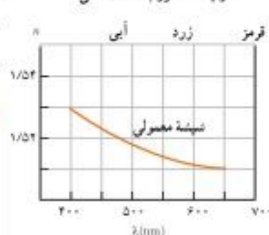
فیزيك ۳۳



شکل ۳۴-۱۷ الف) خیدگی اغراق آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم به سمت هوای گرم تر پایین می‌رود. ب) تغییر جبهه‌های موج و خیدگی مربوط به آن، به این دلیل رخ می‌دهد که انتهای بایین جبهه‌های موج در هوای گرم تر سریع‌تر حرکت می‌کنند. ب) خیدگی اغراق آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم تر به سمت هوای گرم بالا می‌رود.



شکل ۳۴-۱۸ الف) پاریکه‌ای از نور سفید که بر یک منشور شیشه‌ای تابیده است. به مؤلفه‌های رنگی خود بانسیده است. ب) طرحی از بانسیدگی نور سفید در یک منشور با قاعده مثلثی

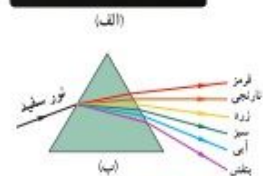


شکل ۳۴-۱۹ تغییرات ضریب شکست در طیف مرئی نور بر حسب طول موج برای نمونه معمولی

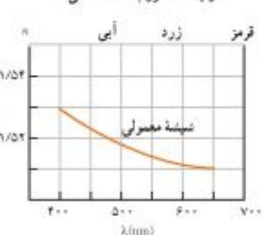
فیزيك ۳۳



شکل ۳۴-۱۷ الف) خیدگی اغراق آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم به سمت هوای گرم تر پایین می‌رود. ب) تغییر جبهه‌های موج و خیدگی مربوط به آن، به این دلیل رخ می‌دهد که انتهای بایین جبهه‌های موج در هوای گرم تر سریع‌تر حرکت می‌کنند. ب) خیدگی اغراق آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم تر به سمت هوای گرم بالا می‌رود.



شکل ۳۴-۱۸ الف) پاریکه‌ای از نور سفید که بر یک منشور شیشه‌ای تابیده است. به مؤلفه‌های رنگی خود بانسیده است. ب) طرحی از بانسیدگی نور سفید در یک منشور با قاعده مثلثی

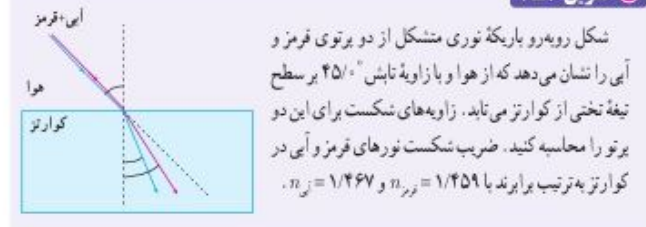


شکل ۳۴-۱۹ تغییرات ضریب شکست در طیف مرئی نور بر حسب طول موج برای نمونه معمولی

پاشندگی نور: همان‌طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی باریکه نور سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۲۳-۴ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به جز خلأ به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی باریکه نوری شامل پرتوهایی با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، **پاشندگی نور** می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط معین برای طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۲۴-۴ این وابستگی ضریب شکست به طول موج نور را برای شیشه معمولی نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار اگر مثلاً دو باریکه نور آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد شیشه شوند باریکه آبی بیشتر از باریکه قرمز خم می‌شود.

اگر باریکه نور سفید از هوا بر یک سطح شیشه‌ای فرود آید بر اثر شکست نور، مؤلفه‌های سازنده باریکه نور سفید هر کدام به میزان متفاوتی خم می‌شوند که البته این تفاوت چندان محسوس نیست. برای افزایش جدایی رنگ‌ها در پاشندگی نور، معمولاً از یک منشور با سطح مقطع مثلثی استفاده می‌کنیم. پاشندگی ناچیز در سطح اول، سپس با پاشندگی در سطح دوم افزایش می‌یابد و مؤلفه‌های رنگی نور سفید به‌طور محسوسی از هم جدا می‌شوند (شکل ۲۳-۴ ب).

نمونه ۴-۴



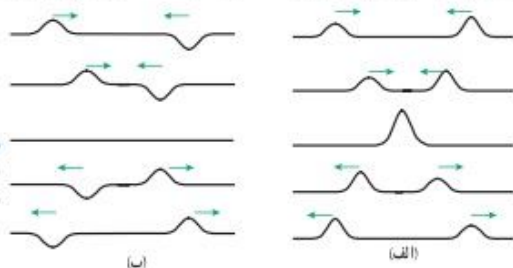
شکل رویه‌رو باریکه نوری متشکل از دو پرتوی قرمز و آبی را نشان می‌دهد که از هوا با زاویه تابش 45° بر سطح تیغه تختی از کوارتز می‌تابد. زاویه‌های شکست برای این دو پرتو را محاسبه کنید. ضریب شکست نورهای قرمز و آبی در کوارتز به ترتیب برابرند با $n_{\text{قرمز}} = 1/459$ و $n_{\text{آبی}} = 1/467$.

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

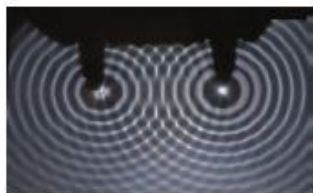
۴-۴ تداخل امواج

وقتی در تالاری به نوای موسیقی گوش می‌دهید، امواج صوتی حاصل از سازهای مختلف به‌طور هم‌زمان به گوشتان می‌رسد. الکترون‌ها در آنتن گیرنده‌های رادیو و تلویزیون تحت تأثیر هم‌زمان امواج الکترومغناطیسی زیادی که از فرستنده‌های مختلف ارسال می‌شوند، به حرکت می‌افتند. آب یک دریاچه یا بندرگاه ممکن است بر اثر تأثیر هم‌زمان موج‌هایی که به دنبال تعداد زیادی قایق در حال حرکت به‌راه می‌افتند، متلاطم شود. اینها همگی نمودهایی از اصل برهم‌نهی امواج هستند که بیان می‌دارد وقتی چندین موج به‌طور هم‌زمان بر ناحیه‌ای از فضا تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برای مجموع اثرهای مجزای هر یک از آنها است.

شکل ۴-۲۸، عکس‌های دو تب را که در جهت‌های مخالف هم در یک ریسمان کشیده شده حرکت می‌کنند در چند لحظه متوالی نشان می‌دهد. وقتی این تب‌ها به هم می‌رسند و با یکدیگر همپوشانی می‌کنند، بنا بر اصل برهم‌نهی، تب برآیند با مجموع دو تب برابر است. توجه کنید چه برای تب‌ها و چه برای موج‌هایی که همپوشانی می‌کنند، آنها به هیچ وجه شکل و حرکت یکدیگر را تغییر نمی‌دهند، و بنابراین پس از همپوشانی، بدون هرگونه تغییر شکلی به حرکت خود ادامه می‌دهند. به ترکیب موج‌ها با یکدیگر، تداخل می‌گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که هم‌زمان از یک منطقه عبور می‌کنند. در شکل ۴-۲۸ الف، تب‌ها هنگام همپوشانی تب بزرگ‌تری را ایجاد کرده‌اند که به آن تداخل سازنده می‌گویند، در حالی که در شکل ۴-۲۸ ب، تب‌ها هنگام همپوشانی اثر یکدیگر را حذف کرده‌اند که به آن تداخل ویرانگر می‌گویند. تداخل‌های سازنده و ویرانگر برای موج‌ها نیز همچون تب‌ها رخ می‌دهد که آن را در قسمت‌های بعدی بررسی خواهیم کرد.



شکل ۴-۲۸ در تب پیش‌رونده در جهت‌های مخالف هم در طول یک ریسمان کشیده که با یکدیگر الف) تداخل سازنده و ب) تداخل ویرانگر انجام می‌دهند.

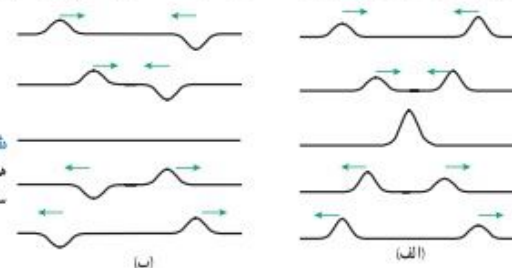


شکل ۴-۲۹ تداخل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج. هرگاه فاصله دو گوی از هم از طول موج بزرگ‌تر باشد چنین تفسی ایجاد می‌شود.

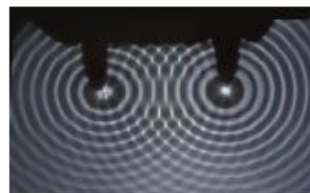
۴-۴ تداخل امواج

وقتی در تالاری به نوای موسیقی گوش می‌دهید، امواج صوتی حاصل از سازهای مختلف به‌طور هم‌زمان به گوشتان می‌رسد. الکترون‌ها در آنتن گیرنده‌های رادیو و تلویزیون تحت تأثیر هم‌زمان امواج الکترومغناطیسی زیادی که از فرستنده‌های مختلف ارسال می‌شوند، به حرکت می‌افتند. آب یک دریاچه یا بندرگاه ممکن است بر اثر تأثیر هم‌زمان موج‌هایی که به دنبال تعداد زیادی قایق در حال حرکت به‌راه می‌افتند، متلاطم شود. اینها همگی نمودهایی از اصل برهم‌نهی امواج هستند که بیان می‌دارد وقتی چندین موج به‌طور هم‌زمان بر ناحیه‌ای از فضا تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برای مجموع اثرهای مجزای هر یک از آنها است.

شکل ۴-۲۸، عکس‌های دو تب را که در جهت‌های مخالف هم در یک ریسمان کشیده شده حرکت می‌کنند در چند لحظه متوالی نشان می‌دهد. وقتی این تب‌ها به هم می‌رسند و با یکدیگر همپوشانی می‌کنند، بنا بر اصل برهم‌نهی، تب برآیند با مجموع دو تب برابر است. توجه کنید چه برای تب‌ها و چه برای موج‌هایی که همپوشانی می‌کنند، آنها به هیچ وجه شکل و حرکت یکدیگر را تغییر نمی‌دهند، و بنابراین پس از همپوشانی، بدون هرگونه تغییر شکلی به حرکت خود ادامه می‌دهند. به ترکیب موج‌ها با یکدیگر، تداخل می‌گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که هم‌زمان از یک منطقه عبور می‌کنند. در شکل ۴-۲۸ الف، تب‌ها هنگام همپوشانی تب بزرگ‌تری را ایجاد کرده‌اند که به آن تداخل سازنده می‌گویند، در حالی که در شکل ۴-۲۸ ب، تب‌ها هنگام همپوشانی اثر یکدیگر را حذف کرده‌اند که به آن تداخل ویرانگر می‌گویند. تداخل‌های سازنده و ویرانگر برای موج‌ها نیز همچون تب‌ها رخ می‌دهد که آن را در قسمت‌های بعدی بررسی خواهیم کرد.



شکل ۴-۲۸ در تب پیش‌رونده در جهت‌های مخالف هم در طول یک ریسمان کشیده که با یکدیگر الف) تداخل سازنده و ب) تداخل ویرانگر انجام می‌دهند.



شکل ۴-۲۹ تداخل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج. هرگاه فاصله دو گوی از هم از طول موج بزرگ‌تر باشد چنین تفسی ایجاد می‌شود.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج



هرمن فون هلمهولتز (۱۸۹۴-۱۸۴۲م.) در آلمان به دنیا آمد. او نخست به مطالعه زیان‌شناسی و فلسفه پرداخت و سپس به شست علوم طبیعی گرایش پیدا کرد. وی در سال ۱۸۴۹ دانشیار فیزیولوژی دانشگاه کونگزبرگ شد. در سال ۱۸۵۵ به استاد نامی رشته‌های آناتومی و فیزیولوژی دانشگاه گتینگن رسید. سه سال بعد به دانشگاه هایدلبرگ رفت و استاد فیزیولوژی آن دانشگاه شد. آخرین مقام دانشگاهی او، استادی فیزیک در دانشگاه برلین بود که از سال ۱۸۷۱ تا پایان عمر در آنجا خدمت کرد و شاگردان درخشانی چون هاینریش هرز، ویلم بین، آلبرت مایکسون، فردریش شاکلی و... تربیت کرد. هلمهولتز ناهای بزرگ بود که به علوم فیزیولوژی، تشریح، فیزیک و ریاضی تسلط داشت. برخی از اکتشاف‌های وی عبارتند از: اندازه‌گیری سرعت سیگنال‌های عصبی، تجزیه و تحلیل حرکت امواج صوتی، نظریه هادنگ‌های موسیقایی و نظریه دید رنگ‌ها. دستگاه الفالموسکوپ که امروزه در پزشکی از آن برای تشخیص بیماری‌های چشم استفاده می‌شود، از اختراعات اوست.

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز: اگر در دهانهٔ باریک یک بطری بدمید، می‌توانید آن را به صدا درآورید (شکل ۴-۴۰). در واقع یک بطری مانند یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدید می‌دهد. وقتی در دهانهٔ یک بطری می‌دمیم گسترهٔ وسیعی از بسامدها ایجاد می‌شود. حال اگر یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدید بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می‌شود. البته نوسان‌های بطری دقیقاً مانند نوسان‌هایی نیست که در یک لولهٔ صوتی ساده ایجاد می‌شود، زیرا بطری یک گردن دارد و هوای موجود در این گردن با هوای موجود در بقیهٔ قسمت‌های بطری چیزی موسوم به **تشدیدگر هلمهولتز** را تشکیل می‌دهد که این موجب نوسانات هوای درون بطری می‌شود. نوع اولیهٔ تشدیدگر هلمهولتز کورهایی توخالی با دهانه‌ای باز به شکل یک گردن است که در سال ۱۸۵۰ میلادی توسط دانشمند آلمانی، هرمن فون هلمهولتز، ساخته شد (شکل ۴-۴۱). تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدید می‌دهند. معنی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدید آنها باشد، تشدیدگر پاسخ قوی‌تری به این صوت می‌دهد.



شکل ۴-۴۰: یک دمیون در دهانهٔ یک بطری، می‌توانید آن را به صدا درآورید.



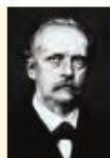
شکل ۴-۴۱: الف) طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و ب) تصویری از چند تشدیدگر هلمهولتز کروی با اندازه‌های متفاوت

فعالیت ۴-۶

یک بلندگو را در برابر دهانهٔ یک تشدیدگر هلمهولتز با بسامدهای تشدید معین قرار دهید و جلوی زائدهٔ خروجی آن یک شمع روشن یا یک فرقهٔ کوچک و کم‌اصطکاک بگذارید. بسامد صوت ایجاد شده توسط بلندگو را در نزدیکی بسامد تشدید تشدیدگر آن قدر کم و زیاد کنید تا شعلهٔ شمع، منحرف شود و یا فرقه شروع به چرخیدن کند. در صورتی که منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم ندارید می‌توانید از چند دیابازون با بسامدهای معلوم و متفاوت، که بسامد یکی از آنها با یکی از بسامدهای تشدید تشدیدگر برابر باشد، استفاده کنید.^۱ دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

۱- می‌توانید از برنده‌هایی با نام‌های Sound Generator و Signal Generator، Function Generator، Audio Generator که روی گونی همراه عصب می‌شوند نیز به عنوان منبع صوتی یا بسامد قابل تنظیم استفاده کنید.

فصل ۴: برهم‌کنش‌های موج



هرمن فون هلمهولتز (۱۸۹۴-۱۸۴۲م.) در آلمان به دنیا آمد. او نخست به مطالعه زیان‌شناسی و فلسفه پرداخت و سپس به شست علوم طبیعی گرایش پیدا کرد. وی در سال ۱۸۴۹ دانشیار فیزیولوژی دانشگاه کونگزبرگ شد. در سال ۱۸۵۵ به استاد نامی رشته‌های آناتومی و فیزیولوژی دانشگاه گتینگن رسید. سه سال بعد به دانشگاه هایدلبرگ رفت و استاد فیزیولوژی آن دانشگاه شد. آخرین مقام دانشگاهی او، استادی فیزیک در دانشگاه برلین بود که از سال ۱۸۷۱ تا پایان عمر در آنجا خدمت کرد و شاگردان درخشانی چون هاینریش هرز، ویلم بین، آلبرت مایکسون، فردریش شاکلی و... تربیت کرد. هلمهولتز ناهای بزرگ بود که به علوم فیزیولوژی، تشریح، فیزیک و ریاضی تسلط داشت. برخی از اکتشاف‌های وی عبارتند از: اندازه‌گیری سرعت سیگنال‌های عصبی، تجزیه و تحلیل حرکت امواج صوتی، نظریه هادنگ‌های موسیقایی و نظریه دید رنگ‌ها. دستگاه الفالموسکوپ که امروزه در پزشکی از آن برای تشخیص بیماری‌های چشم استفاده می‌شود، از اختراعات اوست.

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز: اگر در دهانهٔ باریک یک بطری بدمید، می‌توانید آن را به صدا درآورید (شکل ۴-۴۰). در واقع یک بطری مانند یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدید می‌دهد. وقتی در دهانهٔ یک بطری می‌دمیم گسترهٔ وسیعی از بسامدها ایجاد می‌شود. حال اگر یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدید بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می‌شود. البته نوسان‌های بطری دقیقاً مانند نوسان‌هایی نیست که در یک لولهٔ صوتی ساده ایجاد می‌شود، زیرا بطری یک گردن دارد و هوای موجود در این گردن با هوای موجود در بقیهٔ قسمت‌های بطری چیزی موسوم به **تشدیدگر هلمهولتز** را تشکیل می‌دهد که این موجب نوسانات هوای درون بطری می‌شود. نوع اولیهٔ تشدیدگر هلمهولتز کورهایی توخالی با دهانه‌ای باز به شکل یک گردن است که در سال ۱۸۵۰ میلادی توسط دانشمند آلمانی، هرمن فون هلمهولتز، ساخته شد (شکل ۴-۴۱). تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدید می‌دهند. معنی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدید آنها باشد، تشدیدگر پاسخ قوی‌تری به این صوت می‌دهد.



شکل ۴-۴۰: یک دمیون در دهانهٔ یک بطری، می‌توانید آن را به صدا درآورید.



شکل ۴-۴۱: الف) طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و ب) تصویری از چند تشدیدگر هلمهولتز کروی با اندازه‌های متفاوت

فعالیت ۴-۶

یک بلندگو را در برابر دهانهٔ یک تشدیدگر هلمهولتز با بسامدهای تشدید معین قرار دهید و جلوی زائدهٔ خروجی آن یک شمع روشن یا یک فرقهٔ کوچک و کم‌اصطکاک بگذارید. بسامد صوت ایجاد شده توسط بلندگو را در نزدیکی بسامد تشدید تشدیدگر آن قدر کم و زیاد کنید تا شعلهٔ شمع، منحرف شود و یا فرقه شروع به چرخیدن کند. در صورتی که منبع صوتی با بسامد قابل تنظیم ندارید می‌توانید از چند دیابازون با بسامدهای معلوم و متفاوت، که بسامد یکی از آنها با یکی از بسامدهای تشدید تشدیدگر برابر باشد، استفاده کنید.^۱ دلیل آنچه را که مشاهده می‌کنید در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

۱- می‌توانید از برنده‌هایی با نام‌های Sound Generator و Signal Generator، Function Generator، Audio Generator که روی گونی همراه عصب می‌شوند نیز به عنوان منبع صوتی یا بسامد قابل تنظیم استفاده کنید.

برش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

۴-۱ بازتاب موج

۱. دانش‌آموزی بین دو صخره قائم ایستاده 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.

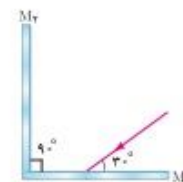
۲. اگر در فاصله مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونه جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان^۱ در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کوکولکان

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

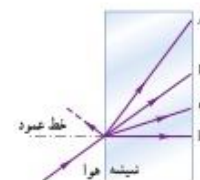
۴. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.



^۱ Kukulkan Temple

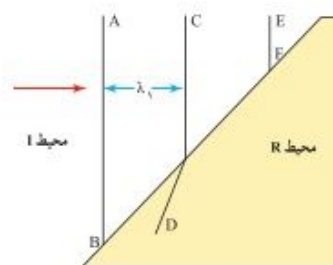
۴-۲ شکست موج

۱. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیب‌دار، تغییر می‌کند. ۲. شکل زیر پرتوی نوری را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟



۳. ضریب شکست آب $4/3$ و ضریب شکست شیشه $5/3$ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید. ۴. 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؟



برش‌ها و مسئله‌های فصل ۴

۴-۱ بازتاب موج

۱. دانش‌آموزی بین دو صخره قائم ایستاده 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.

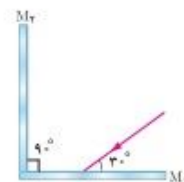
۲. اگر در فاصله مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونه جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی کوکولکان^۱ در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پله سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کوکولکان

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

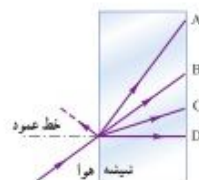
۴. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.



^۱ Kukulkan Temple

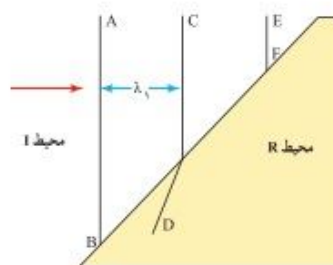
۴-۲ شکست موج

۱. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیب‌دار، تغییر می‌کند. ۲. شکل زیر پرتوی نوری را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟



۳. ضریب شکست آب $4/3$ و ضریب شکست شیشه $5/3$ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید. ۴. 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؟



فیزيك ۳۳

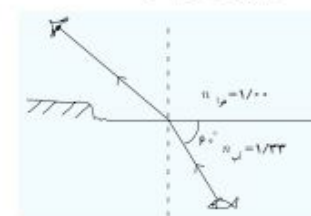
۹. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط باز می‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود. الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست یافته را با موج فرودی مقایسه کنید. ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست یافته را رسم کنید.



۱۰. طول موج نور قرمز لیزر هلیوم - نئون در هوا حدود 633nm است، ولی در زجاجیه چشم 474nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید. ۱۱. سکه‌ای را در گوشه فنجان خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. سپس بی‌آنکه سرتان را حرکت دهید به آرامی در فنجان آب بریزید، به طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرشدن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.



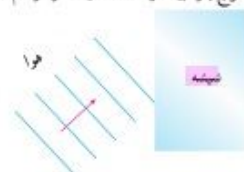
۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویه 60° به مرز آب - هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا چقدر است؟



۱۱۲

فیزيك ۳۳

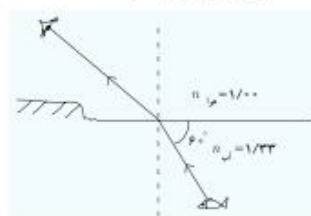
۹. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط باز می‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود. الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست یافته را با موج فرودی مقایسه کنید. ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست یافته را رسم کنید.



۱۰. طول موج نور قرمز لیزر هلیوم - نئون در هوا حدود 633nm است، ولی در زجاجیه چشم 474nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید. ۱۱. سکه‌ای را در گوشه فنجان خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. سپس بی‌آنکه سرتان را حرکت دهید به آرامی در فنجان آب بریزید، به طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرشدن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.

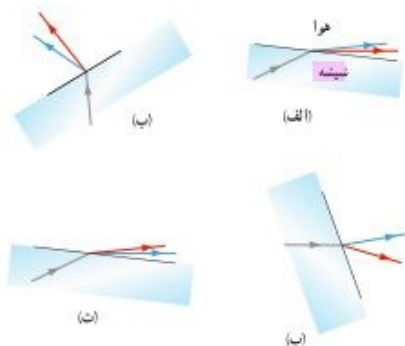


۱۲. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویه 60° به مرز آب - هوا برخورد کرده است. زاویه شکست این پرتو در هوا چقدر است؟



۱۱۲

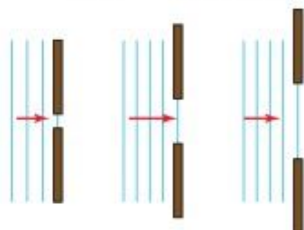
۱۳. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



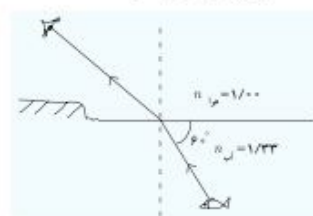
۱۴. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۳-۴ پراش موج

۱۵. در یک تشت موج، مطابق شکل زیر، موج تخی ایجاد شده است. توضیح دهید با باریک کردن شکاف‌ها چه شکلی برای جبهه‌های موج خروجی از آنها حاصل می‌شود.



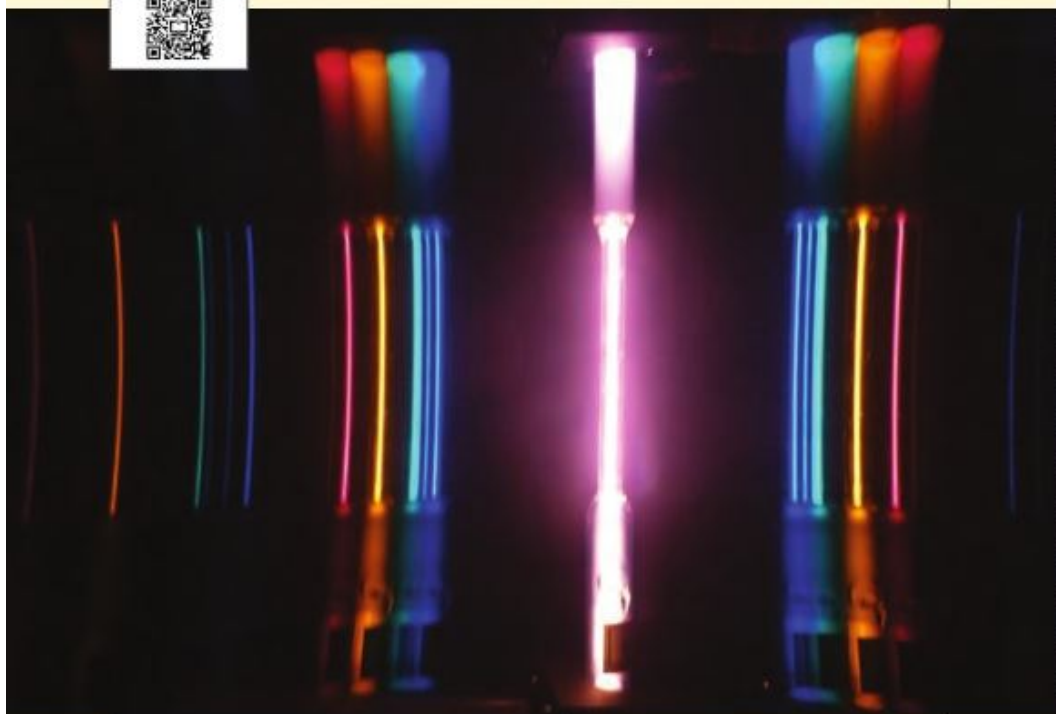
۱۶. گونی‌های همراه با امواج رادیویی با بسامد حدود 2GHz کار می‌کنند. توضیح دهید این امواج تحت چه شرایطی از موانع پراشیده می‌شوند و به منطقه سایه مانع می‌رسند.





فصل

آشنایی با فیزیک اتمی



چرا وقتی به الکترودهای دو سر لامپ‌های حاوی گاز رقیق و کم فشار عناصری مانند هیدروژن، هلیوم، جیوه یا نئون، ولتاژ بالایی را اعمال می‌کنیم شروع به گسیل نور به رنگ‌های مختلف می‌کنند؟

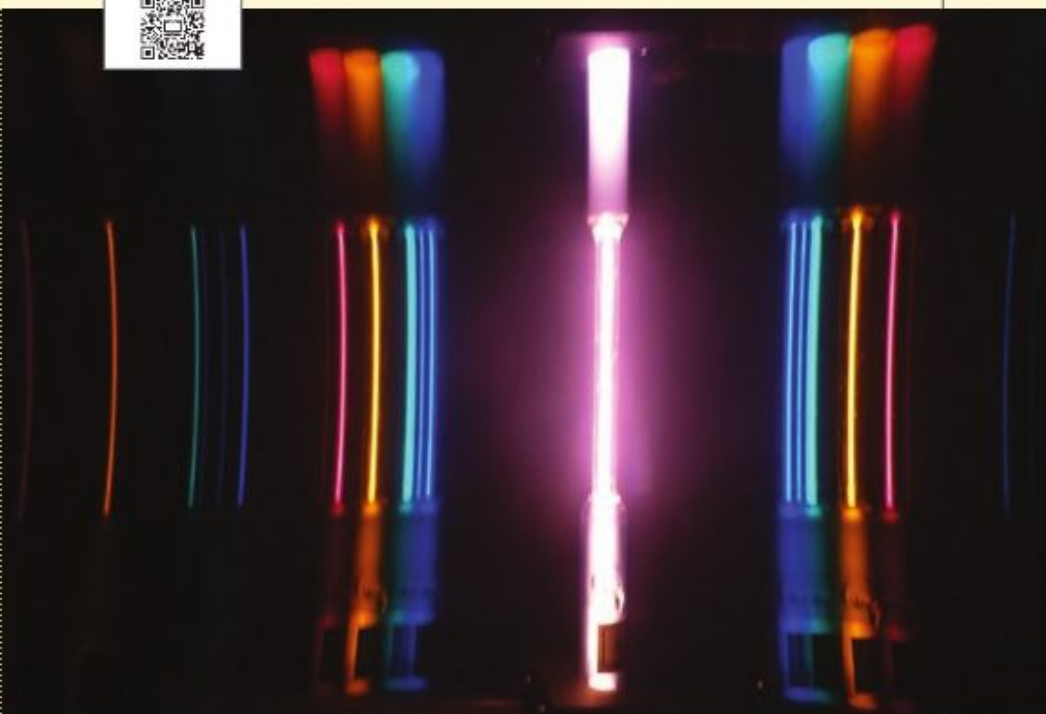
بخش‌ها

- ۱-۵ اثر فوتو الکتریک و فوتون
- ۲-۵ طیف خطی
- ۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور
- ۴-۵ لیزر



فصل

آشنایی با فیزیک اتمی



چرا وقتی به الکترودهای دو سر لامپ‌های حاوی گاز رقیق و کم فشار عناصری مانند هیدروژن، هلیوم، جیوه یا نئون، ولتاژ بالایی را اعمال می‌کنیم شروع به گسیل نور به رنگ‌های مختلف می‌کنند؟

بخش‌ها

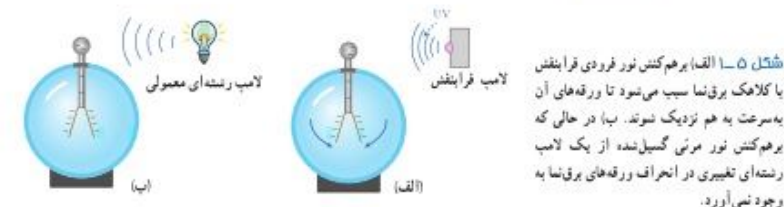
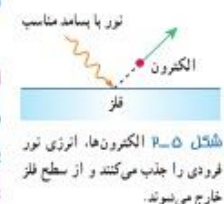
- ۱-۵ اثر فوتو الکتریک و فوتون
- ۲-۵ طیف خطی
- ۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور
- ۴-۵ لیزر

تا دهه‌های پایانی قرن نوزدهم، بیشتر حوزه‌های فیزیک، از جمله مکانیک نیوتونی، ترمودینامیک و نظریه الکترومغناطیس ماکسول که امروزه با نام فیزیک کلاسیک از آنها یاد می‌شود به 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 این فصل ضمن معرفی و بررسی برخی از پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک و طیف خطی گسیلی و جذبی از گازهای اتمی که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند، به معرفی الگوهای اتمی می‌پردازیم. در پایان نیز با لیزر و مبانی فیزیکی آن آشنا خواهیم شد.

۱-۵ اثر فوتوالکتریک و فوتون

اگر بر کلاهک یک برق‌نمای (الکتروسکوپ) با بار منفی، نور فرابنفش تابیده شود، مشاهده می‌شود که انحراف ورقه‌های آن کاهش می‌یابد (شکل ۱-۵ الف) در حالی که با تابش نور مرئی، تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نمای رخ نمی‌دهد (شکل ۱-۵ ب). چرا این پدیده اتفاق می‌افتد؟ آزمایش نشان می‌دهد وقتی نوری با بسامد مناسب مانند نور فرابنفش به سطح فلزی تابید الکترون‌هایی از آن گسیل می‌شوند (شکل ۱-۵ ج). این پدیده فیزیکی را، اثر فوتوالکتریک و الکترون‌های جدا شده از سطح فلز را فوتوالکترئون می‌نامند.



برای بررسی اثر فوتوالکتریک، طرح آزمایش ساده‌ای در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. در این دستگاه صفحه فلزی هدف T و جمع‌کننده فلزی C درون یک محفظه شیشه‌ای خلأ قرار دارند که از بیرون به یک گالوانومتر (آمپرسنج حساس) متصل شده‌اند. نور تکفام (تک بسامد) با بسامد به قدر کافی بالا بر صفحه T فرود می‌آید و تعدادی الکترون را آزاد می‌کند. این فوتوالکترئون‌ها به جمع‌کننده

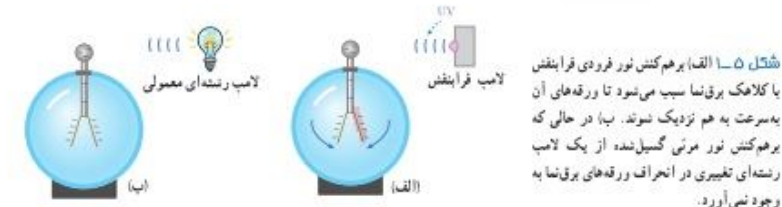
۱-۵ الف: T از سرحرف واژه Target به معنای هدف و نماد C از سرحرف واژه Collector به معنای جمع‌کننده گرفته شده است.

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 این فصل ضمن معرفی و بررسی برخی از پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک و طیف خطی گسیلی و جذبی از گازهای اتمی که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند، به معرفی الگوهای اتمی می‌پردازیم. در پایان نیز با لیزر و مبانی فیزیکی آن آشنا خواهیم شد.

۱-۵ اثر فوتوالکتریک و فوتون

اگر بر کلاهک برق‌نمای با بار منفی، نور فرابنفش تابیده شود، مشاهده می‌شود که انحراف ورقه‌های آن کاهش می‌یابد (شکل ۱-۵ الف) در حالی که با تابش نور مرئی، تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نمای رخ نمی‌دهد (شکل ۱-۵ ب). چرا این پدیده اتفاق می‌افتد؟ آزمایش نشان می‌دهد وقتی نوری با بسامد مناسب مانند نور فرابنفش به سطح فلزی تابید الکترون‌هایی از آن گسیل می‌شوند (شکل ۱-۵ ج). این پدیده فیزیکی را، اثر فوتوالکتریک و الکترون‌های جدا شده از سطح فلز را فوتوالکترئون می‌نامند.



برای بررسی اثر فوتوالکتریک، طرح آزمایش ساده‌ای در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. در این دستگاه صفحه فلزی هدف T و جمع‌کننده فلزی C درون یک محفظه شیشه‌ای خلأ قرار دارند که از بیرون به یک گالوانومتر (آمپرسنج حساس) متصل شده‌اند. نور تکفام (تک بسامد) با بسامد به قدر کافی بالا بر صفحه T فرود می‌آید و فوتوالکترئون‌ها را آزاد می‌کند. این فوتوالکترئون‌ها به جمع‌کننده

۱-۵ الف: T از سرحرف واژه Target به معنای هدف و نماد C از سرحرف واژه Collector به معنای جمع‌کننده گرفته شده است.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی



ماکس پلانک (۱۸۵۸-۱۹۴۷ م.)
در سال ۱۸۸۵ دانشیار فیزیک نظری
در دانشگاه کیل شد و علاوه بر تدریس،
مقاله‌های مهمی دربارهٔ ترمودینامیک
منتشر کرد. از کارهای او در زمینهٔ
توزیع طیف تابشی، که به نظریهٔ کوانتومی
انجامید، با اهدای جایزهٔ نوبل سال ۱۹۱۸
تقدیر شد. در سال‌های بعد، نوشته‌های
پلانک بیشتر در زمینهٔ موضوع‌های
مذهبی و فلسفی بود. درست در آستانهٔ
دورانیک پلانک از نظر حرفه‌ای مورد
تجسس همگان قرار گرفته بود، سلسله‌نامه
زندگی شخصی وی با نژادزی آمیخته
شد. به طوری که طی سال‌های ۱۹۰۹
تا ۱۹۱۹ هسر، پسر بزرگ و دخترهای
دوفلوریش به دلایل متفاوتی از دنیا رفتند.
پلانک در سال ۱۹۲۲، پس از حدود
چهل سال سابقهٔ دانشگاهی، از دانشگاه
برلین بازنشسته شد.



شکل ۵-۳ در اثر فوتوالکتریک، نوری تکفام با بسامدی
به قدر کافی بالا، الکترون‌ها را از سطح صفحه فلزی T
بیرون می‌آورد. این فوتوالکترتون‌ها، به طرف جمع‌کننده C
می‌روند و جریانی را در مدار به وجود می‌آورند.

C می‌رسند و در نتیجه گالوانومتر که در مدار قرار دارد جریانی را آشکار می‌کند. با افزایش شدت
این نور، گالوانومتر عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد، حال آنکه آزمایش نشان می‌دهد که اگر بسامد
نور فرودی از مقدار معینی کمتر باشد، هر چقدر هم که شدت نور فرودی افزایش یابد این پدیده رخ
نمی‌دهد و گالوانومتر عبور جریانی را نشان نمی‌دهد.

همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم، نور موجی الکترومغناطیسی است. بنابراین می‌توان انتظار داشت هنگام
برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی (نور فرودی) با سطح فلز، میدان الکتریکی این موج، نیروی $F = -eE$
به الکترون‌های فلز وارد کند و آنها را به نوسان وادارد. به این ترتیب، وقتی دامنهٔ نوسان برخی از الکترون‌ها
به قدر کافی بزرگ شود انرژی جنبشی لازم را برای جدا شدن از سطح فلز پیدا می‌کنند. بنا به این دیدگاه
کلاسیکی، این پدیده باید با هر بسامدی رخ دهد در حالی که این نتیجه با تجربه سازگار نیست.

یکی دیگر از پیامدهای نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول این است که شدت نور با مربع دامنهٔ میدان
الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($I \propto E^2$). به این ترتیب انتظار می‌رود به‌ازای یک
بسامد معین، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی
بیشتری از فلز خارج شوند. نتیجه‌ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند.

پس از نزدیک به ۲۰ سال که تلاش بسیاری از دانشمندان برای توجیه اثر فوتوالکتریک به کمک
مفاهیم و قانون‌های فیزیک کلاسیک به نتیجه نرسیده بود در سال ۱۹۰۵ اینشتین توضیحی قانع‌کننده
در مورد این اثر ارائه داد و جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۲۱ میلادی را به خاطر تبیین آن دریافت کرد.
اینشتین در نظریهٔ فوتوالکتریک خود با توجه به کارهای قبلی پلانک در زمینهٔ تابش گرمایی اجسام، فرض
کرد که نور با بسامد ν را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفت. هر بستهٔ انرژی، که
بعدها فوتون نامیده شد، دارای انرژی‌ای است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(۱-۵) \quad E = hf \quad (\text{انرژی فوتون})$$

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

بنا بر نظر اینشتین، وقتی نوری تکفام بر سطح فلزی می‌تابد، هر فوتون صرفاً با یکی از الکترون‌های
فلز برهم‌کنش می‌کند. اگر فوتون انرژی کافی داشته باشد تا فرایند خارج کردن الکترون از فلز را
انجام دهد، الکترون به طور آتی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرف
جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون خارج‌شده تبدیل می‌شود.

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

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی



آلبرت اینشتین (۱۸۷۹-۱۹۵۵ م.)
تا ۱۷ سالگی در آلمان تحصیل کرد ولی
با ناکامی گشتن سال آخر تحصیل خود،
آلمان را ترک کرد و به سوئیس رفت.
نظام آموزشی انعطاف‌پذیر سوئیس تحولی
شگرف در اینشتین ایجاد کرد و توانست
پس از پایان دبیرستان، در سال ۱۹۰۲ از
پلی تکنیک زوریخ، لیسانس فیزیک خود را
دریافت کند. در سال ۱۹۰۵ چندین مقالهٔ
مهم منتشر کرد. بعدها یکی از این مقاله‌ها
که در آن به توضیح اثر فوتوالکتریک
می‌پرداخت، جایزهٔ نوبل فیزیک را در سال
۱۹۲۱ برای او برآورد. یکی دیگر
از مقاله‌های او در سال ۱۹۰۵، ارائهٔ نظریهٔ
نسبیت خاص بود که دربرگیرندهٔ افشاهای
نو و انقلابی دربارهٔ ماهیت فضا و زمان بود.
اینشتین همچنین در سال ۱۹۱۵ مقاله‌ای
دربارهٔ نظریهٔ نسبیت عام منتشر کرد. او
در این مقاله نظریهٔ چندین دربارهٔ گرانش
ارائه کرد که نظریهٔ نیوتون را به چالش حالتی
خاص دربرمی‌گرفت.



آلبرت اینشتین (۱۸۷۹-۱۹۵۵ م.)
تا ۱۷ سالگی در آلمان تحصیل کرد ولی
با ناکامی گشتن سال آخر تحصیل خود،
آلمان را ترک کرد و به سوئیس رفت.
نظام آموزشی انعطاف‌پذیر سوئیس تحولی
شگرف در اینشتین ایجاد کرد و توانست
پس از پایان دبیرستان، در سال ۱۹۰۲ از
پلی تکنیک زوریخ، لیسانس فیزیک خود را
دریافت کند. در سال ۱۹۰۵ چندین مقالهٔ
مهم منتشر کرد. بعدها یکی از این مقاله‌ها
که در آن به توضیح اثر فوتوالکتریک
می‌پرداخت، جایزهٔ نوبل فیزیک را در سال
۱۹۲۱ برای او برآورد. یکی دیگر
از مقاله‌های او در سال ۱۹۰۵، ارائهٔ نظریهٔ
نسبیت خاص بود که دربرگیرندهٔ افشاهای
نو و انقلابی دربارهٔ ماهیت فضا و زمان بود.
اینشتین همچنین در سال ۱۹۱۵ مقاله‌ای
دربارهٔ نظریهٔ نسبیت عام منتشر کرد. او
در این مقاله نظریهٔ چندین دربارهٔ گرانش
ارائه کرد که نظریهٔ نیوتون را به چالش حالتی
خاص دربرمی‌گرفت.



شکل ۵-۳ در اثر فوتوالکتریک، نوری تکفام با بسامدی
به قدر کافی بالا، الکترون‌ها را از سطح صفحه فلزی T
بیرون می‌آورد. این فوتوالکترتون‌ها، به طرف جمع‌کننده C
می‌روند و جریانی را در مدار به وجود می‌آورند.

C می‌رسند و در نتیجه گالوانومتر که در مدار قرار دارد جریانی را آشکار می‌کند. با افزایش شدت
این نور، گالوانومتر عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد، حال آنکه آزمایش نشان می‌دهد که اگر بسامد
نور فرودی از مقدار معینی کمتر باشد، هر چقدر هم که شدت نور فرودی افزایش یابد این پدیده رخ
نمی‌دهد و گالوانومتر عبور جریانی را نشان نمی‌دهد.

همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم، نور موجی الکترومغناطیسی است. بنابراین می‌توان انتظار داشت هنگام
برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی (نور فرودی) با سطح فلز، میدان الکتریکی این موج، نیروی $F = -eE$
به الکترون‌های فلز وارد کند و آنها را به نوسان وادارد. به این ترتیب، وقتی دامنهٔ نوسان برخی از الکترون‌ها
به قدر کافی بزرگ شود انرژی جنبشی لازم را برای جدا شدن از سطح فلز پیدا می‌کنند. بنا به این دیدگاه
کلاسیکی، این پدیده باید با هر بسامدی رخ دهد در حالی که این نتیجه با تجربه سازگار نیست.

یکی دیگر از پیامدهای نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول این است که شدت نور با مربع دامنهٔ میدان
الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($I \propto E^2$). به این ترتیب انتظار می‌رود به‌ازای یک
بسامد معین، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی
بیشتری از فلز خارج شوند. نتیجه‌ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند.

پس از نزدیک به ۲۰ سال که تلاش بسیاری از دانشمندان برای توجیه اثر فوتوالکتریک به کمک
مفاهیم و قانون‌های فیزیک کلاسیک به نتیجه نرسیده بود در سال ۱۹۰۵ اینشتین توضیحی قانع‌کننده
در مورد این اثر ارائه داد و جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۲۱ میلادی را به خاطر تبیین آن دریافت کرد.
اینشتین در نظریهٔ فوتوالکتریک خود با توجه به کارهای قبلی پلانک در زمینهٔ تابش گرمایی اجسام، فرض
کرد که نور با بسامد ν را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفت. هر بستهٔ انرژی، که
بعدها فوتون نامیده شد، دارای انرژی‌ای است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(۱-۵) \quad E = hf \quad (\text{انرژی فوتون})$$

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

بنا بر نظر اینشتین، وقتی نوری تکفام بر سطح فلزی می‌تابد، هر فوتون صرفاً با یکی از الکترون‌های
فلز برهم‌کنش می‌کند. اگر فوتون انرژی کافی داشته باشد تا فرایند خارج کردن الکترون از فلز را
انجام دهد، الکترون به طور آتی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرف
جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون خارج‌شده تبدیل می‌شود.

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

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

مثال ۱-۵

یک چشمه نور مرئی با توان 100 W ، فوتون‌هایی با طول موج $\lambda = 550\text{ nm}$ گسیل می‌کند.

(الف) انرژی هر فوتون را برحسب الکترون ولت محاسبه کنید.

(ب) چه تعداد فوتون در هر ثانیه از این چشمه نور گسیل می‌شود؟

پاسخ: (الف) از رابطه 150 eV انرژی هر فوتون برابر است با:

ابتدا مقدار hc را حساب می‌کنیم:

$$hc = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1.99 \times 10^{-25} \text{ J.m}$$

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

$$hc = (1.99 \times 10^{-25} \text{ J.m}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) \left(\frac{1 \text{ nm}}{10^{-9} \text{ m}} \right) = 1.24 \times 10^3 \text{ eV.nm}$$

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

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

$$E = \frac{1.24 \times 10^3 \text{ eV.nm}}{550 \text{ nm}} = 2.25 \text{ eV}$$

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

$$E = pt = (100 \text{ W})(1 \text{ s}) = 100 \text{ J} = (100 \text{ J}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 6.25 \times 10^{20} \text{ eV}$$

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

به دست می‌دهد. به این ترتیب داریم:

$$n = \frac{6.25 \times 10^{20} \text{ eV}}{2.25 \text{ eV}} = 2.78 \times 10^{20}$$

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

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

مثال ۲-۵

تابع کار طلا برابر 5.20 eV است.

(الف) بسامد کمینه نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح این فلز را پیدا کنید.

(ب) طول موج آستانه (طول موج متناظر با بسامد آستانه f_0) را به دست آورید.

پاسخ: (الف) بسامد کمینه نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا برابر بسامد آستانه است. بنابراین از رابطه 4.5 داریم:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{5.20 \text{ eV}}{4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}} = 1.26 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

فوتون‌های نوری که بسامد آنها بیشتر از $f = 1.26 \times 10^{15} \text{ Hz}$ است، انرژی کافی برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا

را دارند.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{ch}{W_0} = \frac{(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s})}{5.20 \text{ eV}} = 2.38 \times 10^{-7} \text{ m} = 238 \text{ nm}$$

(ب)

طول موج متناظر با این بسامد تقریباً 239 nm به دست آمد که در ناحیه فرابنفش طیف الکترومغناطیسی قرار دارد.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

مثال ۱-۵

یک چشمه نور مرئی با توان 100 W ، فوتون‌هایی با طول موج $\lambda = 550\text{ nm}$ گسیل می‌کند.

(الف) انرژی هر فوتون را برحسب الکترون ولت محاسبه کنید.

(ب) چه تعداد فوتون در هر ثانیه از این چشمه نور گسیل می‌شود؟

پاسخ: (الف) از رابطه 150 eV انرژی هر فوتون برابر است با:

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

ابتدا مقدار hc را حساب می‌کنیم:

$$hc = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1.99 \times 10^{-25} \text{ J.m}$$

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

$$hc = (1.99 \times 10^{-25} \text{ J.m}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) \left(\frac{1 \text{ nm}}{10^{-9} \text{ m}} \right) = 1.24 \times 10^3 \text{ eV.nm}$$

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

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

$$E = \frac{1.24 \times 10^3 \text{ eV.nm}}{550 \text{ nm}} = 2.25 \text{ eV}$$

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

$$E = pt = (100 \text{ W})(1 \text{ s}) = 100 \text{ J} = (100 \text{ J}) \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 6.25 \times 10^{20} \text{ eV}$$

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

به دست می‌دهد. به این ترتیب داریم:

$$n = \frac{6.25 \times 10^{20} \text{ eV}}{2.25 \text{ eV}} = 2.78 \times 10^{20}$$

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

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

مثال ۲-۵

(الف) تابع کار طلا برابر 5.20 eV است. بسامد کمینه نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح این فلز را پیدا کنید.

(ب) طول موج آستانه (طول موج متناظر با بسامد آستانه f_0) را به دست آورید.

پاسخ: (الف) بسامد کمینه نور برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا برابر بسامد آستانه است. بنابراین از رابطه 4.5 داریم:

$$f_0 = \frac{W_0}{h} = \frac{5.20 \text{ eV}}{4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}} = 1.26 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

فوتون‌های نوری که بسامد آنها بیشتر از $f = 1.26 \times 10^{15} \text{ Hz}$ است، انرژی کافی برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح طلا

را دارند.

(ب) از رابطه $\lambda_0 = c/f_0$ ، طول موج متناظر با این بسامد تقریباً 239 nm به دست می‌آید که در ناحیه فرابنفش طیف الکترومغناطیسی

قرار دارد.

فیزیک ۳

مثال ۳-۵

نوری با طول موج 240 nm به سطحی از جنس تنگستن با تابع کار 4.52 eV می‌تابد.

(الف) بسامد نور فرودی و بسامد آستانه را برای تنگستن پیدا کنید.

(ب) پیشینه تندی فوتوالکتردهای خارج شده از تنگستن را حساب کنید. (جرم الکترون را $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ بگیرید.)

پاسخ: (الف) از رابطه $f = c/\lambda$ ، بسامد متناظر با طول موج نور فرودی را به دست می‌آوریم:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{240 \times 10^{-9} \text{ m}} = 1.25 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

همچنین بنا به رابطه ۳-۵، بسامد آستانه برای سطحی از جنس تنگستن برابر است با:

$$f_c = \frac{W_c}{h} = \frac{4.52 \text{ eV}}{4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}} = 1.09 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

چون بسامد نور فرودی بیشتر از بسامد آستانه است ($f > f_c$)، برهم کنش فوتون‌های نور فرودی با الکترون‌های سطح تنگستن،

سبب خارج شدن و ترک فوتوالکتردهای از سطح آن می‌شود.

(ب) ابتدا پیشینه انرژی جنبشی فوتوالکتردهای گسیل شده را از رابطه ۳-۵ محاسبه می‌کنیم. به این ترتیب داریم:

$$K_{\max} = hf - W_c = \frac{hc}{\lambda} - W_c = \frac{1.24 \times 10^3 \text{ eV.nm}}{240 \text{ nm}} - 4.52 \text{ eV} = 0.646 \text{ eV}$$

با تبدیل یکای مقدار به دست آمده بر حسب ژول داریم:

$$K_{\max} = (0.646 \text{ eV}) \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 1.03 \times 10^{-19} \text{ J}$$

به این ترتیب از رابطه $K_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$ ، پیشینه تندی فوتوالکتردهای خارج شده برابر است با:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.03 \times 10^{-19} \text{ J}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 4.75 \times 10^5 \text{ m/s}$$

تمرین ۱-۵

طول موج آستانه برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر 254 nm است.

(الف) تابع کار این فلز بر حسب الکترون ولت چقدر است؟

(ب) توضیح دهید که آیا اثر فوتوالکتریک به ازای طول موج‌های کوچک‌تر، مساوی یا بزرگ‌تر از 254 nm مشاهده خواهد شد.

تمرین ۲-۵

در پدیده فوتوالکتریک برای فلز روی،

(الف) بلندترین طول موجی را پیدا کنید که سبب گسیل فوتوالکتردها می‌شود.

(ب) وقتی نوری با طول موج 220 nm با سطح این فلز برهم کنش کند، پیشینه تندی فوتوالکتردها چقدر است؟

فیزیک ۳

مثال ۳-۵

نوری با طول موج 240 nm به سطحی از جنس تنگستن با تابع کار 4.52 eV می‌تابد.

(الف) بسامد نور فرودی و بسامد آستانه را برای تنگستن پیدا کنید.

(ب) پیشینه تندی فوتوالکتردهای خارج شده از تنگستن را حساب کنید. (جرم الکترون را $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ بگیرید.)

پاسخ: (الف) از رابطه $f = c/\lambda$ ، بسامد متناظر با طول موج نور فرودی را به دست می‌آوریم:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{240 \times 10^{-9} \text{ m}} = 1.25 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

همچنین بنا به رابطه ۳-۵، بسامد آستانه برای سطحی از جنس تنگستن برابر است با:

$$f_c = \frac{W_c}{h} = \frac{4.52 \text{ eV}}{4.14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}} = 1.09 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

چون بسامد نور فرودی بیشتر از بسامد آستانه است ($f > f_c$)، برهم کنش فوتون‌های نور فرودی با الکترون‌های سطح تنگستن،

سبب خارج شدن و ترک فوتوالکتردهای از سطح آن می‌شود.

(ب) ابتدا پیشینه انرژی جنبشی فوتوالکتردهای گسیل شده را از رابطه ۳-۵ محاسبه می‌کنیم. به این ترتیب داریم:

$$K_{\max} = hf - W_c = \frac{hc}{\lambda} - W_c = \frac{1.24 \times 10^3 \text{ eV.nm}}{240 \text{ nm}} - 4.52 \text{ eV} = 0.646 \text{ eV}$$

با تبدیل یکای مقدار به دست آمده بر حسب ژول داریم:

$$K_{\max} = (0.646 \text{ eV}) \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \right) = 1.03 \times 10^{-19} \text{ J}$$

به این ترتیب از رابطه $K_{\max} = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$ ، پیشینه تندی فوتوالکتردهای خارج شده برابر است با:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2K_{\max}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.03 \times 10^{-19} \text{ J}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 4.75 \times 10^5 \text{ m/s}$$

تمرین ۱-۵

طول موج آستانه برای اثر فوتوالکتریک در یک فلز معین برابر 254 nm است.

(الف) تابع کار این فلز بر حسب الکترون ولت چقدر است؟

(ب) توضیح دهید که آیا اثر فوتوالکتریک به ازای طول موج‌های کوچک‌تر، مساوی یا بزرگ‌تر از 254 nm مشاهده خواهد شد.

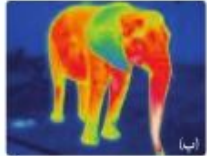
تمرین ۲-۵

در پدیده فوتوالکتریک برای فلز روی،

(الف) بلندترین طول موجی را پیدا کنید که سبب گسیل فوتوالکتردها می‌شود.

(ب) وقتی نوری با طول موج 220 nm با سطح این فلز برهم کنش کند، پیشینه تندی فوتوالکتردها چقدر است؟

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی



شکل ۵-۵ (الف) اجسام در دمای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می کنند. (ب) در دمای معمولی، بیشتر تابش گسیل شده از سطح اجسام در ناحیه فروسرخ طیف قرار دارد.

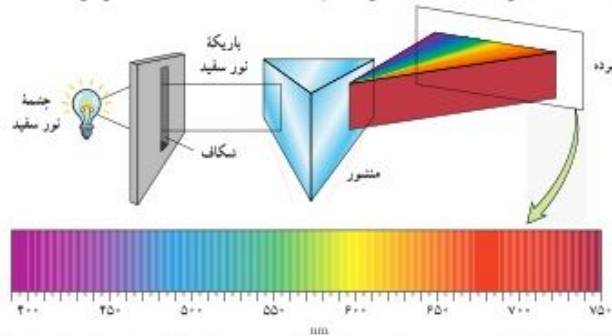


آلبرت اینشتین (۱۸۷۹-۱۹۵۵ م.) تا ۱۷ سالگی در آلمان تحصیل کرد ولی با ناتوانی گذشتن سال آخر تحصیل خود، آلمان را ترک کرد و به سوئیس رفت. نظام آموزشی اعطاف پدر سوئیس نجوی نگراف در اینشتین ایجاد کرد و توانست پس از پایان دبیرستان، در سال ۱۹۰۴ از پلی تکنیک زوریخ، لیسانس فیزیک خود را دریافت کند. در سال ۱۹۰۵ چندین مقاله مهم منتشر کرد. بعدها یکی از این مقاله ها که در آن به توضیح اثر فوتوالکتریک می پرداخت، جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۲۱ برای او به ارمغان آورد. یکی دیگر از مقاله های او در سال ۱۹۰۵، ارائه نظریه نسبیت خاص بود که دربرگیرنده آنبشه ای نو و انقلابی درباره ماهیت فضا و زمان بود. اینشتین همچنین در سال ۱۹۱۵ مقاله ای درباره نظریه نسبیت عام منتشر کرد. او در این مقاله نظریه جدیدی درباره گرانش ارائه کرد که نظریه نوتون را به عنوان حالتی خاص دربرمی گرفت.

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

۲-۵ طیف خطی

در فیزیک ۱ دیدیم که همه اجسام در هر دمایی که باشند، از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل (نشر) می کنند که به آن **تابش گرمایی** گفته می شود (شکل ۵-۵). برای یک جسم جامد، نظیر رشته داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گستره پیوسته ای از طول موج ها است. به همین دلیل طیف ایجاد شده در این شرایط را **طیف گسیلی پیوسته** یا به اختصار **طیف پیوسته** می نامند. بخشی از این طیف که در گستره مرئی طول موج ها واقع است در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، ناشی از برهم کنش قوی بین اتم های سازنده آن است. حال آنکه گازهای کم فشار و رقیق، که اتم های متفرق آنها از برهم کنش های قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسسته را گسیل می کنند که شامل طول موج های معینی است. این طیف گسسته را، معمولاً **طیف گسیلی خطی** یا به اختصار **طیف خطی** می نامند و طول موج های ایجاد شده در آن، برای اتم های هر گاز منحصر به فرد هستند و سرنخ های مهمی را درباره نوع و ساختار اتم های آن گاز به دست می دهند. دو نمونه آشنا از گازهای کم فشار و رقیق، در لامپ های نئون و لامپ های جیوه ای وجود دارد. شکل ۷-۵ قسمت های مرئی طیف های خطی این دو گاز را نشان می دهد. طول موج های مرئی خاصی که اتم های این گازها گسیل می کنند به تابلوهای تونی و لامپ های جیوه ای رنگ های مشخصی می دهند.

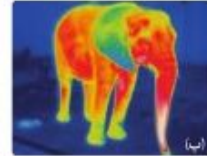


شکل ۵-۶ طیف گسیلی پیوسته نور سفید از رشته داغ یک لامپ روشن. در این شکل تنها بخش مرئی طیف نشان داده شده است که گستره طول موج آن از حدود ۴۰۰ nm تا حدود ۷۵۰ nm (نور قرمز) است.



شکل ۷-۵ طیف های گسیلی خطی برای نئون و جیوه

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

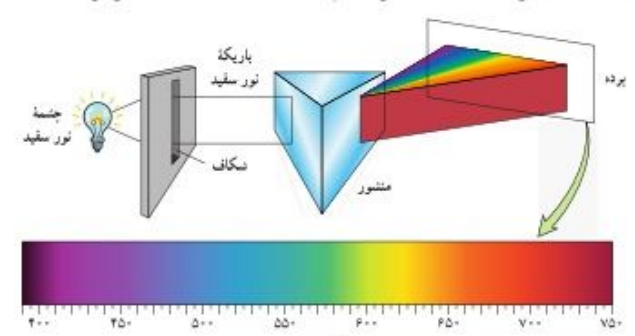


شکل ۵-۵ (الف) اجسام در دمای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می کنند. (ب) در دمای معمولی، بیشتر تابش گسیل شده از سطح اجسام در ناحیه فروسرخ طیف قرار دارد.

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

۲-۵ طیف خطی

در فیزیک ۱ دیدیم که همه اجسام در هر دمایی که باشند، از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل (نشر) می کنند که به آن **تابش گرمایی** گفته می شود (شکل ۵-۵). برای یک جسم جامد، نظیر رشته داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گستره پیوسته ای از طول موج ها است. به همین دلیل طیف ایجاد شده در این شرایط را **طیف گسیلی پیوسته** یا به اختصار **طیف پیوسته** می نامند. بخشی از این طیف که در گستره مرئی طول موج ها واقع است در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، ناشی از برهم کنش قوی بین اتم های سازنده آن است. حال آنکه گازهای کم فشار و رقیق، که اتم های متفرق آنها از برهم کنش های قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسسته را گسیل می کنند که شامل طول موج های معینی است. این طیف گسسته را، معمولاً **طیف گسیلی خطی** یا به اختصار **طیف خطی** می نامند و طول موج های ایجاد شده در آن، برای اتم های هر گاز منحصر به فرد هستند و سرنخ های مهمی را درباره نوع و ساختار اتم های آن گاز به دست می دهند. دو نمونه آشنا از گازهای کم فشار و رقیق، در لامپ های نئون و لامپ های جیوه ای وجود دارد. شکل ۷-۵ قسمت های مرئی طیف های خطی این دو گاز را نشان می دهد. طول موج های مرئی خاصی که اتم های این گازها گسیل می کنند به تابلوهای تونی و لامپ های جیوه ای رنگ های مشخصی می دهند.



شکل ۵-۶ طیف گسیلی پیوسته نور سفید از رشته داغ یک لامپ روشن. در این شکل تنها بخش مرئی طیف نشان داده شده است که گستره طول موج آن از حدود ۴۰۰ nm تا حدود ۷۵۰ nm (نور قرمز) است.



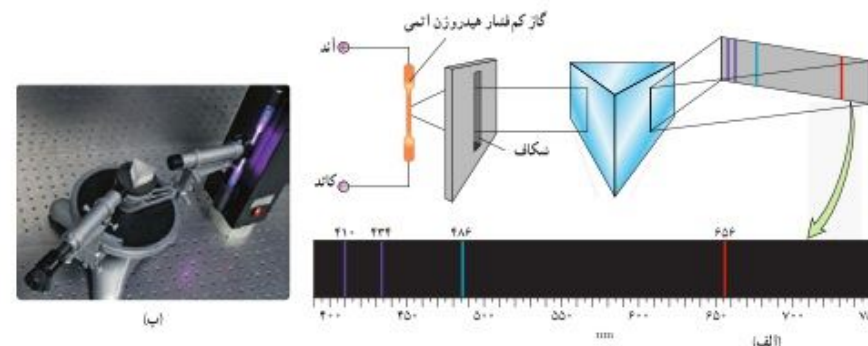
شکل ۷-۵ طیف های گسیلی خطی برای نئون و جیوه

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیوم، سدیم و نئون معمولاً از یک لامپ باریک و بلند شیشه‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم‌فشار است استفاده می‌شود. دو الکترود به نام‌های آند و کاتد در دو طرف این لامپ قرار دارد که به ترتیب به پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. این ولتاژ بالا، سبب تخلیه الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لامپ شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجادشده و همچنین رنگ نور گسیل‌شده، به نوع گاز درون لامپ بستگی دارد. در میان طیف گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی هم از جنبه تاریخی و هم از جنبه نظری اهمیت خاصی دارد. طیف خطی این گاز در ناحیه مرئی، شامل یک رشته منظم از خط‌هایی است که محل آنها در شکل ۸-۵ نشان داده شده است. در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضی‌دان سوئیس، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج هر یک از خط‌های شناخته‌شده مربوط به طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی را به دست می‌داد. این رابطه عبارت است از:

$$\lambda = \left(\frac{364}{56nm} \right) \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad \text{(معادله بالمر)} \quad (8-5)$$

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

$$\begin{aligned} n=3 &\rightarrow \lambda_1 = 656/20 nm \quad \text{(خط قرمز)} \\ n=4 &\rightarrow \lambda_2 = 486/08 nm \quad \text{(خط آبی)} \\ n=5 &\rightarrow \lambda_3 = 434/00 nm \quad \text{(خط بنفش)} \\ n=6 &\rightarrow \lambda_4 = 410/13 nm \quad \text{(خط بنفش)} \end{aligned}$$



شکل ۸-۵ الف) به کمک منشور، طول‌موج‌های گسیلی از گاز، از یکدیگر جدا و طیف خطی آن تشکیل شده است. ب) اسباب آزمایش تشکیل و مشاهده طیف گسیلی گازها



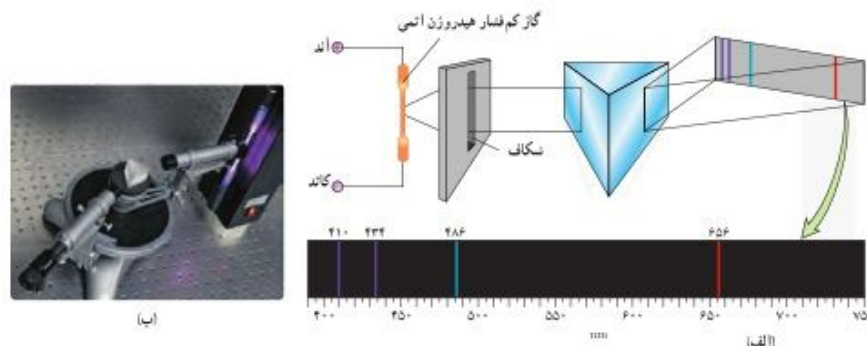
[ژان بآلر (۱۸۲۵-۱۸۹۸ م.)]
ریاضی‌دان و فیزیک‌دان سوئیس، در سال ۱۸۲۹ دوره دکتری خود را در حوزه ریاضیات در دانشگاه بازل به پایان رسانید. وی پس از پایان تحصیلات، در یک مدرسه دخترانه و همچنین دانشگاه بازل مشغول به تدریس شد. مشهورترین کار بالمر در خصوص مطالعه طیف اتمی گازها بود. به طوری که وی در سال ۱۸۸۵ و در سن ۶۰ سالگی موفق شد رابطه‌ای تجربی برای طیف گسیلی خطی اتم‌های هیدروژن ارائه دهد. این رابطه امروزه به نام وی معروف است. بالمر برای ارائه این رابطه از داده‌های آنکستروم، فیزیک‌دان سوئدی، در خصوص اندازه‌گیری طول‌موج‌های طیف خطی هیدروژن اتمی در ناحیه مرئی بهره گرفت.

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیوم، سدیم و نئون معمولاً از یک لامپ باریک و بلند شیشه‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم‌فشار است استفاده می‌شود. دو الکترود به نام‌های آند و کاتد در دو طرف این لامپ قرار دارد که به ترتیب به پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. این ولتاژ بالا، سبب تخلیه الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لامپ شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجادشده و همچنین رنگ نور گسیل‌شده، به نوع گاز درون لامپ بستگی دارد. در میان طیف گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی هم از جنبه تاریخی و هم از جنبه نظری اهمیت خاصی دارد. طیف خطی این گاز در ناحیه مرئی، شامل یک رشته منظم از خط‌هایی است که محل آنها در شکل ۸-۵ نشان داده شده است. در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضی‌دان سوئیس، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج هر یک از خط‌های شناخته‌شده مربوط به طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی را به دست می‌داد. این رابطه عبارت است از:

$$\lambda = \left(\frac{364}{56nm} \right) \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad \text{(معادله بالمر)} \quad (8-5)$$

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

$$\begin{aligned} n=3 &\rightarrow \lambda_1 = 656/20 nm \quad \text{(خط قرمز)} \\ n=4 &\rightarrow \lambda_2 = 486/08 nm \quad \text{(خط آبی)} \\ n=5 &\rightarrow \lambda_3 = 434/00 nm \quad \text{(خط بنفش)} \\ n=6 &\rightarrow \lambda_4 = 410/13 nm \quad \text{(خط بنفش)} \end{aligned}$$



شکل ۸-۵ الف) به کمک منشور، طول‌موج‌های گسیلی از گاز، از یکدیگر جدا و طیف خطی آن تشکیل شده است. ب) اسباب آزمایش تشکیل و مشاهده طیف گسیلی گازها

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

بالمر با تأمل بیشتر روی رابطه ۵-۵، پیشنهاد کرد که ممکن است رشته‌های دیگری از خط‌هایی که تا آن زمان در طیف هیدروژن دیده نشده‌اند وجود داشته باشند. ریدبرگ، فیزیک‌دان سوئدی، در راستای همین موضوع تلاش فراوانی برای کامل‌تر کردن طیف گسیلی خطی هیدروژن انجام داد و در سال ۱۸۸۸ میلادی معادله بالمر را به‌صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

$$(۵-۶) \quad \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (\text{معادله ریدبرگ})$$

که در آن R ثابت ریدبرگ و مقدار آن برابر $1.0973731 \times 10^7 \text{ (nm)}^{-1}$ است و برای سادگی در محاسبات، مقدار آن را می‌توان $1.1 \times 10^7 \text{ (nm)}^{-1}$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح متبنی است که به‌ازای $n'=2$ رابطه ۵-۵ مربوط به رشته بالمر به‌دست می‌آید که در ناحیه مرئی طیف قرار دارد. چندین سال پس از 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^۱. در جدول ۵-۲ نام این رشته‌ها، که به‌ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۵-۲ رشته خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطه ریدبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیه طیف
لیمان	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
هنوند	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 پژوهش‌هایی برای یافتن این رشته‌ها شد. به‌طوری‌که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و هنوند و همچنین خط‌های باقی‌مانده رشته لیمان به‌تدریج کشف شدند.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی



جوهانس رابرت ریدبرگ (۱۸۵۲-۱۹۲۷ م.) فیزیک‌دان و متخصص طیف‌سنجی، در سوئد به دنیا آمد. هنگامی که ۴ ساله بود پدرش از دنیا رفت و خانواده وی مجبور شدند با درآمد اندکی زندگی خود را بچیری کنند. در سال ۱۸۷۲ دوره دبیرستان را با نمرات ممتاز در فیزیک و ریاضی به پایان رسانید و در همان سال در دانشگاه لاند ثبت نام کرد. وی در سال ۱۸۷۹ دوره دکترای خود را به پایان رساند. پس از آن به تدریس ریاضیات و فیزیک مشغول شد و در همین دوران بود که به مطالعه وزن استاندارد اتمی عناصر در جدول تناوبی مندلیف پرداخت. کار جدی وی پژوهش درباره طیف اتمی گازها بود که به ارائه رابطه‌ای برای اصلاح معادله تجربی بالمر در خصوص طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی منجر شد. این رابطه امروزه به نام وی شناخته می‌شود. ریدبرگ در سال ۱۹۱۳ تندیس آینه‌دار نوبل و پس از یک دوره طولانی بیماری در سال ۱۹۲۹ درگذشت.

بالمر با تأمل بیشتر روی رابطه ۵-۵، پیشنهاد کرد که ممکن است رشته‌های دیگری از خط‌هایی که تا آن زمان در طیف هیدروژن دیده نشده‌اند وجود داشته باشند. ریدبرگ، فیزیک‌دان سوئدی، در راستای همین موضوع تلاش فراوانی برای کامل‌تر کردن طیف گسیلی خطی هیدروژن انجام داد و در سال ۱۸۸۸ میلادی معادله بالمر را به‌صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

$$(۵-۶) \quad \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > n' \quad (\text{معادله ریدبرگ})$$

که در آن R ثابت ریدبرگ و مقدار آن برابر $1.0973731 \times 10^7 \text{ (nm)}^{-1}$ است و برای سادگی در محاسبات، مقدار آن را می‌توان $1.1 \times 10^7 \text{ (nm)}^{-1}$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح متبنی است که به‌ازای $n'=2$ رابطه ۵-۵ مربوط به رشته بالمر به‌دست می‌آید که در ناحیه مرئی طیف قرار دارد. چندین سال پس از 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^۱. در جدول ۵-۲ نام این رشته‌ها، که به‌ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.

جدول ۵-۲ رشته خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطه ریدبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیه طیف
لیمان	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
هنوند	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 پژوهش‌هایی برای یافتن این رشته‌ها شد. به‌طوری‌که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و هنوند و همچنین خط‌های باقی‌مانده رشته لیمان به‌تدریج کشف شدند.

فیزیک ۳

مثال ۴-۵

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 واقع‌اند^۱.

پاسخ: در رشتهٔ براکت ($n' = 4$) و برای اولین و دومین خط طیفی به ترتیب $n = 6$ و $n = 5$ است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۴-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2} \right) = R \left(\frac{1}{16} - \frac{1}{25} \right) \Rightarrow \lambda = 4050 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{6^2} \right) = R \left(\frac{1}{16} - \frac{1}{36} \right) \Rightarrow \lambda = 4861 \text{ nm}$$

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

مثال ۵-۵

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

پاسخ: کوتاه‌ترین طول موج، با $n = \infty$ متناظر است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۴-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{\infty} \right) = \frac{R}{25} \Rightarrow \lambda = 2273 \text{ nm}$$

همچنین بلندترین طول موج این رشته، متناظر با $n = 6$ است. در این صورت داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{6^2} \right) = \frac{11R}{900} \Rightarrow \lambda = 7434 \text{ nm}$$

تمرین ۳-۵

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 واقع‌اند.

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

^۱ مشابه این مثال و مثال‌های دیگر، باید مقدار n' مربوط به هر رشته هنگام ارزیابی داده شود و لازم نیست دانش‌آموزان n' مربوط به رشته‌های مختلف را حفظ کنند.

فیزیک ۳

مثال ۴-۵

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 واقع‌اند^۱.

پاسخ: در رشتهٔ براکت ($n' = 4$) و برای اولین و دومین خط طیفی به ترتیب $n = 6$ و $n = 5$ است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۴-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{5^2} \right) = R \left(\frac{1}{16} - \frac{1}{25} \right) \Rightarrow \lambda = 4050 \text{ nm}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{6^2} \right) = R \left(\frac{1}{16} - \frac{1}{36} \right) \Rightarrow \lambda = 4861 \text{ nm}$$

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

مثال ۵-۵

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

پاسخ: کوتاه‌ترین طول موج، با $n = \infty$ متناظر است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۴-۵ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{\infty} \right) = \frac{R}{25} \Rightarrow \lambda = 2273 \text{ nm}$$

همچنین بلندترین طول موج این رشته، متناظر با $n = 6$ است. در این صورت داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{6^2} \right) = \frac{11R}{900} \Rightarrow \lambda = 7434 \text{ nm}$$

تمرین ۳-۵

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 واقع‌اند.

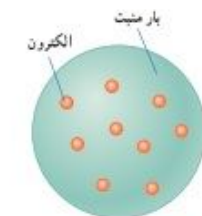
معادلهٔ ریذریگ که برگرفته از داده‌های تجربی است، طول موج‌هایی را به دست می‌دهد که هیدروژن اتمی در طیف الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. ولی مدل‌های اتمی رایج آن زمان در خصوص اینکه چرا تنها طول موج‌های معینی توسط هیدروژن اتمی تابش می‌شود، پاسخی نداشتند. نیلز بور، فیزیک‌دان دانمارکی (۱۸۸۵-۱۹۶۲ م.) با اصلاح مدل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

^۱ مشابه این مثال و مثال‌های دیگر، باید مقدار n' مربوط به هر رشته هنگام ارزیابی داده شود و لازم نیست دانش‌آموزان n' مربوط به رشته‌های مختلف را حفظ کنند.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

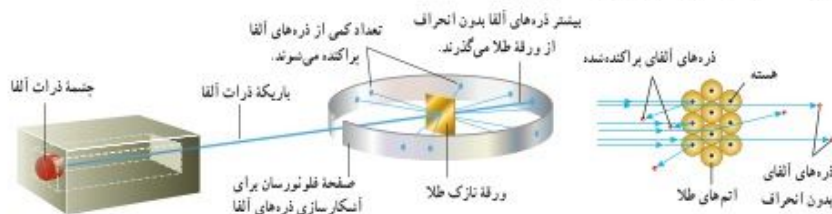
۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور

جوزف تامسون فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را ترغیب کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنا بر مدل تامسون، اتم همچون کروی 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 کشمش هم می‌گویند، زیرا الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن پخش شده‌اند (شکل ۹-۵).



شکل ۹-۵ در مدل تامسون، بار الکتریکی مثبت به‌طور همگن در کروی توزیع شده است و الکترون‌ها مانند کشمش‌های یک در نقاط مختلف آن قرار دارند.

در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با پسمادهای معینی حول وضع تعادلشان نوسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از ناکامی‌های مدل تامسون این بود که پسمادهای تابش گسیل شده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود. وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌هایی را انتشار داد که مدل تامسون نمی‌توانست آنها را توضیح دهد، این مدل کنار گذاشته شد. رادرفورد و همکارانش باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت را (از جنس هسته اتم هلیوم که به آن ذره آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا فرو تاباندند (شکل ۱۰-۵). رادرفورد بنابر 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 می‌گذشتند و در برخورد با صفحه فلز نوسان، در پشت آن، جرقه‌های نورانی تولید می‌کردند. با وجود این، برخی از ذره‌های آلفا در هنگام خروج از ورقه نازک طلا، در زاویه‌های بزرگ منحرف و پراکنده می‌شدند و حتی تعدادی از آنها نیز به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد پس از انجام این آزمایش و بر اساس مدل تامسون و شناختی که از باریکه ذرات 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 مرکزهای بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده‌اند. وی سرانجام نتیجه گرفت باید هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت در مرکز هر اتم باشد که با مدل اتمی تامسون به‌طور آشکار مغایرت داشت.

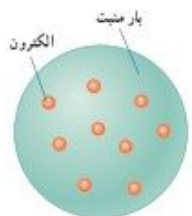


شکل ۱۰-۵ آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقه نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله‌ها در یک اتاقک خلا قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی

۳-۵ مدل اتم رادرفورد - بور

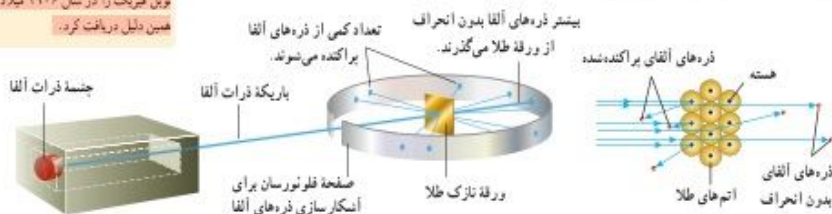
جوزف تامسون فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را ترغیب کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنا بر مدل تامسون، اتم همچون کروی است که بار مثبت به‌طور همگن در سرتاسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمش هم می‌گویند، زیرا الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن پخش شده‌اند (شکل ۹-۵).



شکل ۹-۵ در مدل تامسون، بار الکتریکی مثبت به‌طور همگن در کروی توزیع شده است و الکترون‌ها مانند کشمش‌های یک در نقاط مختلف آن قرار دارند.



جوزف تامسون (۱۸۵۶-۱۹۴۰ م.) یکی از فیزیک‌دانان بزرگ انگلیسی و استاد دانشگاه کمبریج بود. تامسون پس از کشف الکترون، مدیر آزمایشگاه کابینش لندن؛ جایی که یکی از شاگردانش در اینجا ارنست رادرفورد بود. تامسون پس از چندین سال کار روی مدل اتمی، که برخی از ویژگی‌های شناخته‌شده اتم (از جمله اندازه، شمع، جرم و حتی الکتریکی اتم را) شامل می‌شد، مدلی موسوم به کیک کشمش را در اوایل قرن بیستم ارائه داد که برای چندین سال مورد پذیرش عموم دانشمندان قرار گرفت. تامسون همچنین روی ویژگی‌های رسانی الکتریکی گازها نیز کار می‌کرد و جایزه نوبل فیزیک را در سال ۱۹۰۶ میلادی به همین دلیل دریافت کرد.



شکل ۱۰-۵ آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقه نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله‌ها در یک اتاقک خلا قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.

فیزیک ۳

نمودار ترازهای انرژی الکترون برای اتم هیدروژن در مدل بور: مفید است که مقادیر انرژی داده شده در معادله ۸-۵ را مانند شکل ۱۴-۵ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهیم. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n = \infty$ در معادله ۸-۵ مربوط است و دارای انرژی ۰ eV است. برعکس، پایین ترین تراز انرژی مربوط به $n = 1$ است و دارای مقدار -13.6 eV است. پایین ترین تراز انرژی، **حالت پایه** نامیده می شود تا از ترازهای بالاتر که **حالت های برانگیخته** نامیده می شوند متمایز باشد. توجه کنید که با افزایش n چگونه انرژی های حالت های برانگیخته به هم نزدیک و نزدیک تر می شوند.

در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالا بردن الکترون از حالت پایه ($n = 1$) به بالاترین حالت برانگیخته ممکن ($n = \infty$) مقدار 13.6 eV انرژی باید صرف شود. صرف اندکی بیش از این مقدار انرژی، الکترون را از اتم خارج می کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می شود. این انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه و رساندن آن به حالت برانگیخته $n = \infty$ ، **انرژی یونس الکترون** نامیده می شود. مقدار پیش بینی شده توسط مدل بور برای انرژی یونس اتم هیدروژن، توافق بسیار خوبی با مقدار تجربی دارد.

مثال ۵-۶

الکترونی در دومین حالت برانگیخته اتم هیدروژن قرار دارد. (الف) انرژی الکترون را در این حالت پیدا کنید. (ب) وقتی الکترون از این حالت برانگیخته به حالت پایه جهش می کند نمودار تراز انرژی آن را رسم کنید. (پ) طول موج فوتون گسیل شده را حساب کنید.

پاسخ: (الف) در دومین حالت برانگیخته، عدد کوانتومی $n = 2$ است. به این ترتیب از رابطه ۸-۵ 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 می دهد که با گسیل فوتون، از دومین حالت برانگیخته به حالت پایه جهش کرده است.

(پ) انرژی الکترون در حالت پایه -13.6 eV است. به این ترتیب انرژی فوتون گسیل شده برابر $E_2 - E_1$ است. از رابطه ۹-۵ داریم:

$$E_2 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{-1.51 \text{ eV} - (-13.6 \text{ eV})} = 10.2 \text{ nm}$$

تمرین ۵-۴

شکل مقابل تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می دهد. (الف) کمترین طول موج فوتونی را پیدا کنید که با گذار بین این ترازها به دست می آید. (ب) اگر الکترون از تراز انرژی -1.51 eV به تراز پایه جهش کند طول موج فوتون گسیلی را پیدا کنید. (پ) کدام گذار بین دو تراز می تواند به گسیل فوتونی با طول موج 660 nm منجر شود؟ توجه کنید که این طول موج ها در گستره مرئی است.

فیزیک ۳

نمودار ترازهای انرژی الکترون برای اتم هیدروژن در مدل بور: مفید است که مقادیر انرژی داده شده در معادله ۸-۵ را مانند شکل ۱۴-۵ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهیم. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n = \infty$ در معادله ۸-۵ مربوط است و دارای انرژی ۰ eV است. برعکس، پایین ترین تراز انرژی مربوط به $n = 1$ است و دارای مقدار -13.6 eV است. پایین ترین تراز انرژی، **حالت پایه** نامیده می شود تا از ترازهای بالاتر که **حالت های برانگیخته** نامیده می شوند متمایز باشد. توجه کنید که با افزایش n چگونه انرژی های حالت های برانگیخته به هم نزدیک و نزدیک تر می شوند.

در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالا بردن الکترون از حالت پایه ($n = 1$) به بالاترین حالت برانگیخته ممکن ($n = \infty$) مقدار 13.6 eV انرژی باید صرف شود. صرف اندکی بیش از این مقدار انرژی، الکترون را از اتم خارج می کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می شود. این انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه و رساندن آن به حالت برانگیخته $n = \infty$ ، **انرژی یونس الکترون** نامیده می شود. مقدار پیش بینی شده توسط مدل بور برای انرژی یونس اتم هیدروژن، توافق بسیار خوبی با مقدار تجربی دارد.

مثال ۵-۶

الکترونی در دومین حالت برانگیخته اتم هیدروژن قرار دارد. (الف) انرژی الکترون را در این حالت پیدا کنید. (ب) وقتی الکترون از این حالت برانگیخته به حالت پایه جهش می کند نمودار تراز انرژی آن را رسم کنید. (پ) طول موج فوتون گسیل شده را حساب کنید.

پاسخ: (الف) در دومین حالت برانگیخته، عدد کوانتومی $n = 2$ است. به این ترتیب از رابطه ۸-۵ 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 می دهد که با گسیل فوتون، از دومین حالت برانگیخته به حالت پایه جهش کرده است.

(پ) انرژی الکترون در حالت پایه -13.6 eV است. به این ترتیب انرژی فوتون گسیل شده برابر $E_2 - E_1$ است. از رابطه ۹-۵ داریم:

$$E_2 - E_1 = hf = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{-1.51 \text{ eV} - (-13.6 \text{ eV})} = 10.2 \text{ nm}$$

تمرین ۵-۴

شکل مقابل تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می دهد. (الف) کمترین طول موج فوتونی را پیدا کنید که با گذار بین این ترازها به دست می آید. (ب) اگر الکترون از تراز انرژی -1.51 eV به تراز پایه جهش کند طول موج فوتون گسیلی را پیدا کنید. (پ) کدام گذار بین دو تراز می تواند به گسیل فوتونی با طول موج 660 nm منجر شود؟ توجه کنید که این طول موج ها در گستره مرئی است.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی



نیلز بور (۱۸۸۵-۱۹۶۲ 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 مجستروفت و در آزمایشگاه رادرفورد که مرکزی پژوهشی دربارهٔ مواد پروتوزا و ساختار اتم بود مشغول به کار شد. در آنجا بود که مدل اتمی خود را در خصوص اتم هیدروژن تدوین و ارائه کرد. پس از آن در توسعهٔ نظریه مکانیک کوانتومی نقش عمده‌ای داشت. بور در سال ۱۹۲۲ جایزهٔ نوبل فیزیک را برای درک ساختار اتمی و نظریهٔ کوانتومی دریافت کرد. مؤسسه فیزیک نظری که وی در سال ۱۹۲۱ میلادی در کپنهاگ بنیان نهاد نزدیک به یک سده است که دانشمندان را از سراسر جهان به سوی خود جذب می‌کند.

به دست آوردن معادلهٔ ریذبرگ از مدل بور: همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادلهٔ ریذبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های برانگیخته باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار n_L به مدار n_U می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط $h\nu = E_U - E_L$ و $\frac{1}{\lambda} = R(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2})$ فوتون گسیل شده برابر است با:

$$f = \frac{1}{h}(E_U - E_L) = \frac{E_R}{h}(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2})$$

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

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_R}{h}(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2}) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc}(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2})$$

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 ریذبرگ R است که پیش از این با آن آشنا شدیم. به این ترتیب داریم:

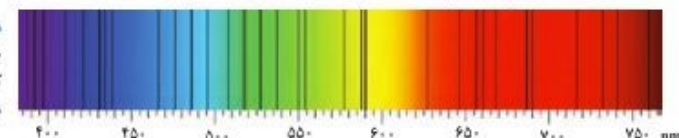
$$\frac{1}{\lambda} = R(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2})$$

این رابطه همان معادلهٔ ۶-۵ است که با اصلاح و بازنویسی معادلهٔ بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریذبرگ به دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطهٔ تجربی ریذبرگ را به دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_U = 3$ به مدار $n_L = 2$ می‌رود، طول موج فوتون گسیل شده برابر است با:

$$\frac{1}{\lambda} = R(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2}) = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1}(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}) \Rightarrow \lambda = 66 \text{ nm}$$

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 فرانوفر، با مشاهدهٔ دقیق طیف خورشید، خط‌های تاریک نازکی را در آن کشف کرد (شکل ۵-۱۵). این تجربه نشان می‌داد در تابشی که از خورشید گسیل می‌شود و به زمین می‌رسد بعضی از طول موج‌ها وجود ندارند. امروزه می‌دانیم بسیاری از خط‌های تاریکی که فرانوفر 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.



۱۵-۱۵ ویلیام ولاستون به عنوان نخستین کاتب این خط‌های تاریک نام می‌برد. ولی جوزف فرانوفر بود که این خط‌ها را به تفصیل مورد مطالعه قرار داد.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی



نیلز بور (۱۸۸۵-۱۹۶۲ 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 مجستروفت و در آزمایشگاه رادرفورد که مرکزی پژوهشی دربارهٔ مواد پروتوزا و ساختار اتم بود مشغول به کار شد. در آنجا بود که مدل اتمی خود را در خصوص اتم هیدروژن تدوین و ارائه کرد. پس از آن در توسعهٔ نظریه مکانیک کوانتومی نقش عمده‌ای داشت. بور در سال ۱۹۲۲ جایزهٔ نوبل فیزیک را برای درک ساختار اتمی و نظریهٔ کوانتومی دریافت کرد. مؤسسه فیزیک نظری که وی در سال ۱۹۲۱ میلادی در کپنهاگ بنیان نهاد نزدیک به یک سده است که دانشمندان را از سراسر جهان به سوی خود جذب می‌کند.

استخراج معادلهٔ ریذبرگ برای اتم هیدروژن از مدل بور: همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادلهٔ ریذبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های برانگیخته باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار n_L به مدار n_U می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط $h\nu = E_U - E_L$ و $\frac{1}{\lambda} = R(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2})$ فوتون گسیل شده برابر است با:

$$f = \frac{1}{h}(E_U - E_L) = \frac{E_R}{h}(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2})$$

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

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{E_R}{h}(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2}) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{E_R}{hc}(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2})$$

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 ریذبرگ R است که پیش از این با آن آشنا شدیم. به این ترتیب داریم:

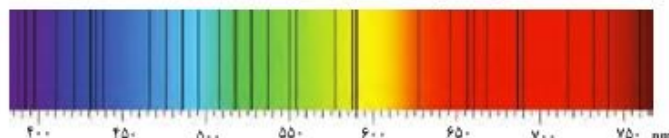
$$\frac{1}{\lambda} = R(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2})$$

این رابطه همان معادلهٔ ۶-۵ است که با اصلاح و بازنویسی معادلهٔ بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریذبرگ به دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطهٔ تجربی ریذبرگ را به دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_U = 3$ به مدار $n_L = 2$ می‌رود، طول موج فوتون گسیل شده برابر است با:

$$\frac{1}{\lambda} = R(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2}) = 0.0109 \text{ (nm)}^{-1}(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}) \Rightarrow \lambda = 66 \text{ nm}$$

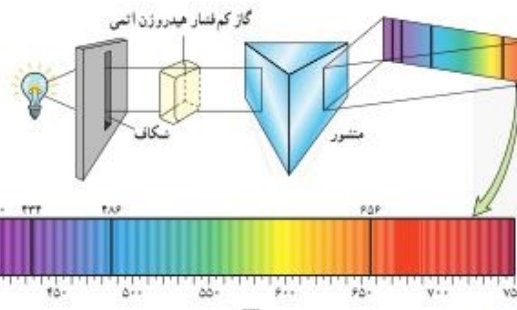
مقدار به دست آمده به نحو چشمگیری به طول موج خط قرمز در رشتهٔ بالمر که از تجربه حاصل شده، نزدیک است.

طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و مدل بور: در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانوفر، با مشاهدهٔ دقیق طیف خورشید، خط‌های تاریک نازکی را در آن کشف کرد (شکل ۵-۱۵). این تجربه نشان می‌داد در تابشی که از خورشید گسیل می‌شود و به زمین می‌رسد بعضی از طول موج‌ها وجود ندارند. امروزه می‌دانیم بسیاری از خط‌های تاریکی که فرانوفر 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.



۱۵-۱۵ ویلیام ولاستون به عنوان نخستین کاتب این خط‌های تاریک نام می‌برد. ولی جوزف فرانوفر بود که این خط‌ها را به تفصیل مورد مطالعه قرار داد.

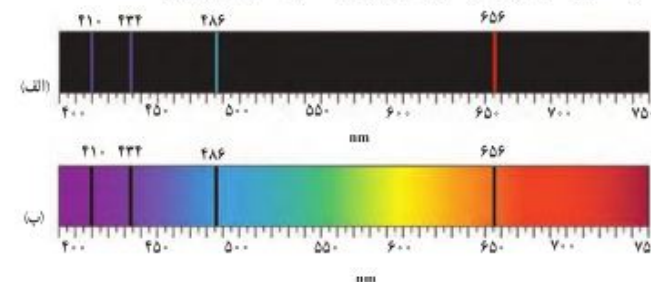
شکل ۱۶-۵ اسباب آزمایشی را به صورت طرح وار نشان می دهد که در آن باریکه نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم فشار هیدروژن می گذرد. با انجام این آزمایش بی می بریم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین کمان) با خط هایی تاریک درون آن مشاهده می شود که در آن بعضی از طول موج ها از نور سفید جذب شده اند.



شکل ۱۶-۵ روشی برای مشاهده طیف های جذبی. یک جنسه نور سفید که گستره ای پیوسته از طول موج ها را تولید می کند، از طرفی حاوی گاز کم فشار هیدروژن اتمی می گذرد و توسط منشور پراکنده می شود و طیف آن روی برده تشکیل می شود. خط های تاریک روی طیف، به طول موج هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم های گاز جذب شده اند.

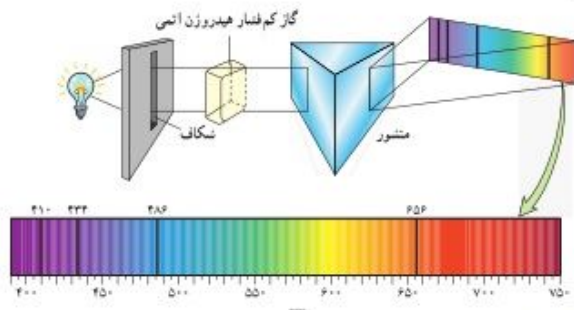
در اواسط قرن نوزدهم، آزمایش هایی مشابه آنچه بیان کردیم برای گاز های عناصر مختلف انجام شد. این آزمایش ها نشان می داد که اگر نور سفید از داخل گاز عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط های تاریکی ظاهر می شود. این خط ها (طول موج ها) توسط اتم های گاز عنصر جذب شده اند. شکل ۱۷-۵، طیف گسیلی و طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را در کنار یکدیگر نشان می دهد. مطالعه و مقایسه این دو طیف و همچنین طیف های گسیلی و جذبی عنصر های مختلف نشان می دهد که:

- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم های گاز هر عنصر، طول موج های معینی وجود دارد که از مشخصه های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- اتم های هر گاز دقیقاً همان طول موج هایی را از نور سفید جذب می کنند که اگر دمای آنها به اندازه کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می کنند.



شکل ۱۷-۵ طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. (الف) خط های روشن در طیف گسیلی معرف طول موج های گسیل شده و (ب) خط های تاریک در زمینه طیف، معرف طول موج های جذب شده توسط اتم های گاز هستند.

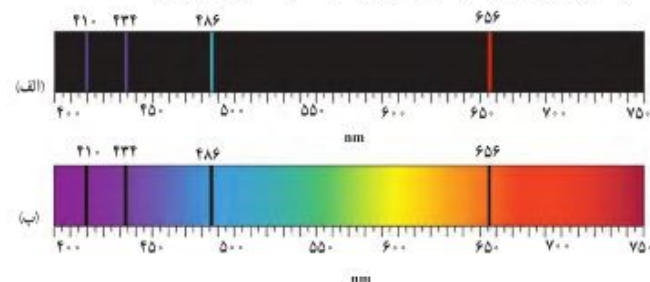
شکل ۱۶-۵ اسباب آزمایشی را به صورت طرح وار نشان می دهد که در آن باریکه نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم فشار هیدروژن می گذرد. با انجام این آزمایش بی می بریم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین کمان) با خط هایی تاریک درون آن مشاهده می شود که در آن بعضی از طول موج ها از نور سفید جذب شده اند.



شکل ۱۶-۵ روشی برای مشاهده طیف های جذبی. یک جنسه نور سفید که گستره ای پیوسته از طول موج ها را تولید می کند، از طرفی حاوی گاز کم فشار هیدروژن اتمی می گذرد و توسط منشور پراکنده می شود و طیف آن روی برده تشکیل می شود. خط های تاریک روی طیف، به طول موج هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم های گاز جذب شده اند.

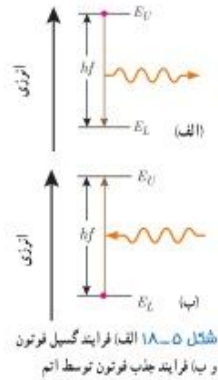
در اواسط قرن نوزدهم، آزمایش هایی مشابه آنچه بیان کردیم برای گاز های عناصر مختلف انجام شد. این آزمایش ها نشان می داد که اگر نور سفید از داخل گاز عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط های تاریکی ظاهر می شود. این خط ها (طول موج ها) توسط اتم های گاز عنصر جذب شده اند. شکل ۱۷-۵، طیف گسیلی و طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را در کنار یکدیگر نشان می دهد. مطالعه و مقایسه این دو طیف و همچنین طیف های گسیلی و جذبی عنصر های مختلف نشان می دهد که:

- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم های گاز هر عنصر، طول موج های معینی وجود دارد که از مشخصه های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- اتم های هر گاز دقیقاً همان طول موج هایی را از نور سفید جذب می کنند که اگر دمای آنها به اندازه کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می کنند.



شکل ۱۷-۵ طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. (الف) خط های روشن در طیف گسیلی معرف طول موج های گسیل شده و (ب) خط های تاریک در زمینه طیف، معرف طول موج های جذب شده توسط اتم های گاز هستند.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی



شکل ۵-۱۸ الف) فرایند گسیل فوتون و ب) فرایند جذب فوتون توسط اتم

اینکه چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را که مشخصه آن عنصر است جذب یا گسیل می‌کند 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 به وجود 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 ۱۸-۵ 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 ۱۸-۵ ب). در این حالت، اتم، فوتونی را که دقیقاً انرژی لازم برای گذار را دارد جذب می‌کند. به این ترتیب اگر فوتون‌هایی با گستره پيوسته‌ای از طول موج‌ها مطابق آزمایش شکل ۱۶-۵ از گاز بگذرند و سپس طیف آنها تشکیل شود، یک دسته خط‌های جذبی تاریک در طیف پيوسته مشاهده خواهند شد. خط‌های تاریک، طول موج‌هایی را مشخص می‌کنند که با فرایند جذب فوتون برداشته شده‌اند.

پوش ۵-۲

آیا معادله ۹-۵ برای فرایند جذب فوتون نیز برقرار است؟

موفقیت‌ها و نارسایی‌های مدل بور: مدل بور تصویری از جگونگی حرکت الکترون‌ها به دور هسته ارائه می‌کند. این مدل در تبیین پایداری اتم، طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی و محاسبه انرژی یونش اتم هیدروژن با موفقیت همراه است. افزون بر این، مدل بور را برای اتم‌های هیدروژن گونه نیز می‌توان به کار برد. **اتم هیدروژن گونه** به اتم‌هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند. برای مثال، اتم لیتیم که در حالت خنثی سه الکترون دارد اگر دو الکترون خود را از دست داده باشد، یک اتم هیدروژن گونه است. مدل بور می‌تواند انرژی یونش و همچنین طول موج‌های طیف خطی اتم‌های هیدروژن گونه مانند لیتیم دو بار یونیده (Li^{2+}) را پیش‌بینی کند که با تجربه سازگاری خوبی دارد.

مدل بور به‌رغم موفقیت‌هایی که اشاره شد، نارسایی‌هایی نیز دارد که تنها به دو مورد از آنها اشاره می‌کنیم. این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است. همچنین این مدل نمی‌تواند متفاوت بودن شدت خط‌های طیف گسیلی را توضیح دهد. برای مثال مدل بور نمی‌تواند توضیح دهد که چرا شدت خط فرمز با شدت خط آبی در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی با یکدیگر متفاوت است.

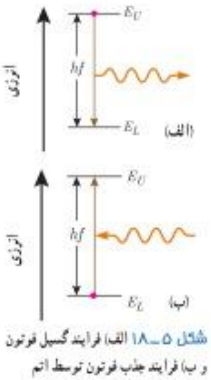
پوش ۵-۲

آیا معادله ۹-۵ برای فرایند جذب فوتون نیز برقرار است؟

موفقیت‌ها و نارسایی‌های مدل بور: مدل بور تصویری از جگونگی حرکت الکترون‌ها به دور هسته ارائه می‌کند. این مدل در تبیین پایداری اتم، طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی و محاسبه انرژی یونش اتم هیدروژن با موفقیت همراه است. افزون بر این، مدل بور را برای اتم‌های هیدروژن گونه نیز می‌توان به کار برد. **اتم هیدروژن گونه** به اتم‌هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند. برای مثال، اتم لیتیم که در حالت خنثی سه الکترون دارد اگر دو الکترون خود را از دست داده باشد، یک اتم هیدروژن گونه است. مدل بور می‌تواند انرژی یونش و همچنین طول موج‌های طیف خطی اتم‌های هیدروژن گونه مانند لیتیم دو بار یونیده (Li^{2+}) را پیش‌بینی کند که با تجربه سازگاری خوبی دارد.

مدل بور به‌رغم موفقیت‌هایی که اشاره شد، نارسایی‌هایی نیز دارد که تنها به دو مورد از آنها اشاره می‌کنیم. این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است. همچنین این مدل نمی‌تواند متفاوت بودن شدت خط‌های طیف گسیلی را توضیح دهد. برای مثال مدل بور نمی‌تواند توضیح دهد که چرا شدت خط فرمز با شدت خط آبی در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی با یکدیگر متفاوت است.

فصل ۵: آشنایی با فیزیک اتمی



شکل ۵-۱۸ الف) فرایند گسیل فوتون و ب) فرایند جذب فوتون توسط اتم



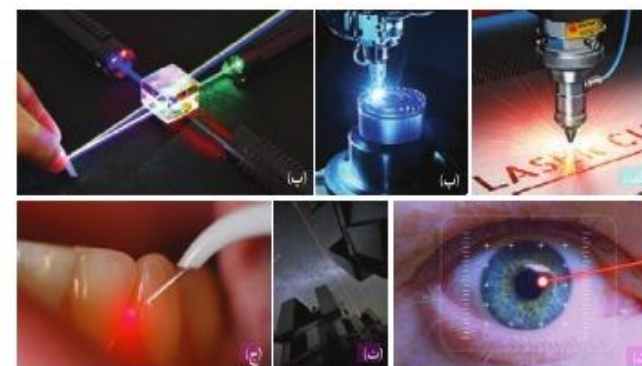
علی جوان (۱۹۱۶-۱۹۶۲ م.) از پدر و مادری نروژی، در تهران به دنیا آمد. از دبیرستان الفیز دیپلم گرفت و پس از آن به مدت یک سال در دانشکده علوم دانشگاه تهران به تحصیل پرداخت. در سال ۱۹۳۸ میلادی به نیویورک رفت و چندین دوره درسی را در دانشگاه کلمبیا گذراند. علی جوان بدون داشتن مدرک لیسانس با فوق لیسانس، موفق شد در سال ۱۹۴۲ دکترای خود را از زیر نظر چارلز دایر، فیزیک‌دان و مخترع بزرگ امریکایی و برنده جایزه نوبل فیزیک ۱۹۳۹، دریافت کند. در سال ۱۹۵۵ دوره استادکرا را در آزمایشگاه فیزیک و با تحقیق روی ساخت اتمی دنبال کرد. در سال ۱۹۵۸ به آزمایشگاه‌های نظری بل پوینست و مدنی بعد در همدانجا ایده اولیه تیزهای گازی را ارائه کرد. وی پس از یک سال تلاش و با همکاری دو فیزیک‌دان دیگر به نام‌های ویلیام بنت و دونالد هیوت، موفق به ساخت اولین نمونه تیز گازی هلیوم تون در سال ۱۹۶۰ شد.



علی جوان (۱۹۶۰-۱۹۲۶ م.) از پدر و مادری تهرانی، در تهران به دنیا آمد. از دبیرستان الیز دیلم گرفت و پس از آن به مدت یک سال در دانشگاه علوم دانشگاه تهران به تحصیل پرداخت. در سال ۱۹۶۸ میلادی به نیویورک رفت و چندین دوره دوسه ماهه در دانشگاه کلمبیا گذراند. علی جوان بدون داشتن مدرک لیسانس یا فوق لیسانس، موفق شد در سال ۱۹۵۲ دکترای خود را از نظر جازن ناویر، فیزیکدان و مخترع بزرگ آمریکایی و برنده جایزه نوبل فیزیک ۱۹۶۲ دریافت کند. در سال ۱۹۵۵ دوره پسادکتری را در آزمایشگاه تایش و یا تحقیق روی ساعت اتمی دنبال کرد. در سال ۱۹۵۸ به آزمایشگاههای فزنی پل نیوست و مدتی بعد در همان جا ایده اولیه لیزرهای گازی را ارائه کرد. وی پس از یک سال تلاش و با همکاری دو فیزیکدان دیگر به نامهای ویلیام بنت و دونالد هرویت، موفق به ساخت اولین نمونه لیزر گازی هلیوم نئون در سال ۱۹۶۰ شد.

۴-۵ 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 DVD ها و خواندن آنها، شبکه های کابل نوری، اندازه گیری دقیق طول، دستگاه های جوشکاری و برش فلزات، پژوهش های علمی، سرگرمی و ... به کار می رود. همچنین در حرفه پزشکی برای جراحی، برداشتن لکه های پوستی، اصلاح دید چشم و دندانپزشکی و ... از لیزر استفاده می شود (شکل ۱۹-۵).

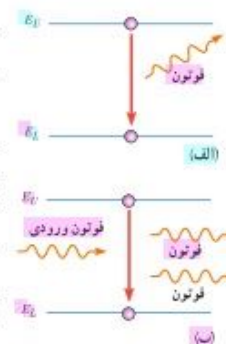


شکل ۱۹-۵ برخی از کاربردهای لیزر: (الف) در برشکاری، (ب) در جوشکاری، (ج) در دندانپزشکی و پژوهش های علمی.

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

مطابق مدل اتمی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین تر جهش می کند یک فوتون گسیل می شود. فرایند گسیل می تواند به صورت **گسیل خودبه خود** و یا **گسیل القایی** باشد. در گسیل خودبه خود (شکل ۲۰-۵ الف) فوتون در جهتی کاتوره ای گسیل می شود. در حالی که در گسیل القایی (شکل ۲۰-۵ ب) که برای نخستین بار در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط اینشتین مطرح شد، یک فوتون ورودی، الکترون برانگیخته را تحریک (یا القا) می کند تا تراز انرژی خود را تغییر دهد و به تراز پایین تر برود. برای گسیل القایی، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی های دو تراز یعنی $E_H - E_L$ یکسان باشد.

گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد. اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می شود (شکل ۲۰-۵ ب). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون ها را افزایش می دهد و نور را تقویت می کند. دوم اینکه فوتون گسیل شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می کند. سوم اینکه فوتون گسیل شده

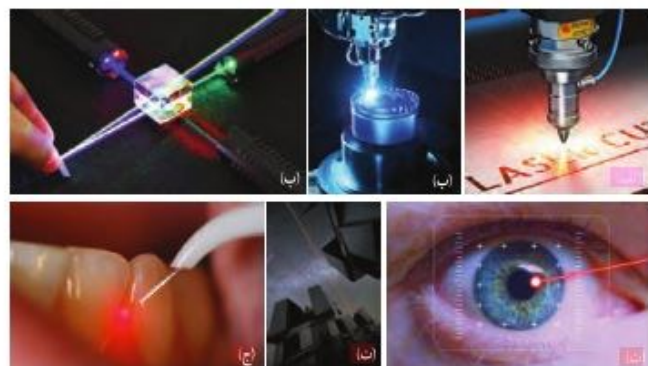


شکل ۲۰-۵ الف) گسیل خودبه خود ب) گسیل القایی

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

۴-۵ 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 DVD ها و خواندن آنها، شبکه های کابل نوری، اندازه گیری دقیق طول، دستگاه های جوشکاری و برش فلزات، پژوهش های علمی، سرگرمی و ... به کار می رود. همچنین در حرفه پزشکی برای جراحی، برداشتن لکه های پوستی، اصلاح دید چشم و دندانپزشکی و ... از لیزر استفاده می شود (شکل ۱۹-۵).

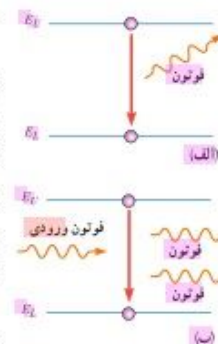


شکل ۱۹-۵ برخی از کاربردهای لیزر: (الف) در برشکاری، (ب) در جوشکاری، (ج) در دندانپزشکی و پژوهش های علمی.

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

مطابق مدل اتمی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین تر جهش می کند یک فوتون گسیل می شود. فرایند گسیل می تواند به صورت **گسیل خودبه خود** و یا **گسیل القایی** باشد. در گسیل خودبه خود (شکل ۲۰-۵ الف) فوتون در جهتی کاتوره ای گسیل می شود. در حالی که در گسیل القایی (شکل ۲۰-۵ ب) که برای نخستین بار در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط اینشتین مطرح شد، یک فوتون ورودی، الکترون برانگیخته را تحریک (یا القا) می کند تا تراز انرژی خود را تغییر دهد و به تراز پایین تر برود. برای گسیل القایی، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی های دو تراز یعنی $E_H - E_L$ یکسان باشد.

گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد. اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می شود (شکل ۲۰-۵ ب). به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون ها را افزایش می دهد و نور را تقویت می کند. دوم اینکه فوتون گسیل شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می کند. سوم اینکه فوتون گسیل شده



شکل ۲۰-۵ الف) گسیل خودبه خود ب) گسیل القایی

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

۶

فصل



آشنایی با فیزیک هسته‌ای



جاقوی گاما (جراحی مغز بدون جاقو) جایگزینی مناسب برای جراحی‌های سنتی و یا روش‌هایی است که در آن کل مغز در معرض تابش قرار می‌گیرد. از این روش در علم روانپزشکی نیز برای درمان وسواس، افسردگی اساسی و اختلالات شدید اضطرابی استفاده می‌شود. این کار چگونه انجام می‌شود؟

بخش‌ها

- ۱-۶ ساختار هسته
- ۲-۶ پرتوهای طبیعی و نیمه‌عمر
- ۳-۶ شکافت هسته‌ای
- ۴-۶ گداخت (همجوشی) هسته‌ای

۶

فصل



آشنایی با فیزیک هسته‌ای

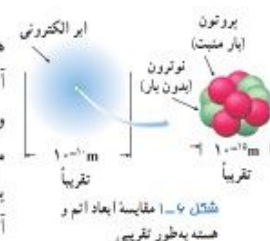


جاقوی گاما (جراحی مغز بدون جاقو) جایگزینی مناسب برای جراحی‌های سنتی و یا روش‌هایی است که در آن کل مغز در معرض تابش قرار می‌گیرد. از این روش در علم روانپزشکی نیز برای درمان وسواس، افسردگی اساسی و اختلالات شدید اضطرابی استفاده می‌شود. این کار چگونه انجام می‌شود؟

بخش‌ها

- ۱-۶ ساختار هسته
- ۲-۶ پرتوهای طبیعی و نیمه‌عمر
- ۳-۶ شکافت هسته‌ای
- ۴-۶ گداخت (همجوشی) هسته‌ای

فیزیک ۳



فیزیک هسته‌ای، شاخه‌ای از فیزیک است که در آن با ساختار، برهم‌کنش‌ها و واپاشی هسته‌های اتمی سروکار داریم. بخش عمده‌ای از پیشرفت فیزیک هسته‌ای، مدیون تحلیل نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌هایی است که طی قرن گذشته توسط دانشمندانی از حوزه‌های فیزیک و شیمی انجام شده است. آنچه پیش از همه منجر به گسترش فیزیک هسته‌ای شد، به تحولاتی مربوط است که با ساخت شتاب‌دهنده‌های ذرات در سال ۱۹۳۲ میلادی آغاز شد. در این فصل پس از آشنایی مقدماتی با ساختار هسته و پرتوهای طبیعی، با شکافت و هم‌جوشی هسته‌ای نیز آشنا می‌شوید.

۶-۱ ساختار هسته

کشف پرتوهای طبیعی در سال ۱۸۹۶ میلادی توسط فیزیک‌دان فرانسوی، هنری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هسته اتم بود. با کاوش درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که شعاع آن تقریباً $\frac{1}{10000}$ شعاع اتم است (شکل ۶-۱).
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 ۶-۱). جرم اتم‌ها و همچنین اجزای تشکیل‌دهنده اتم را، افزون بر یکای کیلوگرم با یکای جرم اتمی نیز بیان می‌کنند.

* در نیمی ۱ دینید $\frac{1}{18}$ جرم اتم کربن ۱۲ را یکای جرم اتمی (atomic mass unit) می‌نامند و آن را به اختصار با amu یا u نشان می‌دهند. بنا به این تعریف، جرم اتم کربن ۱۲، دقیقاً برابر ۱۲/۰۰۰۰۰۰۰۰ است.

جدول ۶-۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی ذرات تشکیل‌دهنده اتم

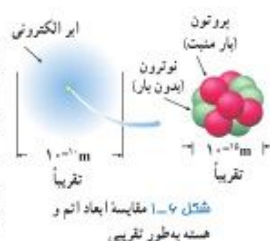
ذره	بار الکتریکی (C)	کیللوگرم (kg)	یکای جرم اتمی (u)
الکترون	-1.6×10^{-19}	9.109389×10^{-31}	5.4858×10^{-4}
پروتون	$+1.6 \times 10^{-19}$	1.672622×10^{-27}	1.007276
نوترون	۰	1.674929×10^{-27}	1.008664

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.

$$(۶-۱) \quad A = Z + N$$

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

فیزیک ۳



فیزیک هسته‌ای، شاخه‌ای از فیزیک است که در آن با ساختار، برهم‌کنش‌ها و واپاشی هسته‌های اتمی سروکار داریم. بخش عمده‌ای از پیشرفت فیزیک هسته‌ای، مدیون تحلیل نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌هایی است که طی قرن گذشته توسط دانشمندانی از حوزه‌های فیزیک و شیمی انجام شده است. آنچه پیش از همه منجر به گسترش فیزیک هسته‌ای شد، به تحولاتی مربوط است که با ساخت شتاب‌دهنده‌های ذرات در سال ۱۹۳۲ میلادی آغاز شد. در این فصل پس از آشنایی مقدماتی با ساختار هسته و پرتوهای طبیعی، با شکافت و هم‌جوشی هسته‌ای نیز آشنا می‌شوید.

۶-۱ ساختار هسته

کشف پرتوهای طبیعی در سال ۱۸۹۶ میلادی توسط فیزیک‌دان فرانسوی، هنری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هسته اتم بود. با کاوش درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که شعاع آن تقریباً $\frac{1}{10000}$ شعاع اتم است (شکل ۶-۱).
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 ۶-۱). جرم اتم‌ها و همچنین اجزای تشکیل‌دهنده اتم را، افزون بر یکای کیلوگرم با یکای جرم اتمی نیز بیان می‌کنند.

* در نیمی ۱ دینید $\frac{1}{18}$ جرم اتم کربن ۱۲ را یکای جرم اتمی (atomic mass unit) می‌نامند و آن را به اختصار با amu یا u نشان می‌دهند. بنا به این تعریف، جرم اتم کربن ۱۲، دقیقاً برابر ۱۲/۰۰۰۰۰۰۰۰ است.

جدول ۶-۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی ذرات تشکیل‌دهنده اتم

ذره	بار الکتریکی (C)	کیللوگرم (kg)	یکای جرم اتمی (u)
الکترون	-1.6×10^{-19}	9.109389×10^{-31}	5.4858×10^{-4}
پروتون	$+1.6 \times 10^{-19}$	1.672622×10^{-27}	1.007276
نوترون	۰	1.674929×10^{-27}	1.008664

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.

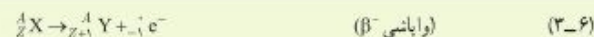
$$(۶-۱) \quad A = Z + N$$

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

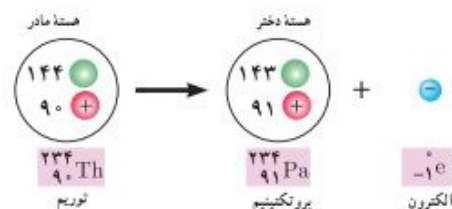
هنری بکرل (۱۸۵۲-۱۹۰۸)
فیزیک‌دان فرانسوی، در سال ۱۸۹۶ به‌عنوان استاد حوزه فیزیک طبیعی در دانشگاه ستراسبورگ انتخاب شد. وی نخستین دانشمندانی است که در سال ۱۸۹۶ و در حالی که مشغول بررسی خاصیت فسفرسانس نمک‌های اورانیم بود، به‌دفعه پرتوهای را کشف کرد. بکرل در سال ۱۹۰۳، به‌همراه ماری کوری و پیر کوری جایزه نوبل فیزیک را به‌خاطر کشف پرتوهای طبیعی دریافت کرد. به اختصار فعالیت‌های وی در زمینه پرتوهای، یکای SI برای فعالیت رادیواکتیو، بکرل (Bq) نام‌گذاری شده است.

فیزيك ۳۳

واپاشی β^- : واپاشی بتا، نخستین مورد پرتوای بود که در سال‌های پایانی قرن نوزدهم، توسط هانری بکرل مشاهده شد. این واپاشی، متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست و ذرات گسیل‌شده در این واپاشی را ذرات بتا می‌نامند. بررسی‌های بعدی نشان داد که این ذرات الکترون‌اند و به همین دلیل، این واپاشی را واپاشی β^- نامیدند. الکترون گسیل‌شده در این واپاشی، در هسته مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون‌های مداری اتم نیست؛ این الکترون وقتی به وجود می‌آید که نوترونی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود. فرایند واپاشی β^- را با رابطه زیر بیان می‌کنند:



شکل ۶-۳۴ مثالی از واپاشی β^- ، برای توریم ۲۳۴ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۶-۳۴ واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هسته مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذره β^- گسیل می‌شود.

تمرین ۶-۲

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

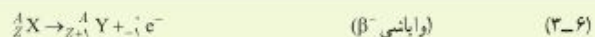
در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذره گسیل‌شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار e^- حامل بار e^+ است. به این الکترون مثبت، پوزیترون می‌گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می‌شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می‌دهد این است که یکی از پروتون‌های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می‌شود. فرایند واپاشی β^+ با رابطه زیر بیان می‌شود^۱.



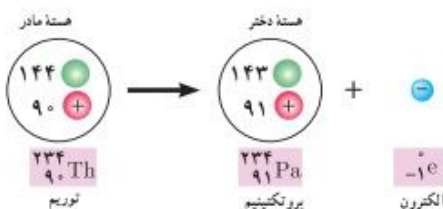
^۱ در واپاشی β^+ ، ذره‌ای دیگر به نام نوتینو را نیز باید در نظر بگیریم (${}^0_{+1} e^+ + \nu$). همچنین در واپاشی β^- ذره‌ای دیگر به نام پادنوتینو را نیز باید در نظر بگیریم (${}^0_{-1} e^- + \bar{\nu}$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

فیزيك ۳۳

واپاشی β^- : واپاشی بتا، نخستین مورد پرتوای بود که در سال‌های پایانی قرن نوزدهم، توسط هانری بکرل مشاهده شد. این واپاشی، متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست و ذرات گسیل‌شده در این واپاشی را ذرات بتا می‌نامند. بررسی‌های بعدی نشان داد که این ذرات الکترون‌اند و به همین دلیل، این واپاشی را واپاشی β^- نامیدند. الکترون گسیل‌شده در این واپاشی، در هسته مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون‌های مداری اتم نیست؛ این الکترون وقتی به وجود می‌آید که نوترونی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود. فرایند واپاشی β^- را با رابطه زیر بیان می‌کنند:



شکل ۶-۳۴ مثالی از واپاشی β^- ، برای توریم ۲۳۴ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۶-۳۴ 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.



چن نینگ یانگ (۱۹۰۱-۱۹۹۴)، فیزیکدان چینی، برنده نوبل فیزیک در سال ۱۹۵۷، در زمینه‌های فیزیک ذرات بنیادی و فیزیک نظری، از جمله نظریه‌های میدان کوانتومی و نظریه‌های همبستگی، تحقیقاتی عمیق انجام داد. او یکی از بنیان‌گذاران فیزیک ذرات بنیادی مدرن است. چن نینگ یانگ در سال ۱۹۲۲ در شانگهای متولد شد. او در سال ۱۹۴۵ میلادی به آمریکا مهاجرت کرد و در سال ۱۹۴۷ به دانشگاه پرینستون پیوست. او در سال ۱۹۵۷ نوبل فیزیک را به اشتراک با لی یانگ و پائولی دیراک دریافت کرد. او همچنین یکی از بنیان‌گذاران فیزیک ذرات بنیادی مدرن است.

تمرین ۶-۲

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

در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذره گسیل‌شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار e^- حامل بار e^+ است. به این الکترون مثبت، پوزیترون می‌گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می‌شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می‌دهد این است که یکی از پروتون‌های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می‌شود. فرایند واپاشی β^+ با رابطه زیر بیان می‌شود^۱.



^۱ در واپاشی β^+ ، ذره‌ای دیگر به نام نوتینو را نیز باید در نظر بگیریم (${}^0_{+1} e^+ + \nu$). همچنین در واپاشی β^- ذره‌ای دیگر به نام پادنوتینو را نیز باید در نظر بگیریم (${}^0_{-1} e^- + \bar{\nu}$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

فیزيك ۳۳

خونریزی است که اغلب با بی حسی موضعی صورت می گیرد. مدت زمان بستری شدن در بیمارستان، خیلی کوتاه تر از جراحی به روش معمول است و بیمار پس از چند روز، به روال زندگی عادی خود باز می گردد.

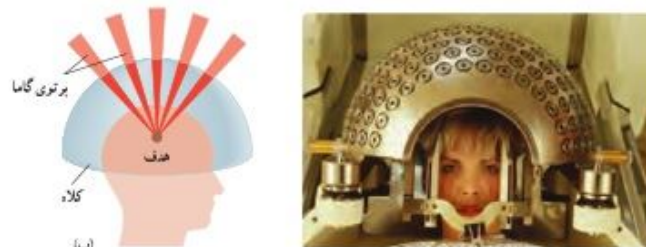


(الف) در جراحی یا پرتو گاما، کلاه ایمنی فلزی ای که سوراخ های کوچکی دارد روی سر بیمار قرار داده می شود.
(ب) پرتوهای گاما پس از عبور از این سوراخ ها، روی هدف تعیین شده در مغز، متمرکز می شوند.

علاج بیمار بیمار

فیزيك ۳۳

خونریزی است که اغلب با بی حسی موضعی صورت می گیرد. مدت زمان بستری شدن در بیمارستان، خیلی کوتاه تر از جراحی به روش معمول است و بیمار پس از چند روز، به روال زندگی عادی خود باز می گردد.



(الف) در جراحی یا پرتو گاما، کلاه ایمنی فلزی ای که سوراخ های کوچکی دارد روی سر بیمار قرار داده می شود.
(ب) پرتوهای گاما پس از عبور از این سوراخ ها، روی هدف تعیین شده در مغز، متمرکز می شوند.

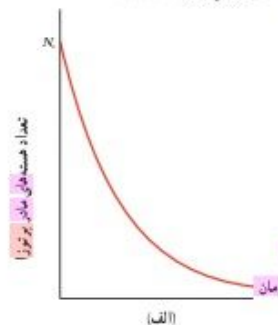
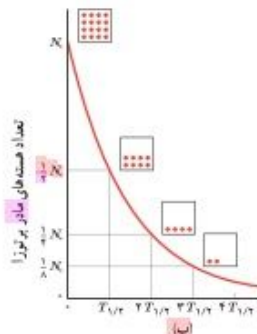
علاج بیمار بیمار

نیمه عمر: ایزوتوپ های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می شوند. برای یک نمونه از یک ماده پرتوزا، بر اساس داده های تجربی می توان بیان کرد که در پایان زمان معینی، چه کسری از ماده پرتوزا و امی باشد. برای مثال در مورد هسته های توریم ^{232}Th پس از زمان معینی می توان گفت که چه کسری از آنها به رادیم ^{228}Ra تبدیل شده است.

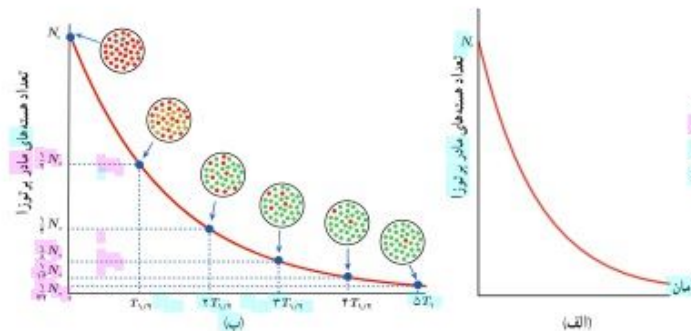


دورالیند باتلر (۱۸۹۷-۱۹۹۲ م.)
فیزیکدان آمریکایی، پس از دریافت
دکترای فیزیک هسته ای، در زمینه کاربرد
ایزوتوپ های پرتوزا در روشی تحقیق
کرد. وی روش ایمنی سنجی با نایس را
ایجاد کرد، که در آن از ردیاب های پرتوزا
برای اندازه گیری مقدار کم مواد در خون
یا سایر مایعات استفاده می شود. اهمیت
این روش با اعطای جایزه نوبل به وی در
سال ۱۹۵۷ به وی مشخص شد.

برای بررسی بیشتر این موضوع، یک نمونه پرتوزا را در نظر بگیرید. فرض کنید در لحظه $t=0$ تعداد هسته های مادر پرتوزای موجود در این نمونه، برابر N_0 باشد. اگر نمودار تغییرات تعداد هسته های مادر موجود در نمونه را برحسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۹-۶ الف به دست می آید. همان طور که روی نمودار نیز دیده می شود، پس از گذشت زمان کافی، تعداد هسته های مادر موجود در نمونه، به صفر میل می کند. برای درک بهتر این نمودار، کمیتی به نام نیمه عمر را معرفی می کنیم و آن را با نماد $T_{1/2}$ نشان می دهیم. بنا به تعریف، نیمه عمر، مدت زمانی است که طول می کشد تا تعداد هسته های مادر موجود در یک نمونه، به نصف برسد (شکل ۹-۶ ب). برخی از ایزوتوپ ها مانند اورانیم ^{238}U ، دارای نیمه عمری در حدود سن زمین (4.5 میلیارد سال) هستند. این عناصر منشأ پرتوزایی طبیعی در محیط پیرامون ما هستند.



شکل ۹-۶ الف) با گذشت زمان، تعداد هسته های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می یابد. ب) با گذشت هر نیمه عمر، نیمی از هسته های مادر پرتوزای باقی مانده واپاشی می کنند.



شکل ۹-۶ ب) با گذشت زمان، تعداد هسته های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می یابد. ب) با گذشت هر نیمه عمر، نیمی از هسته های مادر پرتوزای باقی مانده (دایره های قرمز) واپاشی می کنند.

فصل ۷: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

مثال ۱-۶

در حادثه انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، پدیده $(^{131}_{53}\text{I})$ ، یکی از ایزوتوپ‌هایی بود که وارد محیط‌زیست شد. این ایزوتوپ، **فراز** است و همراه با جریان‌های جوی، تا کشورهای دور دست از محل نیروگاه حرکت کرد و با نشست روی برگ گیاهان، سبب آلودگی **گوشت** و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه‌عمر این ایزوتوپ پرتوزا تقریباً ۸ روز است. پس از گذشت ۴۰ روز از **حادثه چرنوبیل**، چه کسری از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی مانده بود؟

پاسخ: نیمه‌عمر ایزوتوپ پدیده $(^{131}_{53}\text{I})$ برابر ۸ روز است و ۴۰ روز را معادل ۵ نیمه‌عمر $(^{131}_{53}\text{I})$ در نظر می‌گیریم. اگر N_0 تعداد هسته‌های مادر اولیه باشد، پس از گذشت ۴۰ روز جدول زیر را می‌توان تنظیم کرد.

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

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

اگر تعداد هسته‌های مادر اولیه در یک نمونه پرتوزا N_0 باشد، پس از گذشت زمان t ، تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(۶-۶) \quad N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (\text{تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده})$$

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

تمرین ۴-۶

پس از گذشت ۹ روز، تعداد هسته‌های پرتوزای یک نمونه، به $\frac{1}{8}$ تعداد موجود در آغاز کاهش یافته است. نیمه‌عمر (بر حسب 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 شناسایی رادون مورد آزمایش قرار گیرند.

۱- در این کتاب صرفاً حل مسئله‌هایی مورد نظر است که در آنها n عددی صحیح باشد و سایر حالت‌های دیگر نیاز به در نظر گرفتن دارد.

فصل ۷: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

مثال ۱-۶

در حادثه انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، پدیده $(^{131}_{53}\text{I})$ ، یکی از ایزوتوپ‌هایی بود که وارد محیط‌زیست شد. این ایزوتوپ، **فراز** است و همراه با جریان‌های جوی، تا کشورهای دور دست از محل نیروگاه حرکت کرد و با نشست روی برگ گیاهان، سبب آلودگی **گوشت** و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه‌عمر این ایزوتوپ پرتوزا تقریباً ۸ روز است. پس از گذشت ۴۰ روز از **حادثه چرنوبیل**، چه کسری از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی مانده بود؟

پاسخ: نیمه‌عمر ایزوتوپ پدیده $(^{131}_{53}\text{I})$ برابر ۸ روز است و ۴۰ روز را معادل ۵ نیمه‌عمر $(^{131}_{53}\text{I})$ در نظر می‌گیریم. اگر N_0 تعداد هسته‌های مادر اولیه باشد، پس از گذشت ۴۰ روز جدول زیر را می‌توان تنظیم کرد.

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

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

اگر تعداد هسته‌های مادر اولیه در یک نمونه پرتوزا N_0 باشد، پس از گذشت زمان t ، تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(۶-۶) \quad N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (\text{تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده})$$

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

تمرین ۴-۶

پس از گذشت ۹ روز، تعداد هسته‌های پرتوزای یک نمونه، به $\frac{1}{8}$ تعداد موجود در آغاز کاهش یافته است. نیمه‌عمر (بر حسب 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 شناسایی رادون مورد آزمایش قرار گیرند.

۱- در این کتاب صرفاً حل مسئله‌هایی مورد نظر است که در آنها n عددی صحیح باشد و سایر حالت‌های دیگر نیاز به در نظر گرفتن دارد.

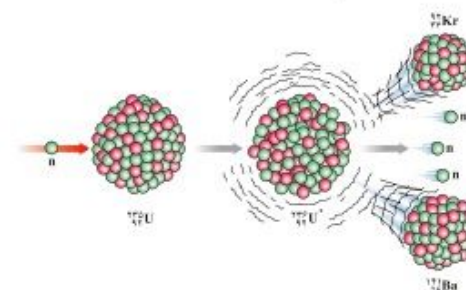
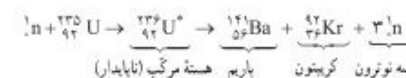
فیزیک ۳



اوتو هان (۱۹۰۱-۱۹۸۸ م.)، فیزیکدان آلمانی به خاطر فعالیت‌هایش در زمینه شکافت هسته‌ای، جایزه نوبل شیمی را در سال ۱۹۴۴ دریافت کرد. وی پس از جنگ جهانی دوم تا سال ۱۹۶۰ ریاست مؤسسه بازتأسیس ماکس پلانک را به عهده داشت که یکی از معتبرترین مراکز پژوهشی در پیشبرد علوم است.

۳-۶ شکافت هسته‌ای

در سال ۱۹۳۹ میلادی گروهی از دانشمندان آلمانی، کشف کردند که هسته اورانیم ^{235}U پس از جذب نوترون، به دو تکه تقسیم می‌شود و هر تکه، جرم کمتری از هسته اولیه دارد. فرایند تقسیم شدن یک هسته سنگین به دو هسته با جرم کمتر، **شکافت هسته‌ای** نامیده می‌شود. در فرایند شکافت اورانیم، ترکیب‌های متفاوتی از هسته‌های کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون (بین ۲ تا ۵) به وجود می‌آید. شکل ۶-۱، یکی از این واکنش‌های ممکن شکافت را نشان می‌دهد که در آن هسته اورانیم ^{235}U پس از جذب نوترون و تبدیل به ایزوتوپ ناپایدار ^{236}U ، به هسته‌های باریوم ^{141}Ba و کریپتون ^{92}Kr تقسیم شده است. واکنش وقتی شروع می‌شود که نوترونی کُند (یا انرژی جنبشی در حدود 0.02 eV) توسط هسته ^{235}U جذب و هسته مرکب ^{236}U ایجاد شود. این هسته مرکب در کمتر از 10^{-14} s و مطابق واکنش زیر واپاشیده می‌شود:



شکل ۶-۱ واکنش شکافت ^{235}U با جذب یک نوترون کُند شروع می‌شود.

وقتی نوترونی با هسته اورانیم ^{235}U برخورد کند و جذب شود، هسته اورانیم شروع به ارتعاش می‌کند و تغییر شکل می‌دهد. ارتعاش تا وقتی ادامه می‌یابد که تغییر شکل چنان جدی شود که نیروی جاذبه هسته‌ای دیگر نتواند با نیروی دافعه الکتروستاتیکی بین پروتون‌های هسته متوازن شود. در این هنگام، هسته به پاره‌هایی وامی‌بندد که حامل انرژی (به‌طور عمده انرژی جنبشی) هستند. واکنش زنجیری؛ همان‌طور که دیدیم فرایند شکافت ^{235}U با جذب یک نوترون کُند آغاز می‌شود. اگر محصولات شکافت، باریوم ^{141}Ba و کریپتون ^{92}Kr باشند، در این فرایند ۳ نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند، هسته‌های دیگر آنها را دفع نمی‌کنند. نوترون‌ها پس از کُند شدن، توسط هسته‌های دیگر جذب می‌شوند و باعث شکافت در ۳ هسته اورانیم دیگر می‌شوند و ۹ نوترون آزاد می‌کنند. اگر هر یک از این نوترون‌ها نیز موفق به شکافت یک هسته اورانیم شود، ۲۷ نوترون آزاد می‌شود و به همین ترتیب تا آخر. این رشته واکنش را، واکنش زنجیری می‌نامند (شکل ۶-۱۱).

۱- به‌طور میانگین ۲.۴ نوترون در هر واکنش شکافت آزاد می‌شود.

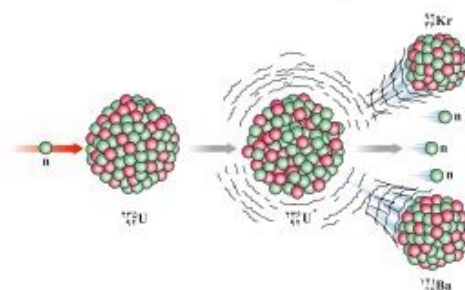
فیزیک ۳



لیزه مایتنر (۱۸۷۸-۱۹۸۰ م.)، فیزیکدان آلمانی به واسطه تحقیقاتش در خصوص انرژی هسته‌ای، جایزه نوبل شیمی را در سال ۱۹۴۴ دریافت کرد. وی پس از جنگ جهانی دوم تا سال ۱۹۶۰ ریاست مؤسسه بازتأسیس ماکس پلانک را به عهده داشت که یکی از معتبرترین مراکز پژوهشی در پیشبرد علوم است.

۳-۶ شکافت هسته‌ای

در سال ۱۹۳۹ میلادی گروهی از دانشمندان آلمانی، کشف کردند که هسته اورانیم ^{235}U پس از جذب نوترون، به دو تکه تقسیم می‌شود و هر تکه، جرم کمتری از هسته اولیه دارد. فرایند تقسیم شدن یک هسته سنگین به دو هسته با جرم کمتر، **شکافت هسته‌ای** نامیده می‌شود. در فرایند شکافت اورانیم، ترکیب‌های متفاوتی از هسته‌های کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون (بین ۲ تا ۵) به وجود می‌آید. شکل ۶-۱، یکی از این واکنش‌های ممکن شکافت را نشان می‌دهد که در آن هسته اورانیم ^{235}U پس از جذب نوترون و تبدیل به ایزوتوپ ناپایدار ^{236}U ، به هسته‌های باریوم ^{141}Ba و کریپتون ^{92}Kr تقسیم شده است. واکنش وقتی شروع می‌شود که نوترونی کُند (یا انرژی جنبشی در حدود 0.02 eV) توسط هسته ^{235}U جذب و هسته مرکب ^{236}U ایجاد شود. این هسته مرکب در کمتر از 10^{-14} s و مطابق واکنش زیر واپاشیده می‌شود:



شکل ۶-۱ واکنش شکافت ^{235}U با جذب یک نوترون کُند شروع می‌شود.

وقتی نوترونی با هسته اورانیم ^{235}U برخورد کند و جذب شود، هسته اورانیم شروع به ارتعاش می‌کند و تغییر شکل می‌دهد. ارتعاش تا وقتی ادامه می‌یابد که تغییر شکل چنان جدی شود که نیروی جاذبه هسته‌ای دیگر نتواند با نیروی دافعه الکتروستاتیکی بین پروتون‌های هسته متوازن شود. در این هنگام، هسته به پاره‌هایی وامی‌بندد که حامل انرژی (به‌طور عمده انرژی جنبشی) هستند. واکنش زنجیری؛ همان‌طور که دیدیم فرایند شکافت ^{235}U با جذب یک نوترون کُند آغاز می‌شود. اگر محصولات شکافت، باریوم ^{141}Ba و کریپتون ^{92}Kr باشند، در این فرایند ۳ نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند، هسته‌های دیگر آنها را دفع نمی‌کنند. نوترون‌ها پس از کُند شدن، توسط هسته‌های دیگر جذب می‌شوند و باعث شکافت در ۳ هسته اورانیم دیگر می‌شوند و ۹ نوترون آزاد می‌کنند. اگر هر یک از این نوترون‌ها نیز موفق به شکافت یک هسته اورانیم شود، ۲۷ نوترون آزاد می‌شود و به همین ترتیب تا آخر. این رشته واکنش را، واکنش زنجیری می‌نامند (شکل ۶-۱۱).

۱- به‌طور میانگین ۲.۴ نوترون در هر واکنش شکافت آزاد می‌شود.

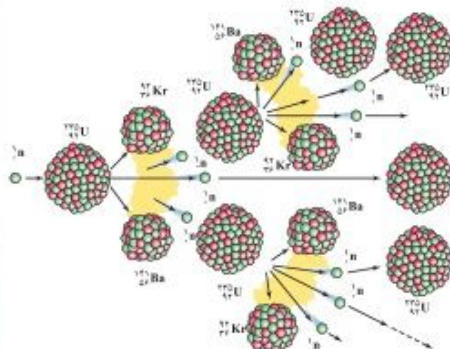
فصل ۷: آشنایی با فیزیک هسته‌ای



فریتز اشتراسن (۱۹۸۰-۱۹۰۲م.)، فیزیکدان آلمانی یکی از دستیاران اوتهان در پروژه شکافت اورانیم در سال ۱۹۳۸ بود. وی توانست باره‌های حاصل از شکافت را که توسط نوترون‌های گند بمباران شده بودند شناسایی کند. اشتراسن برای سال‌ها پس از جنگ جهانی دوم، مدیر بخش شیمی مؤسسه ماکس پلانک بود.



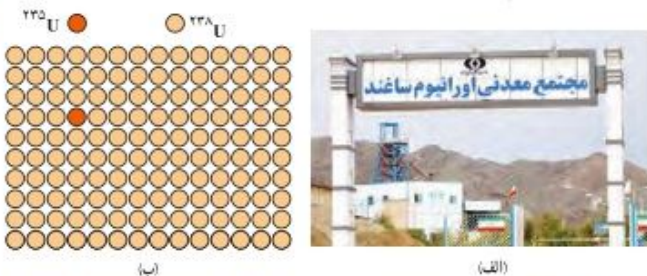
اوتو هان (۱۹۷۹-۱۸۹۰م.)، فیزیکدان آلمانی، مدیر گروهی در لوس آلانوس بود که در سال ۱۹۳۴ میلادی مقدار دقیق جرم اورانیم، غنی‌شده لازم برای ساختن بمب اتمی را به دست آورد، به طوری که این جرم بحرانی، قادر باشد فرایند شکافت را به طور زنجیری ادامه دهد.



شکل ۱۱-۶ مدل ساده‌ای از واکنش زنجیری. یک نوترون وارد هسته اورانیم ۲۳۵ می‌شود و فرایند شکافت رخ می‌دهد. برای سادگی، به‌جای باریم و کربتون، محصولات دیگر شکافت را در این شکل نشان داده‌ایم.

در واکنش‌های شکافت هسته‌ای، جرم محصولات شکافت، کمتر از جرم هسته مرکب است. این اختلاف جرم بنا به رابطه $E = mc^2$ ، سبب آزاد شدن انرژی گرمایی زیادی می‌شود. انرژی‌ای که توسط محصولات شکافت حمل می‌شود عمدتاً به شکل انرژی جنبشی است. در هر واکنش شکافت حدود 200 MeV انرژی آزاد می‌شود. این انرژی، 10^8 برابر انرژی آزادشده به‌ازای هر مولکول در یک واکنش شیمیایی معمولی، نظیر سوختن بنزین با زغال سنگ است. حتی در انفجار تری‌نیترو تولوئن (TNT)، انرژی آزادشده به‌ازای هر مولکول، در حدود 30 eV است.

شکل ۱۲-۶ الف، تصویری از ورودی مجتمع معدنی اورانیم ساغند (واقع در حوالی شهر اردکان یزد) را نشان می‌دهد. ممکن است این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیری به‌طور طبیعی در این معدن و دیگر معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟ پاسخ این است که در سنگ معدن اورانیم، دو ایزوتوپ ^{235}U و ^{238}U وجود دارد، به طوری که فراوانی ایزوتوپ ^{235}U حدود 0.72% درصد است. به عبارت دیگر از هر 140 اتم اورانیم موجود در سنگ معدن اورانیم، تنها یکی از آنها ایزوتوپ ^{235}U و مابقی ایزوتوپ ^{238}U است (شکل ۱۲-۶ ب). اگرچه ^{235}U فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیم است، احتمال اینکه نوترونی را گیر بیندازد و شکافته شود، بسیار کم است و در نتیجه واکنش زنجیری را ناممکن می‌سازد.

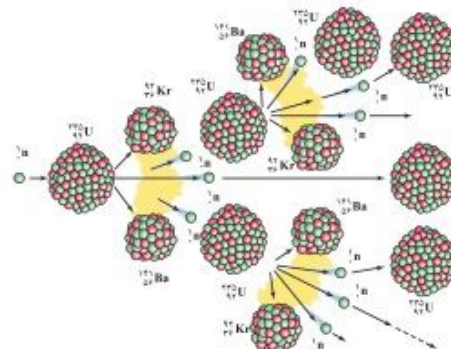


شکل ۱۲-۶ الف) معدن اورانیم ساغند با بیشترین ظرفیت تولید در ایران در حوالی شهر اردکان یزد واقع است. ب) در سنگ معدن اورانیم از هر 140 اتم اورانیم، تنها یکی ایزوتوپ ^{235}U است.

فصل ۷: آشنایی با فیزیک هسته‌ای



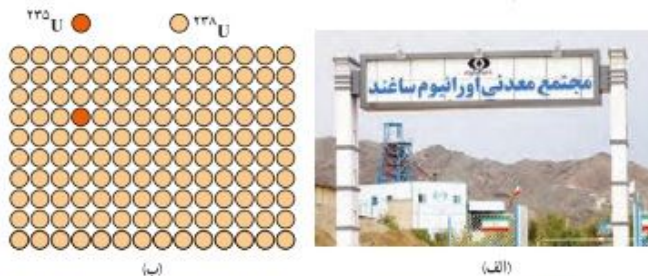
فریتز اشتراسن (۱۹۸۰-۱۹۰۲م.)، فیزیکدان آلمانی یکی از دستیاران اوتهان در پروژه شکافت اورانیم در سال ۱۹۳۸ بود. وی توانست باره‌های حاصل از شکافت را که توسط نوترون‌های گند بمباران شده بودند شناسایی کند. اشتراسن برای سال‌ها پس از جنگ جهانی دوم، مدیر بخش شیمی مؤسسه ماکس پلانک بود.



شکل ۱۱-۶ مدل ساده‌ای از واکنش زنجیری. یک نوترون وارد هسته اورانیم ۲۳۵ می‌شود و فرایند شکافت رخ می‌دهد. برای سادگی، به‌جای باریم و کربتون، محصولات دیگر شکافت را در این شکل نشان داده‌ایم.

در واکنش‌های شکافت هسته‌ای، جرم محصولات شکافت، کمتر از جرم هسته مرکب است. این اختلاف جرم بنا به رابطه $E = mc^2$ ، سبب آزاد شدن انرژی گرمایی زیادی می‌شود. انرژی‌ای که توسط محصولات شکافت حمل می‌شود عمدتاً به شکل انرژی جنبشی است. در هر واکنش شکافت حدود 200 MeV انرژی آزاد می‌شود. این انرژی، 10^8 برابر انرژی آزادشده به‌ازای هر مولکول در یک واکنش شیمیایی معمولی، نظیر سوختن بنزین با زغال سنگ است. حتی در انفجار تری‌نیترو تولوئن (TNT)، انرژی آزادشده به‌ازای هر مولکول، در حدود 30 eV است.

شکل ۱۲-۶ الف، تصویری از ورودی مجتمع معدنی اورانیم ساغند (واقع در حوالی شهر اردکان یزد) را نشان می‌دهد. ممکن است این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیری به‌طور طبیعی در این معدن و دیگر معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟ پاسخ این است که در سنگ معدن اورانیم، دو ایزوتوپ ^{235}U و ^{238}U وجود دارد، به طوری که فراوانی ایزوتوپ ^{235}U حدود 0.72% درصد است. به عبارت دیگر از هر 140 اتم اورانیم موجود در سنگ معدن اورانیم، تنها یکی از آنها ایزوتوپ ^{235}U و مابقی ایزوتوپ ^{238}U است (شکل ۱۲-۶ ب). اگرچه ^{235}U فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیم است، احتمال اینکه نوترونی را گیر بیندازد و شکافته شود، بسیار کم است و در نتیجه واکنش زنجیری را ناممکن می‌سازد.



شکل ۱۲-۶ الف) معدن اورانیم ساغند با بیشترین ظرفیت تولید در ایران در حوالی شهر اردکان یزد واقع است. ب) در سنگ معدن اورانیم از هر 140 اتم اورانیم، تنها یکی ایزوتوپ ^{235}U است.

فیزیک ۳۳

غنی‌سازی اورانیم : همان‌طور که اشاره کردیم، واکنش زنجیری در سنگ معدن اورانیم رخ نمی‌دهد. برای استفاده از اورانیم به‌عنوان سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای یا استفاده در انفجارهای هسته‌ای، باید فراوانی ایزوتوپ ^{235}U را در یک نمونه اورانیم، افزایش دهیم. به فرایند افزایش درصد یا غلظت ایزوتوپ ^{235}U در یک نمونه، **غنی‌سازی** گفته می‌شود. بیشتر راکتورهای تجاری تولید برق، مانند راکتور نیروگاه هسته‌ای بوشهر، از اورانیمی استفاده می‌کنند که در آنها ایزوتوپ ^{235}U تا ۳ درصد غنی‌سازی شده است. همچنین در بیشتر راکتورهای پژوهشی، مانند راکتور پژوهشی دانشگاه تهران، از سوختی استفاده می‌شود که ایزوتوپ ^{235}U تا ۲۰ درصد غنی‌سازی شده است.

شیوه‌های مرسوم غنی‌سازی اورانیم

جداسازی ایزوتوپ کمیاب ^{235}U از ایزوتوپ فراوان ^{238}U بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسانند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی برای جداسازی آنها استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ بر اساس اختلاف جرم آنها صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های انجام این کار، استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلوئور به‌صورت گاز هگزا فلورید اورانیم (UF_6) درمی‌آید؛ در این گاز، تندی متوسط ایزوتوپ ^{235}U کمی بیشتر از ایزوتوپ سنگین‌تر ^{238}U است. به همین دلیل ایزوتوپ ^{235}U از غشاهای نازکی که در این روش جداسازی به کار می‌رود، راحت‌تر می‌گذرد. پدیده پخش پس از طی هزاران مرحله، سرانجام منجر به تولید اورانیم با غنای مناسب می‌شود. غنی‌سازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی، نیز رایج است. در این روش، گاز هگزا فلورید اورانیم در یک استوانه چرخان فوق سریع (معمولاً ۵۰ هزار دور در دقیقه) به حرکت درمی‌آید. مولکول‌های گاز که حاوی ^{238}U هستند، سنگین‌ترند و به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های سبک‌تر حاوی ^{235}U ، از مرکز دستگاه استخراج می‌شوند.

فیزیک ۳۳

غنی‌سازی اورانیم : همان‌طور که اشاره کردیم، واکنش زنجیری در سنگ معدن اورانیم رخ نمی‌دهد. برای استفاده از اورانیم به‌عنوان سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای یا استفاده در انفجارهای هسته‌ای، باید فراوانی ایزوتوپ ^{235}U را در یک نمونه اورانیم، افزایش دهیم. به فرایند افزایش درصد یا غلظت ایزوتوپ ^{235}U در یک نمونه، **غنی‌سازی** گفته می‌شود. بیشتر راکتورهای تجاری تولید برق، مانند راکتور نیروگاه هسته‌ای بوشهر، از اورانیمی استفاده می‌کنند که در آنها ایزوتوپ ^{235}U تا ۳ درصد غنی‌سازی شده است. همچنین در بیشتر راکتورهای پژوهشی، مانند راکتور پژوهشی دانشگاه تهران، از سوختی استفاده می‌شود که ایزوتوپ ^{235}U تا ۲۰ درصد غنی‌سازی شده است.

شیوه‌های مرسوم غنی‌سازی اورانیم

جداسازی ایزوتوپ کمیاب ^{235}U از ایزوتوپ فراوان ^{238}U بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسانند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی برای جداسازی آنها استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ بر اساس اختلاف جرم آنها صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های انجام این کار، استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلوئور به‌صورت گاز هگزا فلورید اورانیم (UF_6) درمی‌آید؛ در این گاز، تندی متوسط ایزوتوپ ^{235}U کمی بیشتر از ایزوتوپ سنگین‌تر ^{238}U است. به همین دلیل ایزوتوپ ^{235}U از غشاهای نازکی که در این روش جداسازی به کار می‌رود، راحت‌تر می‌گذرد. پدیده پخش پس از طی هزاران مرحله، سرانجام منجر به تولید اورانیم با غنای مناسب می‌شود. غنی‌سازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی، نیز رایج است. در این روش، گاز هگزا فلورید اورانیم در یک استوانه چرخان فوق سریع (معمولاً ۵۰ هزار دور در دقیقه) به حرکت درمی‌آید. مولکول‌های گاز که حاوی ^{238}U هستند، سنگین‌ترند و به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های سبک‌تر حاوی ^{235}U ، از مرکز دستگاه استخراج می‌شوند.



راکتور فرمی (۱۹۵۴-۱۹۶۰ م.)
فیزیکدان ایتالیایی-آمریکایی
حوزه‌های فیزیک جدید، هم به لحاظ نظری و هم در حوزه فعالیت‌های آزمایشگاهی و تجربی سهم به‌سزایی داشت. وی در سال ۱۹۴۰ نظریه‌ای برای وابستگی پیکر پخشندار کرد که هنوز به کار می‌رود. فرمی نخستین دانشمندی بود که تبدیل عناصر را و اثر پیکرانی نوترونی نشان داد و برای این کار جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۳۸ را دریافت کرد. وی همچنین روند ساخت اولین راکتور هسته‌ای را در دانشگاه شیکاگو هدایت کرد.

راکتورهای شکافت هسته‌ای : نوترون‌های آزادشده در فرایند شکافت ایزوتوپ ^{235}U ، انرژی جنبشی زیادی دارند (به‌طور متوسط حدود ۲ MeV) و به نوترون‌های شتاب‌دار معروف‌اند. این نوترون‌ها، با احتمال بسیار بیشتری جذب ایزوتوپ ^{238}U می‌شوند. تجربه نشان می‌دهد اگر بتوان نوترون‌های تند را به نحوی شتاب‌ده ساخت که انرژی جنبشی آنها به حدود ۰.۴ eV / کمتر از آن برسد، احتمال جذب آنها توسط ایزوتوپ‌های ^{235}U افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای ایجاد واکنش زنجیری شکافت، کافی باشد. آب معمولی (H_2O)، آب سنگین (D_2O) و گرافیت (اتم‌های کربن) از جمله موادی هستند که به‌عنوان **کنش‌ساز** نوترون‌ها در واکنش‌های شکافت هسته‌ای استفاده می‌شوند. راکتور هسته‌ای، جایی است که در آن واکنش زنجیری شکافت به‌شکل کنترل شده رخ می‌دهد. اولین راکتور هسته‌ای به‌منظور شکافت ^{235}U ، در سال ۱۹۴۲ میلادی توسط ایزیکو فرمی و همکارانش در دانشگاه شیکاگو ساخته شد. امروزه راکتورهایی با انواع و اندازه‌های مختلف ساخته شده‌اند که بیشتر به منظور تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های هسته‌ای به کار می‌روند (شکل ۶-۱۳ الف).



راکتور فرمی (۱۹۵۴-۱۹۶۰ م.)
فیزیکدان ایتالیایی-آمریکایی
حوزه‌های فیزیک جدید، هم به لحاظ نظری و هم در حوزه فعالیت‌های آزمایشگاهی و تجربی سهم به‌سزایی داشت. وی در سال ۱۹۴۰ نظریه‌ای برای وابستگی پیکر پخشندار کرد که هنوز به کار می‌رود. فرمی نخستین دانشمندی بود که تبدیل عناصر را و اثر پیکرانی نوترونی نشان داد و برای این کار جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۳۸ را دریافت کرد. وی همچنین روند ساخت اولین راکتور هسته‌ای را در دانشگاه شیکاگو هدایت کرد.

راکتورهای شکافت هسته‌ای : نوترون‌های آزادشده در فرایند شکافت ایزوتوپ ^{235}U ، انرژی جنبشی زیادی دارند (به‌طور متوسط حدود ۲ MeV) و به نوترون‌های شتاب‌دار معروف‌اند. این نوترون‌ها، با احتمال بسیار بیشتری جذب ایزوتوپ ^{238}U می‌شوند. تجربه نشان می‌دهد اگر بتوان نوترون‌های تند را به نحوی شتاب‌ده ساخت که انرژی جنبشی آنها به حدود ۰.۴ eV / کمتر از آن برسد، احتمال جذب آنها توسط ایزوتوپ‌های ^{235}U افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای ایجاد واکنش زنجیری شکافت، کافی باشد. آب معمولی (H_2O)، آب سنگین (D_2O) و گرافیت (اتم‌های کربن) از جمله موادی هستند که به‌عنوان **کنش‌ساز** نوترون‌ها در واکنش‌های شکافت هسته‌ای استفاده می‌شوند. راکتور هسته‌ای، جایی است که در آن واکنش زنجیری شکافت به‌شکل کنترل شده رخ می‌دهد. اولین راکتور هسته‌ای به‌منظور شکافت ^{235}U ، در سال ۱۹۴۲ میلادی توسط ایزیکو فرمی و همکارانش در دانشگاه شیکاگو ساخته شد. امروزه راکتورهایی با انواع و اندازه‌های مختلف ساخته شده‌اند که بیشتر به منظور تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های هسته‌ای به کار می‌روند (شکل ۶-۱۳ الف).

شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟
II. نیمه عمر پسیوم ۲۱۲ حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه، در نمونه ای از این پسیوم، باقی می ماند؟

۳-۶ شکافت هسته ای

IV. معادله زیر بخشی از واکنشی را نشان می دهد که در یک راکتور هسته ای روی می دهد.



(الف) اهمیت عددی ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.
 (ب) اتم های $^{236}_{92}\text{U}$ ناپایدارند و خود به خود به قطعه هایی کوچک تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی انرژی واپاشیده می شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می شود؟
 (پ) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون های با تندی کم را جذب می کند تا نوترون های سریع را. توضیح دهید چگونه تندی نوترون ها را در قلب راکتور کم می کنند.

(ث) چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می کنند؟

(ث) واکنش زنجیری را توضیح دهید.

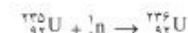
(ج) انرژی به صورت گرما در قلب راکتور تولید می شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می شود؟
 (ج) هنگامی که میله های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می شوند، آنها «برنوزا» و «ایزوتوپ» هایی با «نیمه عمر» طولانی هستند. واژه های داخل گیومه را توضیح دهید.

III. (الف) حدود ۰/۷۲ درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود ۲۰۰ MeV انرژی آزاد می شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در 1 kg از این اورانیم بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی برحسب مگا الکترون ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟
 (ب) با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود ۳۰ MJ انرژی

شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟
II. نیمه عمر پسیوم ۲۱۲ حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه، در نمونه ای از این پسیوم، باقی می ماند؟

۳-۶ شکافت هسته ای

IV. معادله زیر بخشی از واکنشی را نشان می دهد که در یک راکتور هسته ای روی می دهد.



(الف) اهمیت عددی ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.
 (ب) اتم های $^{236}_{92}\text{U}$ ناپایدارند و خود به خود به قطعه هایی کوچک تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی انرژی واپاشیده می شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می شود؟
 (پ) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون های با تندی کم را جذب می کند تا نوترون های سریع را. توضیح دهید چگونه تندی نوترون ها را در قلب راکتور کم می کنند.

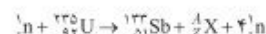
(ث) چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می کنند؟

(ث) واکنش زنجیری را توضیح دهید.

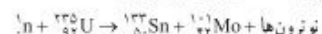
(ج) انرژی به صورت گرما در قلب راکتور تولید می شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می شود؟
 (ج) هنگامی که میله های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می شوند، آنها «برنوزا» و «ایزوتوپ» هایی با «نیمه عمر» طولانی هستند. واژه های داخل گیومه را توضیح دهید.

III. (الف) حدود ۰/۷۲ درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود ۲۰۰ MeV انرژی آزاد می شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در 1 kg از این اورانیم بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی برحسب مگا الکترون ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟
 (ب) با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود ۳۰ MJ انرژی

گرمایی آزاد می شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در قسمت الف، انرژی تولید شود؟
III. یکی از واکنش های ممکن در شکافت $^{235}_{92}\text{U}$ ، داده شده است. در این واکنش عدد اتمی Z، عدد جرمی A و عنصر X را در ^A_ZX تعیین کنید.



در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.
II. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می شود؟



IV. بازده نیروگاه هسته ای بوشهر حدود ۳۵ درصد است. یعنی ۶۵ درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵، به صورت گرما تلف و حدود ۳۵ درصد آن، به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود ۲۰۰ MeV انرژی آزاد می شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت پیدا می کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان پایدار ۱۰۰۰ مگاوات کار می کند.)

۴-۶ گداحت هسته ای

IV. انرژی آزاد شده در هر واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ با یک نوترون کُند حدود ۲۰۲/۵ MeV و در هر واکنش گداحت دوتریم با ترتیم حدود ۱۷/۶ MeV است.
 (الف) تعداد نوکلئون های شرکت کننده در هر واکنش شکافت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید.
 (ب) تعداد نوکلئون های شرکت کننده در هر واکنش گداحت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

(پ) نتیجه های قسمت (الف) و (ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی، و با توجه به اینکه مواد قابل شکافت مانند ^{235}U به مقدار بسیار کمی در طبیعت وجود دارد ولی دوتریم به طور فراوان در آب اقیانوس ها و دریاها موجود است و جدا کردن آن از هیدروژن معمولی آسان و کم هزینه است، اهمیت این مقایسه را توضیح دهید.