بسم الله الرحمن الرحیم

فیزیک (۲) و آزمایشگاه

سال دوم آموزش متوسّطه

رشته‌های علوم تجربی ـ ریاضی و فیزیک

محتوای این کتاب تا پایان سال تحصیلی ۹۵-۱۳۹۴ تغییر نخواهد کرد.

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

برنامه‌ریزی محتوا و نظارت بر تألیف : دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطه نظری
نام کتاب : فیزیک (۲) و آزمایشگاه ـ ۲۲۶/۲
شورای برنامه‌ریزی : احمد احمدی، سیامک خادمی، روح اللّه خلیلی بروجنی، منیژه رهبر، محمدرضا شریف زاده اکباتانی، حیدرشکری، مهرناز طلوع شمس، حمید فدایی فرد، مجید فلاح و اسفندیار معتمدی
مؤلفان : اعظم پورقاضی، سیّدمهدی شیوایی، حسن عزیزی و غلامعلی محمودزاده
اصلاح و بازنگری : احمد احمدی، محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، محمدرضا شریف زاده اکباتانی، مهرناز طلوع شمس و حمید فدایی فرد
آماده‌سازی و نظارت بر چاپ و توزیع : ادارهٔ کلّ نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
تهران : خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)
تلفن : ۹ ـ ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار : ۸۸۳۰۹۲۶۶، کد پستی : ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹،
وب‌سایت : www.chap.sch.ir
مدیر امور فنی و چاپ : سیّد احمد حسینی
رسام : مریم دهقان‌زاده
طراح جلد : مریم کیوان
صفحه‌آرا : راحله زادفتح‌اله
حروفچین : کبری اجابتی، زهرا ایمانی نصر
مصحح : سیف‌الله بیک‌محمد دلیوند، حسین چراغی
امور آماده سازی خبر : سپیده ملک ایزدی
امور فنی رایانه‌ای : حمید ثابت کلاچاهی، فاطمه رئیسیان فیروزآباد
ناشر : شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران : تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (دارو پخش)
تلفن : ۵ ـ ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار : ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی : ۱۳۹ـ ۳۷۵۱۵
چاپخانه : شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
سال انتشار و نوبت چاپ : چاپ چهاردهم ۱۳۹۳

حقّ چاپ محفوظ است.

شابک ۳-۰۷۲۵-۰۵-۹۶۴ ISBN 964-05-0725-3

۱۳۹۳

هر کاری را که انسان باورش این است که نسبت به آن کار ضعیف است، نمی‌تواند آن کار را انجام بدهد. ... هر کشوری که اعتقادش این باشد که نمی‌تواند خودش صنعتی را ایجاد کند این ملت محکوم به این است که تا آخر نتواند، و این اساس نقشه‌هایی بوده است که برای ملل ضعیف دنیا قدرت‌های بزرگ کشیده‌اند.

امام خمینی (رحمة الله علیه)

فهرست

فصل اوّل ــ اندازه‌گیری و کمیت‌های فیزیکی ۱

۱ــ۱ــ اندازه‌گیری ۲
۱ــ۲ــ کمیت‌های فیزیکی ۱۳
پرسش‌های فصل اوّل ۲۴
مسائل فصل اوّل ۲۴

فصل دوم ــ حرکت در خط راست ۲۶

۲ــ۱ــ مکان، جابه‌جایی ۲۸
۲ــ۲ــ سرعت متوسط و سرعت لحظه‌ای ۳۲
۲ــ۳ــ حرکت یکنواخت ۳۶
۲ــ۴ــ شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای ۳۸
۲ــ۵ــ حرکت با شتاب ثابت ۴۲
پرسش‌های فصل دوم ۴۸
مسائل فصل دوم ۴۹

فصل سوم ــ دینامیک ۵۳

۳ــ۱ــ نیرو ۵۴
۳ــ۲ــ قانون‌های نیوتون دربارهٔ حرکت ۵۶
۳ــ۳ــ معرفی چند نیروی خاص ۵۹
۳ــ۴ــ استفاده از قانون‌های نیوتون دربارهٔ حرکت ۷۰
پرسش‌های فصل سوم ۷۳
مسائل فصل سوم ۷۴

فصل چهارم ــ کار و انرژی ۷۶

۴ــ۱ــ کار ۷۷
۴ــ۲ــ رابطهٔ کار و انرژی جنبشی ۸۰
۴ــ۳ــ رابطهٔ کار و انرژی پتانسیل ۸۴
۴ــ۴ــ پایستگی انرژی مکانیکی ۸۶
۴ــ۵ــ توان ۸۹
پرسش‌های فصل چهارم ۹۲
مسائل فصل چهارم ۹۲

فصل پنجم ــ ویژگی‌های ماده ۹۵

۵ــ۱ــ حالت‌های مختلف ماده ۹۶
۵ــ۲ــ چگالی ۹۸
۵ــ۳ــ نیروهای بین‌مولکولی ۱۰۲
۵ــ۴ــ فشار در شاره‌ها ۱۰۶
۵ــ۵ــ محاسبهٔ فشار در مایع‌ها ۱۰۷
پرسش‌های فصل پنجم ۱۱۶
مسائل فصل پنجم ۱۱۶

فصل ششم ــ گرما و قانون گازها ۱۱۸

۶ــ۱ــ دما، انرژی درونی و گرما ۱۱۹
۶ــ۲ــ حالت‌های ماده ۱۲۷
۶ــ۳ــ انبساط گرمایی ۱۳۶
۶ــ۴ــ انتقال گرما ۱۴۴
پرسش‌های فصل ششم ۱۵۶
مسائل فصل ششم ۱۵۶

واژه‌نامه ۱۶۰

فهرست منابع ۱۶۳

سخنی با دانش‌آموزان و همکاران محترم

فیزیک، علمی تجربی و حاصل تلاش انسان برای درک دنیای اطراف است. این علم دانشی آزمودنی است که می‌تواند با مشاهدهٔ پدیده‌های جدید دستخوش تغییر شود. به عبارت دیگر در فیزیک هیچ نظریه‌ای به عنوان حقیقت پایانی و غایی وجود ندارد.

پرورش علمی دانش‌آموزان و برخوردار شدن آنان از سواد علمی فناورانه از لازمه‌های زندگی سالم و موفقیت‌آمیز در جهان امروز است.

به دنبال تحولات سریع در علم و فناوری، شیوه‌های زندگی نیز دچار تغییر زیادی شده است. این امر سبب می‌شود تا نیازهای فردای دانش‌آموزان در زمینهٔ علم و فناوری برای برنامه‌ریزان آموزشی، به‌طور کامل آشکار نباشد. به همین‌دلیل شیوه‌های آموزش فیزیک نیز به تبع نیازهای جدید، تغییرات چشمگیری داشته است.

در شیوه‌های نوین آموزش، تلاش زیادی می‌شود تا دانش‌آموز، چگونگی آموختن را بیاموزد و مهارت برخورد با یک پدیده و پیمودن مراحلی را که منجر به شناسایی آن پدیده می‌شود، فراگیرد. در کتاب‌های درسی فیزیک تلاش شده است، دانش‌آموز در تولید مفاهیم درسی نقش فعالی داشته باشد. قسمتی از نقش دبیران محترم، طرح مناسب موضوع‌های درسی و سپس راهنمایی دانش‌آموزان برای باز کشف مفاهیم مربوط به موضوع‌های مطرح شده است. با توجه به این‌که یکی از موضوعات مورد تأکید در این کتاب، فعال بودن دانش آموزان و نقش داشتن آنها در تولید مفاهیم است، لازم است که؛ همکاران محترم از افزودن مطالب اضافی به مباحث کتاب که به شکل مبسوط در سال‌های آتی به آنها پرداخته خواهد شد، جداً بپرهیزند. تا نقش فعّالی که دانش‌آموزان در تولید مفاهیم می‌توانند داشته باشند، سبب رشد عقلی و مهارتی آنها شود. که این موضوع خود یکی از هدف‌های اصلی آموزش در دوره‌های عمومی و متوسطه است.

مناسب است همکاران محترم، موضوعات درسی را به‌گونه‌ای طرح کنند که اکثر دانش‌آموزان در فرایند آموزش و یادگیری درگیر شوند و مهارت‌های علمی و عملی آنها رشد یابد.

انتظار می‌رود همکاران گرامی هرجا که لازم می‌دانند با تکیه بر تجربهٔ خود و دیگر همکاران، فعالیت و یا آزمایشی را که به یادگیری بهتر دانش‌آموزان کمک می‌کند، طراحی کنند و آنها را به‌طور گروهی برانجام آزمایش‌ها ترغیب کنند و از آنان بخواهند که گزارش کار، پیشنهادها و نتایجی را که از فعالیت می‌گیرند، در دفتر خود ثبت و به کلاس ارائه کنند. چگونگی ارائهٔ این گزارش می‌تواند به عنوان یکی از ملاک‌های ارزشیابی مورد توجه قرار گیرد.

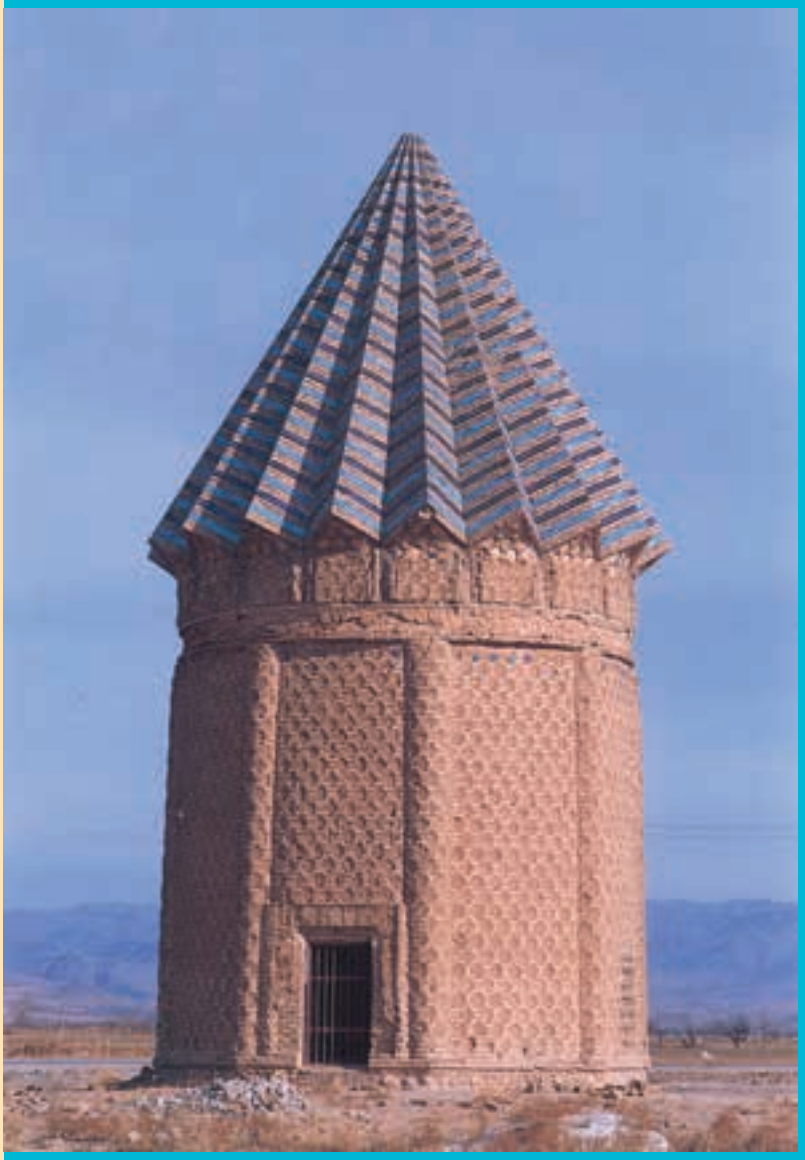
گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطه نظری همواره از دریافت نظرهای ارزشمند دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان جهت رفع نارسایی‌ها و لغزش‌های احتمالی به گرمی استقبال می‌کنند. نظرهای اصلاحی خود را به نشانی تهران ــ صندوق پستی ۱۵۸۵۵/۳۶۳ ــ گروه فیزیک و یا نشانی الکترونیک physics-dept @ talif.sch.ir ارسال نمایید.

گروه فیزیک

دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطه نظری

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

۱ اندازه‌گیری و کمیت‌های فیزیکی



بنایی درطوس ــ خراسان رضوی

یکی از وجوه مشترک فیزیک و معماری اندازه‌گیری است. معماران هنرمند ایرانی از صدها سال پیش با نگاه دقیق به مبانی اندازه‌گیری، اثرهای بدیع و ماندگاری را در طول تاریخ تمدن اسلامی ایران بنا کرده‌اند.

گسترش دانش فیزیک تأثیر زیادی بر زندگی ما داشته است. مطالعهٔ هر بخش از جهان مادی پیرامون ما، چه کوچک چه بزرگ، چه جاندار چه بی‌جان، بدون دانش فیزیک میسر نیست.

شما با فراگیری فیزیک می‌آموزید که چگونه : مشاهده کنید، بررسی کنید، آزمایش انجام دهید و نتایج آزمایش‌ها را به‌صورت مناسب ثبت کنید. فراگیری دانش فیزیک توانایی شما را در انطباق با فناوری در حال تغییر عصر حاضر افزایش می‌دهد.

واژهٔ فیزیک برگرفته از واژهٔ باستانی یونانی Physis به معنای طبیعت و ماهیّت است. تا آنجا که تاریخ مدون علم نشان می‌دهد، فیلسوفان آسیای صغیر در سدهٔ هفتم قبل از میلاد مسیح نخستین کسانی بودند که پرسش‌هایی دربارهٔ طبیعت مطرح ساختند.

اندیشه‌های علمی این فیلسوفان در سدهٔ پنجم قبل از میلاد در یونان و پس از آن در مناطقی مانند مقدونیه، سوریه، مصر و ... به‌ویژه در شهر اسکندریه پی‌گیری شد. کارهای ارشمیدس (متولد سال ۲۸۷ قبل از میلاد مسیح) به‌همین دوره مربوط می‌شود. روش ارشمیدس به روش‌های علمی امروزه نزدیک بود.

پس از ظهور و گسترش اسلام، دانشمندان کشورهای اسلامی مانند ابوریحان بیرونی، ابن‌هیثم، خواجه نصیرالدین طوسی، ابن‌سینا و بسیاری دیگر در زمینه‌های نجوم، اپتیک و مکانیک علم فیزیک را گسترش دادند که بعدها بخشی از این نتایج پایه‌ای برای کارهای گالیله و دیگران شد.

گالیله ضمن بررسی حرکت اجسام روی سطح شیبدار به اندازه‌گیری کمیت‌هایی مانند جرم جسم، زمان حرکت و طول مسیر پرداخت. او سعی کرد رابطه‌ای بین این اندازه‌ها بیابد و نتیجه را به‌صورت ریاضی بیان کند. در روش‌های علمی امروزی نیز دانشمندان در جستجوی روابط ریاضی‌ای هستند که نتایج اندازه‌گیری‌ها را به هم مربوط می‌کنند.

کارشناسان فیزیک یا در شاخه‌های تخصصی فیزیک مانند اختر فیزیک، فیزیک هسته‌ای، نورشناسی، فیزیک اتمی، لیزر و ... فعالیت دارند یا در شاخه‌های مرتبط مانند فیزیک پزشکی، شیمی‌ـ فیزیک، هواشناسی، ژئوفیزیک، مخابرات و ... مشغول به کار هستند.

با توجه به اهمیتی که اندازه‌گیری در فیزیک دارد، قسمت اول این فصل به اندازه‌گیری و نکته‌های مربوط به آن اختصاص دارد. در ادامه کمیت‌های فیزیکی اصلی و فرعی را معرفی می‌کنیم. سپس در مورد کمیت‌های نرده‌ای و برداری و محاسبات ریاضی آنها تا حد نیاز شرح خواهیم داد.

گالیلئو گالیله (۱۰۲۱ـ۹۴۳ هـ. ش) فیزیکدان، منجم و ریاضیدان ایتالیایی در شهر پیزای ایتالیا به دنیا آمد. از او به‌عنوان پدر علم نوین در تاریخ یادشده است. او از ۲۸ سالگی در دانشگاه پادوا تدریس کرد و نخستین خدمت بارز او به علم کشف وجود *نوَاختران* در سال ۱۶۰۴ میلادی بود. گرچه او خدمات متعددی به علم کرد که از آن جمله می‌توان به ساخت تلسکوپ، کشف چهار قمر مشتری و قانون سقوط آزاد اجسام اشاره کرد، اما کارهای علمی او تحت‌الشعاع نظریهٔ او در ردّ نظریهٔ زمین مرکزی بطلمیوس قرار گرفت و اینکه زمین نیز مانند سیّارات دیگر و ماه است. پس از چاپ کتاب **گفتار** که در آن به تشریح نظریات خود پرداخت، زیر آماج تیرهای تهمت قرار گرفت و سیل مخالفت و عناد بر علیه او به پا شد، به‌طوری که در سال ۱۶۳۳ میلادی کارش به دادگاه تفتیش عقاید روم کشید و او به اجبار دست از نظریات خود برداشت. با این همه او پیش از مرگ کتابی به نام **علوم جدید** را به‌طور محرمانه به چاپ رساند و سرانجام در ۸ ژانویه ۱۶۴۲ میلادی (۱۰۲۱ هـ.ش) چشم از دنیا فرو بست.

۱ـ۱ اندازه‌گیری

آیا تاکنون به این نکته توجه کرده‌اید که در ذهن خود برای هرکس یا هرچیز صفت‌ها و ویژگی‌هایی می‌شناسید. به یخ سردی، به آب روانی، به گل زیبایی، به آسمان رنگ‌آبی، به مادر مهربانی، به پر سبکی، به سنگ سنگینی، به فیل بزرگ جثه‌ای و به مورچه کوچکی و... نسبت می‌دهید. برخی از این ویژگی‌ها به‌طور دقیق قابل اندازه‌گیری‌اند و برخی دیگر نه. برای مثال سنگینی یک جسم، بلندی یا دمای یک جسم را به‌صورتی کاملاً تعریف شده و مورد توافق همگان می‌توان اندازه‌گرفت. ولی برای اندازه‌گیری زیبایی یا مهربانی و بسیاری از ویژگی‌ها دیگر چنین روش‌هایی وجود ندارد.

در زندگی روزانه، هریک از ما اندازه‌گیری‌هایی انجام می‌دهیم. زمان را اندازه می‌گیریم، فاصلهٔ بین دو نقطه یا طول یک جسم یا جرم یک جسم مانند مقداری میوه و ... را اندازه‌گیری می‌کنیم. این اندازه‌گیری‌ها و اندازه‌گیری‌های دیگری که می‌توان برشمرد، ممکن است تفاوت‌های زیادی با یکدیگر داشته باشند ولی برای همهٔ آنها می‌توانیم جنبه‌های مشترکی بیابیم. برای روشن شدن این جنبه‌های مشترک، فعالیت زیر را انجام دهید.

فعالیت ۱ـ۱

فعالیت‌های روزانه چند نفر از مردم اطراف خود (پزشک، خیاط، اعضای خانواده، عطار، شیشه‌بر و ...) را به دقت درنظر بگیرید. جدولی همانند جدول زیر را تنظیم و پس از تحقیق آن را پر کنید. آنگاه جدول خود را با جدول افراد گروه خود مقایسه و کامل کنید.

		چه چیزی را اندازه می‌گیرد	وسایل اندازه‌گیری	مقادیر به‌دست آمده در یک اندازه‌گیری
۱	پزشک	فشارخون، دمای بدن، ضربان قلب	فشارسنج، دماسنج، گوشی پزشکی و ساعت	۱۲ــ ۸ میلی‌متر جیوه، ۳۷/۵ درجه سلسیوس، ۷۵ ضربان بر دقیقه
۲	نجّار			
۳	خیاط			
۴	متصدی پمپ‌بنزین			
۵	شیشه‌بر			
۶				

آیا می‌توانیم از این فعالیت نتیجه بگیریم که در هر اندازه‌گیری نیاز به وسیلهٔ اندازه‌گیری وجود دارد و نتیجهٔ اندازه‌گیری برحسب یک یکا بیان می‌شود؟

جایگاه اندازه‌گیری در فیزیک : در بررسی بیشتر موضوع‌های مختلف فیزیک با اندازه‌گیری سروکار داریم. در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه، نمونه‌هایی از اندازه‌گیری‌ها را انجام دادیم. مثلاً با استفاده از ولت‌سنج اختلاف پتانسیل دونقطه از مدار را برحسب ولت به‌دست آوردیم، یا با استفاده از خط‌کش فاصلهٔ کانونی عدسی همگرا را برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری کردیم و ... .

بنابراین فیزیک مجموعه‌ای است از اندازه‌گیری‌ها و یافتن رابطهٔ بین نتیجه‌های آنها که نظریه‌ها و قانون‌های فیزیک را می‌سازند. بسیاری معتقدند «فیزیک علم اندازه‌گیری است» در واقع آنها می‌خواهند بر اهمیت موضوع اندازه‌گیری در فیزیک تأکید کنند.

یکای (واحد) اندازه‌گیری : همان‌گونه که دیدیم یکی از جنبه‌های مشترک بین همهٔ اندازه‌گیری‌ها وجود یکای اندازه‌گیری است. با انجام اندازه‌گیری یک عدد به‌دست می‌آید. برای مثال ممکن است برای بلندی قامت یک فرد ۱/۷۲ متر یا برای طول یک اتاق ۸ قدم و یا برای فاصلهٔ بین دو شهر ۱۰۷ کیلومتر به‌دست آید. می‌دانید که در هر مورد، عدد گزارش شده بیان می‌کند که مقدار کمیت موردنظر چند برابر مقدار کمیتی از همان جنس است که به‌عنوان مقیاس انتخاب شده است. این مقیاس را یکا (یا واحد) آن کمیت می‌نامند.

فعالیت ۱ـ۲

با انتخاب یک یکای طول (مثل طول مداد)، طول نیمکتی را اندازه بگیرید. طول نیمکت چند برابر طول مداد است؟ این اندازه‌گیری را با یکاهای دیگری چون طول خودکار و وجب انجام دهید و نتیجه را در جدول زیر ثبت کنید.

یکا	طول نیمکت (یا هر چیزی دیگری که موردنظر شماست)
طول یک مداد	
طول یک خودکار	
طول یک وجب	

چرا برای طول نیمکت اعداد متفاوتی به‌دست آورده‌اید؟ دلیل این اختلاف چیست؟ به‌نظر شما برای آنکه همه اندازه‌گیری‌ها، عدد یکسانی را برای طول نیمکت بدهند، چه باید کرد؟

فعالیت ۱ــ۲ نشان می‌دهد که وقتی از یکاهای مختلفی برای اندازه‌گیری طول یک جسم استفاده می‌کنیم عددهای متفاوتی به‌دست می‌آوریم.

دانشمندان برای آنکه عددهای حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف یک کمیت به‌راحتی با هم مقایسه‌پذیر باشند، در نشست‌های بین‌المللی توافق کرده‌اند که برای هر کمیت، یکای معینی تعریف کنند.

یکاهای تعریف شده باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که هم تغییرناپذیر و هم در دسترس باشند. مثلاً اگر یکای طول را به‌صورت طول وجبِ دست معرفی کنیم. مطمئناً یکای قابل دسترسی خواهیم داشت. اما این یکا از شخصی به شخص دیگر تغییر خواهد کرد. نیاز به دقت در علوم، مهندسی، پزشکی و... ما را وامی‌دارد که به تغییرناپذیری یکا اهمیت بیشتری بدهیم و پس از تعیین آن، نمونه‌های مشابهی از آن را تولید کنیم و در اختیار کسانی که به آنها نیاز دارند قرار دهیم.

دستگاه یکاهایی که غالباً دانشمندان علوم و مهندسی در سراسر جهان به‌کار می‌برند و شامل مجموعه‌ای از یکاهای مورد توافق بین‌المللی است، دستگاه بین‌المللی یا SI[1] خوانده می‌شود. در ادامه به معرفی برخی از این یکاها می‌پردازیم.

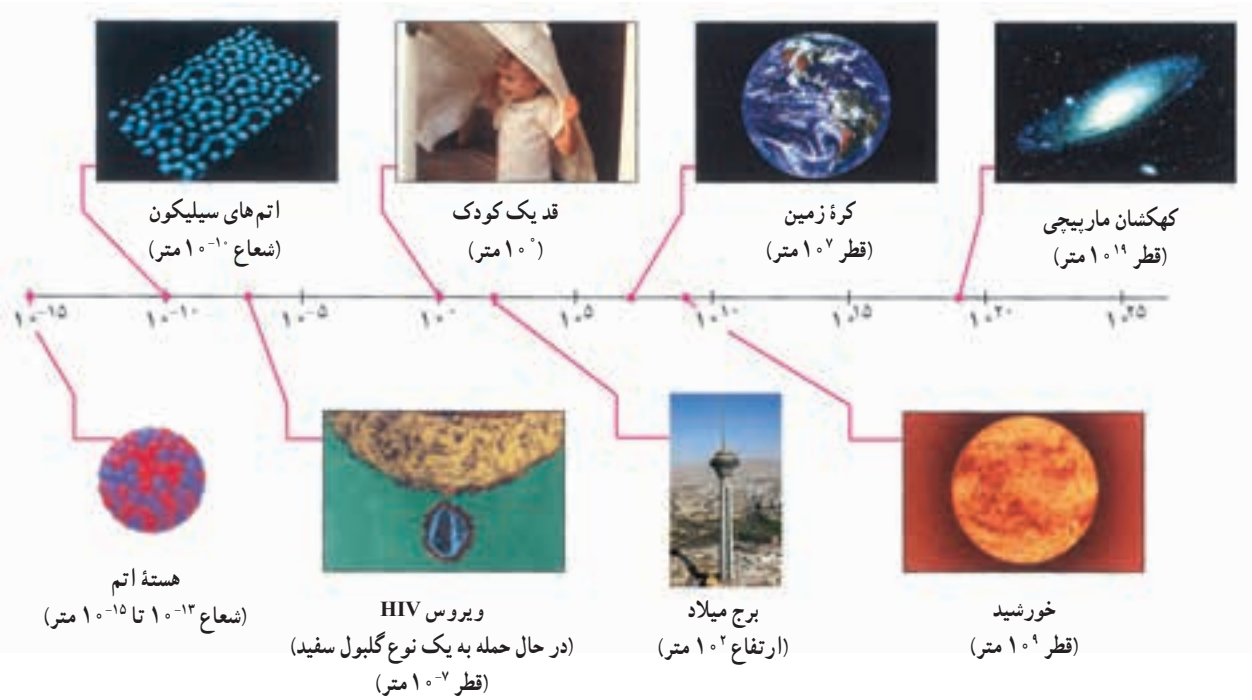
۱ــ SI حرف اول واژه‌های فرانسوی Systeme International به معنای دستگاه بین‌المللی است.

یکاهای اصلی : در عمل نیازی نیست که برای هریک از کمیت‌های فیزیکی یکای مستقلی تعریف شود. برای مثال، اگر واحد طول تعریف شده باشد، دیگر لازم نیست برای مساحت یکای مستقلی تعریف کنیم؛ بلکه می‌توانیم آن را تنها با اندازه‌گیری‌های طول و با استفاده از رابطه‌های هندسی محاسبه کنیم. برای نمونه مساحت مستطیل برابر است با حاصل‌ضرب طول ضلع بزرگ در طول ضلع کوچک. یعنی با اندازه‌گیری این طول‌ها برحسب متر، مساحت برحسب متر در متر یعنی متر مربع مشخص می‌شود.

آن دسته از کمیت‌هایی را که یکاهای آنها به‌طور مستقل تعریف شده‌اند، کمیت‌های اصلی و یکاهای آنها را یکاهای اصلی می‌نامند. سایر کمیت‌ها از قبیل مساحت، حجم و... کمیت‌های فرعی نام دارند. یکای کمیت‌های فرعی را می‌توان بر حسب یکاهای اصلی تعیین کرد. طول، جرم، زمان، دما و جریان الکتریکی از جمله کمیت‌های اصلی در SI هستند که در ادامه یکای برخی از آنها را معرفی می‌کنیم.

یکای طول : یکای طول در SI، متر نام دارد که آن را با نماد m نمایش می‌دهند. بنابه یک توافق قدیمی برای این طول (یک متر) نمونهٔ استانداردی ساخته شده است که در موزهٔ سِوْر در فرانسه نگهداری می‌شود. این نمونه میله‌ای است از جنس آلیاژ پلاتین و ایریدیوم با دو علامت روی آن که فاصلهٔ بین آنها در دمای صفر درجهٔ سلسیوس به‌طور دقیق برابر طول توافق شدهٔ بین‌المللی برای یک متر است. در مؤسسه‌های استاندارد همهٔ کشورها نمونه‌هایی مشابه این نمونهٔ استاندارد را تهیه و نگهداری می‌کنند.

شکل ۱ــ۱ مرتبهٔ بزرگی برخی طول‌ها را نشان داده است.



شکل ۱ــ۱ــ مرتبهٔ بزرگی برخی طول‌ها بر حسب متر

یکای جرم : یکای جرم در SI، کیلوگرم نام دارد که آن را با نماد kg نمایش می‌دهند. برای این یکا نیز یک نمونهٔ استاندارد به‌صورت استوانه‌ای از جنس آلیاژ پلاتین و ایریدیوم در موزهٔ سِوْر فرانسه نگهداری می‌شود و کشورهای دیگر نیز مشابه این نمونه استاندارد را تهیه می‌کنند (شکل ۱ــ۲).

شکل ۱ــ۲ــ نمونهٔ جرم استاندارد

یکای زمان : یکای زمان در SI، ثانیه نام دارد که آن را با نماد s نمایش می‌دهند. طبق یک تعریف قدیمی، یک ثانیه برابر $\frac{۱}{۸۶۴۰۰}$ یک شبانه‌روز[۱] است.

یکای کمیت‌های فرعی : پیش از این دیدیم که نیازی به معرفی یک یکای مستقل برای مساحت نیست؛ زیرا مساحت معمولاً با اندازه‌گیری دو طول و به کمک یک رابطهٔ هندسی محاسبه می‌شود. در نتیجه یکای آن در SI متر مربع ($m^۲$) است. به‌همین ترتیب می‌توانیم یکای هر کمیت فرعی دیگر را با استفاده از رابطه یا رابطه‌های آن کمیت با کمیت‌های اصلی و یا با کمیت‌های فرعی دیگری تعریف کنیم که یکای آنها قبلاً معرفی شده است. از این پس با هر کمیت فرعی که مواجه شویم یکای آن را نیز معرفی خواهیم کرد.

جدول ۱ــ۱ــ یکای پنج کمیت اصلی در SI

کمیت	نام یکا	نماد یکا
طول	متر	m
زمان	ثانیه	s
جرم	کیلوگرم	kg
جریان الکتریکی	آمپر	A
دما	کلوین *	K

* با این یکا در فصل ششم کتاب آشنا می‌شوید.

فعالیت ۱ــ۳

در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه با تعدادی از کمیت‌های اصلی و فرعی آشنا شدید. در جدول زیر یکای کمیت‌های داده شده را برحسب یکاهای اصلی بنویسید.

ردیف	نام کمیت	نماد کمیت	نام یکا	نماد یکا	یکا برحسب یکاهای اصلی
۱	سرعت				
۲	انرژی جنبشی				
۳	شتاب جاذبه	g	متر بر مجذور ثانیه	$m/s^۲$	$m/s^۲$
۴	انرژی پتانسیل گرانشی				
۵	بار الکتریکی			C	A.s
۶	توان عدسی				
۷					

۱ــ امروزه در نشست‌های کمیتهٔ بین‌المللی وزن‌ها و مقدارها، برای ثانیه تعریف بسیار دقیق‌تری ارائه شده است که همراه با تعریف دقیق متر و کیلوگرم در کتاب‌های پیشرفته‌تر فیزیک با آن آشنا خواهید شد.

پیشوندهای SI : هرگاه در اندازه‌گیری‌ها با اندازه‌های بسیار بزرگ یا بسیار کوچک مواجه شویم، از پیشوندهایی استفاده می‌کنیم که در جدول ۱ــ۲ فهرست شده‌اند. همان‌طور که از ضرایب تبدیل جدول پیداست هر پیشوند توان معینی از ۱۰ را نشان می‌دهد که به‌صورت یک عامل ضرب به‌کار می‌رود. یعنی وقتی یک پیشوند SI افزوده می‌شود آن یکا در ضریب مربوطه ضرب می‌شود، مثلاً ۱ میکرومتر (۱μm) که به آن ۱ میکرون نیز می‌گویند برابر $۱ \times ۱۰^{-۶}m$ است یا ۲ مگاوات (۲MW) برابر $۲ \times ۱۰^{۶}W$ است.

جدول ۱ــ۲

پیشوند	ضریب تبدیل	نماد	پیشوند	ضریب تبدیل	نماد
دسی	$\frac{۱}{۱۰} = ۱۰^{-۱}$	d	دکا	۱۰	da
سانتی	$\frac{۱}{۱۰۰} = ۱۰^{-۲}$	c	هکتو	۱۰۰	h
میلی	$\frac{۱}{۱۰۰۰} = ۱۰^{-۳}$	m	کیلو	۱۰۰۰	k
میکرو	$\frac{۱}{۱۰^{۶}} = ۱۰^{-۶}$	μ	مگا	$۱۰^{۶}$	M
نانو	$\frac{۱}{۱۰^{۹}} = ۱۰^{-۹}$	n	گیگا	$۱۰^{۹}$	G
پیکو	$\frac{۱}{۱۰^{۱۲}} = ۱۰^{-۱۲}$	p	ترا	$۱۰^{۱۲}$	T

تمرین ۱ــ۱

با استفاده از جدول ۱ــ۲ حساب کنید :

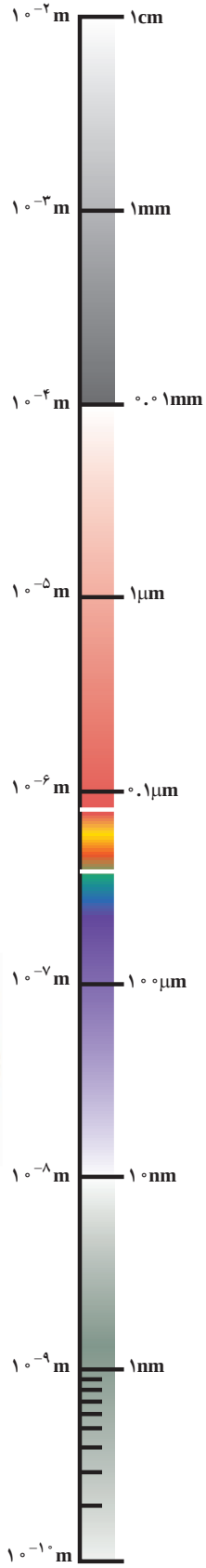
الف) ۰/۰۰۰۰۵km چند cm است؟

ب) $۳/۵ \times ۱۰^{-۸}s$ چند ns است؟

پ) ۰/۰۰۴۷mg چند μg است؟

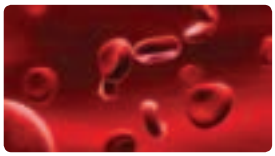
مقیاس نانو : یکی از مقیاس‌هایی که امروزه کاربردهای گسترده‌ای در فیزیک یافته است، مقیاس نانو است که در واقع «یک میلیاردیم» آن چیزی است که داریم. اغلب مقیاس نانو برای طول به‌کار می‌رود و اصطلاحاً با نانومتر (nm) سر و کار داریم. دانش و ابزاری که ما را قادر به بررسی، مشاهده و

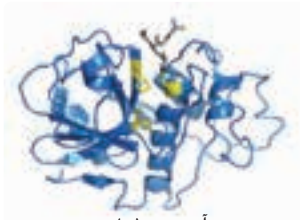
به‌کارگیری «چیزها» در مقیاس نانو می‌کند، علوم و فنّاوری نانو نامیده می‌شود. بحث در مورد دانش نانو و اینکه بشر چگونه توانسته است به چنین دستاورد عجیبی دست یابد، بدون درک مفهوم اندازهٔ نانو و اینکه دانشمندان واقعاً با چه «چیزهای» ریزی سر و کار دارند، ملموس نخواهد بود. برای درک بهتر از این مقیاس و برای آنکه دید بهتری از دانش نانو و اختراعات و چیزهای ریز داشته باشید، مطابق شکل ۱ــ۳ از چیزهای قابل تصور شروع می‌کنیم و به‌تدریج به اندازه‌های خیلی کوچک در مقیاس نانو می‌رسیم.

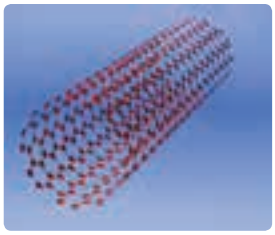


مورچه، ۵ میلی‌متر

موی انسان، ۶۰ تا ۱۲۰ میکرومتر


گلبول سرخ، ۷ میکرومتر


آنزیم، ۱۰ نانومتر


نانو لوله کربن، قطر ۱ نانومتر

شکل ۱ــ۳

فعالیت ۱ـ۴

الف) با استفاده از شکل ۱ــ۳ و برای آنکه به تصوری از اندازهٔ مقیاس نانو دست یابید، قطر موی انسان و قطر یک گلبول قرمز را بر حسب مقیاس نانو به‌دست آورید.

ب) در مورد ابزارهایی که دانشمندان و مهندسان علوم نانو با آن کار می‌کنند تحقیق، و به کلاس گزارش کنید.

نمادگذاری علمی : در پاره‌ای از اندازه‌گیری‌ها با مقدارهای خیلی بزرگ یا خیلی کوچک سروکار داریم. مثلاً سرعت نور در خلأ به‌طور دقیق ۲۹۹ , ۷۹۲ , ۴۵۸m/s است که در محاسبه آن را به‌صورت ۳۰۰,۰۰۰,۰۰۰m/s تقریب می‌زنند یا برای نوشتن جرم یک الکترون برحسب کیلوگرم باید بعد از ممیز ۳۰ صفر قرار دهیم و پس از آن رقم ۹۱۰۹ را بنویسیم. بدیهی است که نوشتن چنین عددهایی به‌صورت اعشاری یا با صفرهای زیاد، علاوه بر آنکه خواندن و نوشتن را مشکل می‌کند، احتمال اشتباه را هم زیاد می‌کند. از این رو با استفاده از روشی که آن را نمادگذاری علمی می‌نامند، نوشتن و محاسبهٔ مقدارهای خیلی بزرگ یا خیلی کوچک را ساده می‌کنند.

در نمادگذاری علمی هر مقدار را به‌صورت حاصل ضرب عددی بزرگ‌تر از ۱ یا مساوی با ۱ و کوچک‌تر از ۱۰ و ضریبی با توان صحیحی از ۱۰ می‌نویسند. به‌عنوان مثال سرعت نور به‌صورت $3/00 \times 10^{8}$m/s و جرم الکترون به‌صورت $9/109 \times 10^{-31}$kg نوشته می‌شود.

مثال ۱ـ۱

داده‌های زیر را با استفاده از نمادگذاری علمی و برحسب یکاهای خواسته شده بنویسید.

الف) فاصلهٔ ماه تا زمین : $r = ۳۸۲ \times ۱۰^{۳}\ km = \ldots\ldots\ldots m$

ب) شعاع اتم هیدروژن در مدل اتمی بور : $a_{۰} = ۰/۰۵۲۹ nm = \ldots\ldots\ldots m$

پ) جرم خورشید : $m = ۱۹۹ \times ۱۰^{۲۵}\ ton = \ldots\ldots kg$

ت) جرم پروتون : $m = ۱۶/۷ \times ۱۰^{-۲۷} g = \ldots\ldots kg$

ث) مدت زمان گردش سیارهٔ عطارد به‌دور خورشید : $T = ۰/۲۴۱$ سال $= \ldots\ldots$ سال

ج) مدت زمان گردش الکترون به دور هستهٔ اتم هیدروژن در مدل اتمی بور : $T = ۰/۰۰۰۱۵ ps = \ldots\ldots s$

چ) بار الکتریکی الکترون : $q_e = ۱۶۰ \times ۱۰^{-۱۵} \mu C = \ldots\ldots C$

پاسخ : با رعایت شیوهٔ نمادگذاری علمی به ترتیب داریم :

الف) $r = ۳۸۲ \times ۱۰^{۳} km = ۳/۸۲ \times ۱۰^{۸} m$

ب) $a_{۰} = ۰/۰۵۲۹ nm = ۵/۲۹ \times ۱۰^{-۱۱} m$

پ) $m = ۱۹۹ \times ۱۰^{۲۵} ton = ۱/۹۹ \times ۱۰^{۳۰} kg$

ت) $m = ۱۶/۷ \times ۱۰^{-۲۵} g = ۱/۶۷ \times ۱۰^{-۲۷} kg$

ث) $T = ۰/۲۴۱$ سال $= ۲/۴۱ \times ۱۰^{-۱}$ سال

ج) $T = ۰/۰۰۰۱۵ ps = ۱/۵ \times ۱۰^{-۱۶} s$

چ) $q_e = ۱۶۰ \times ۱۰^{-۱۵} \mu C = ۱/۶۰ \times ۱۰^{-۱۹} C$

تمرین ۱ـ۲

داده‌های زیر را با استفاده از نمادگذاری علمی و برحسب یکاهای خواسته شده بنویسید.

الف) شعاع کرهٔ زمین $Re = ۶۳۷ \times ۱۰^{۴} m = \ldots\ldots km$

ب) فاصلهٔ زمین تا نزدیک‌ترین ستاره (پروکسیمای قنطورس) $r = ۴۰۴ \times ۱۰^{۱۱} km = \ldots\ldots m$

پ) جرم کرهٔ زمین $M_e = ۵۹۸ \times ۱۰^{۱۹} ton = \ldots\ldots kg$

ت) جرم دوترون (یکی از ایزوتوپ‌های هیدروژن) $m = ۳۳۴۴ \times ۱۰^{-۲۷} g = \ldots\ldots kg$

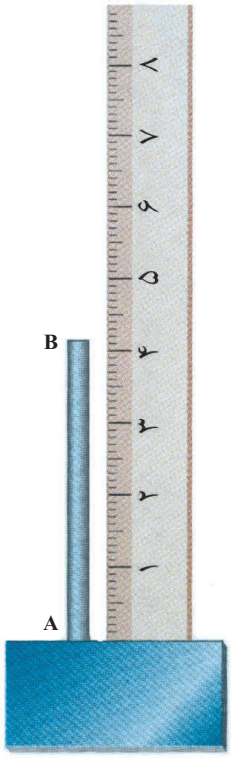
ث) مدت زمان رسیدن نور خورشید به زمین $t = ۴۹۹ s = \ldots\ldots s$

وسیله و روش اندازه‌گیری : اندازه‌گیری‌ها در فیزیک توسط وسیله‌هایی انجام می‌شود که معمولاً با توجه به کمیّت مورد اندازه‌گیری انتخاب و یا طراحی می‌شوند و هریک روش استفادهٔ خاص خود را دارند. برای مثال، وسیله‌ای که برای اندازه‌گیری ضخامت یک برگ کاغذ مناسب است مسلماً برای اندازه‌گیری طول حیاط مدرسه مناسب نیست.

برای کم کردن خطا در اندازه‌گیری هر کمیت، معمولاً اندازه‌گیری آن چند بار تکرار می شود. اگر عددهای به‌دست آمده متفاوت باشند، میانگین آن عددها به‌عنوان نتیجهٔ اندازه‌گیری پذیرفته می‌شود. البته در میان عددهای متفاوت اگر یک یا دو عدد اختلاف زیادی با بقیه داشته باشند در میانگین‌گیری به‌حساب نمی‌آیند.

وسیلهٔ اندازه‌گیری طول : در اندازه‌گیری طول‌های نه‌چندان بزرگ و نه‌چندان کوچک از یک خط‌کش یا متر نواری استفاده می‌کنیم که برحسب میلی‌متر یا سانتی‌متر مدرج شده باشد.

فرض کنید که می‌خواهید طول میله‌ای معین مثلاً میلهٔ AB در شکل (۱ــ۴) را با یک خط‌کش میلی‌متری اندازه بگیرید. در خط‌کش میلی‌متری فاصلهٔ بین هر دو نشانهٔ متوالی برابر یک میلی‌متر است. در شکل، نقطهٔ B بین دو نشانه قرار گرفته است و نشان می‌دهد که طول میله از ۴۱ میلی‌متر بیشتر و از ۴۲ میلی‌متر کمتر است. ولی اینکه چقدر بیشتر از ۴۱ میلی‌متر یا چقدر کمتر از ۴۲ میلی‌متر است، معلوم نیست.

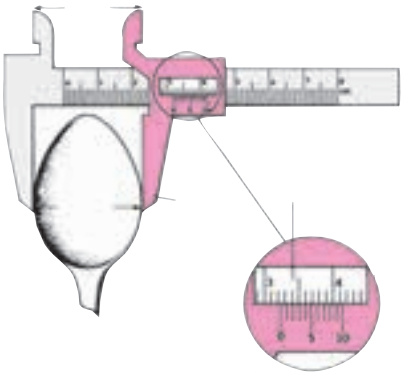


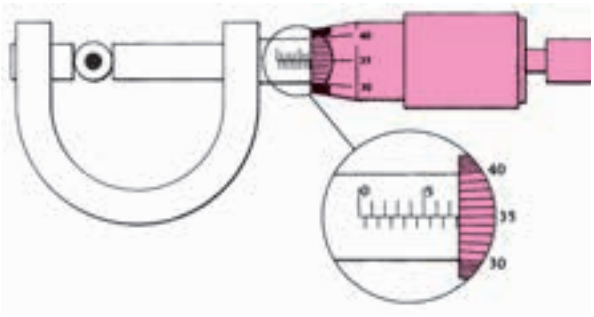
شکل ۱ــ۴ــ اندازه‌گیری طول یک میله با خط‌کش میلی‌متری

طول این میله برحسب میلی‌متر با یک عدد صحیح مثلاً ۴۱ یا ۴۲ میلی‌متر بیان می‌شود. با این خط‌کش نمی‌توان طول میله را با عددهایی مانند ۴۱/۸ یا ۴۲/۱ و یا ... میلی‌متر بیان کرد.

در بعضی از کارگاه‌های صنعتی مانند تراشکاری‌ها، اندازه‌گیری طول با ابزارهای دقیق‌تر از خط‌کش میلی‌متری انجام می‌شود. این ابزارها کولیس و ریزسنج هستند. کولیس‌هایی که امروزه در آزمایشگاه‌های مدرسه استفاده می‌شوند، می‌توانند تا $\frac{۲}{۱۰۰}$ میلی‌متر را اندازه بگیرند. یعنی می‌توانند ضخامتی به کوچکی $\frac{۲}{۱۰۰}$ mm را نشان دهند.

در شکل‌های (۱ــ۵ــ الف و ب) اندازه‌گیری با کولیس و ریزسنج نشان داده شده است.


ب) کولیس قدیمی با دقت ۰/۱ mm



الف) ریزسنجی با دقت ۰/۰۱ mm

شکل ۱ــ۵

فعالیت ۱ـ۵

به‌همراه گروه خود :

۱ــ دربارهٔ روش و ابزار اندازه‌گیری طول‌های بسیار بزرگ و بسیار کوچک مانند فاصلهٔ زمین تا ماه، مسافت بین دو شهر، ضخامت موی سر، قطر یک سیم نازک و ... تحقیق کنید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

۲ــ از آزمایشگاه دبیرستان، کولیس و ریزسنج بگیرید و چگونگی کار با این دو وسیله را بنویسید.

۳ــ اگر کولیس یا ریزسنج در اختیار نداشته باشید، ضخامت یک برگ کاغذ را چگونه اندازه می‌گیرید؟

گزارش کار یک آزمایش چیست؟ گزارش کار همان‌گونه که از نامش برمی‌آید، شرح جزئیات و مرحله‌های انجام یک آزمایش است و معمولاً حاوی نکته‌های زیر است :

- هدف از انجام آزمایش.
- نام آزمایشگر یا آزمایشگران (یا نام گروه).
- زمان و محل انجام آزمایش.
- نام وسیله‌های مورد نیاز در آزمایش.
- شرح روش یا روش‌های آزمایش.
- درج عددهای حاصل از اندازه‌گیری‌ها در جدول.
- درصورت لزوم، رسم نمودارهایی که چگونگی تغییرات کمیت‌های مورد اندازه‌گیری را نشان دهد.
- عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌ها.
- نتیجه‌گیری.
- هر مطلب یا اطلاع دیگری که لازم باشد[1].

فعالیت ۱ـ۶

مساحت روی جلد کتاب فیزیک ۲ را اندازه بگیرید و آن را برحسب m^2 ، cm^2، mm^2 بنویسید. گزارش کار آزمایش مربوط را بنویسید.

وسیلهٔ اندازه‌گیری جرم : جرم را معمولاً با ترازو اندازه می‌گیریم. شما در آشپزخانه، نانوایی، میوه‌فروشی و ... انواع مختلفی از ترازوها را دیده‌اید که برای اندازه‌گیری جرم‌های معمولی استفاده می‌شود. در شکل ۱ــ۶ تصویر برخی از ترازوها آمده است.

۱ــ در پیوست انتهای کتاب، یک گزارش کار آزمایش به‌صورت نمونه آورده شده است که برای آشنایی می‌توانید به آن مراجعه کنید.

در استفاده از ترازوها توجه به نکات زیر ضروری است :

الف) ترازو باید روی سطح کاملاً افقی قرار داشته باشد.

ب) صفرِ ترازو را تنظیم می‌کنیم؛ یعنی وقتی چیزی روی ترازو نباشد، ترازو عدد صفر را نشان دهد یا هردو کفه در یک تراز باشد.

پ) جسم موردنظر را به آرامی روی ترازو قرار می‌دهیم.

ت) پس از قرار دادن جسم درترازو، صبر می‌کنیم، سپس عدد موردنظر را می‌خوانیم یا مجموع وزنه‌های استفاده شده را حساب می‌کنیم.

شکل ۱ــ۶

مثال ۱ـ۲

در تصویر مقابل، ترازو جرم بخشی از یک میوه را g ۸۷/۹ نشان می‌دهد. با این ترازو، جرم سیبی را اندازه می‌گیریم. کدام‌یک از عددهای زیر می‌تواند نتیجهٔ این اندازه‌گیری باشد؟

الف) ۲۱۱/۲۵g　　ب) ۲۱۱/۲g

پ) ۲۱۱/۲۷g　　ت) ۲۱۱/۳۰g

پاسخ : دقت این ترازو g ۰/۱ است. پس هر اندازه‌گیری با آن فقط با این دقت انجام می‌شود. بنابراین فقط اندازه‌گیری g ۲۱۱/۲ با این ترازو معتبر است.

فعالیت ۱ـ۷

الف) دربارهٔ روش و ابزار اندازه‌گیری جرم‌های بزرگ مانند کامیون پر از بار و جرم‌های کوچک مانند دانهٔ خاکشیر تحقیق و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

ب) جرم یک سیب، یک دانه عدس و آب درون لیوان را با ترازو (چندبار) اندازه بگیرید و گزارش کار آزمایش را بنویسید.

وسیلهٔ اندازه‌گیری زمان : وسیلهٔ متداول برای اندازه‌گیری زمان ساعت است که به‌صورت‌های مختلف در همه‌جا موجود است.

فعالیت ۱ـ۸

با بحث و تبادل‌نظر گروهی توضیح دهید که

الف) چگونه می‌توان زمان نوسان (زمان یک رفت و برگشت کامل) یک آونگ را اندازه‌گیری کرد.

ب) اگر سنگی را به هوا پرتاب کنید مدّت زمانی که سنگ در هواست را چگونه اندازه می‌گیرید؟ وسیله و روش اندازه‌گیری را شرح دهید.

پ) آزمایشی طراحی کنید که به کمک آن بتوانید جرم و حجم یک قطره آب را اندازه بگیرید.

تمرین ۱ـ۳

با پیمانه‌ای به گنجایش ۵ سانتی‌متر مکعب حجم مقداری مایع را اندازه گرفته‌ایم. کدام یک از داده‌های زیر می‌تواند نتیجهٔ اندازه‌گیری با این پیمانه باشد؟

الف) $۲۰cm^۳$ ب) $۲۱cm^۳$

پ) $۱۹cm^۳$ ت) $۲۰/۵\ cm^۳$

۱ـ۲ کمیت‌های فیزیکی

دیدیم که فیزیک دانش بررسی کمیت‌های قابل اندازه‌گیری است. بنابراین می‌توان گفت که هر کمیتی که در فیزیک مطرح می‌شود، باید قابل اندازه‌گیری باشد. با توجه به آنچه که در مورد اندازه‌گیری خواندیم، می‌توانیم بگوییم که تعریف یک کمیّت فیزیکی هنگامی کامل می‌شود که برای آن یک یکای مناسب و یک روش اندازه‌گیری تعریف کرده باشیم.

کمیت‌های فیزیکی به دو دستهٔ متمایز نرده‌ای و برداری تقسیم می‌شوند.

کمیت‌های نرده‌ای : چهار پیمانهٔ ۲۰۰ سانتی‌متر مکعبی آب درون سطلی می‌ریزیم. حجم آب درون سطل چقدر است؟ اگر دو پیمانهٔ دیگر آب به سطل بیفزاییم، حجم آب چقدر خواهد شد؟

پاسخ هر بند این پرسش تنها با یک عدد به‌طور کامل بیان می‌شود. کمیت‌هایی مانند حجم با این ویژگی که برای مشخص شدن آنها برحسب یک یکای معین، تنها یک عدد کفایت می‌کند نرده‌ای نام دارند.

محاسبه‌های ریاضی این‌گونه کمیت‌ها مانند جمع یا تفریق، از قاعده‌های متداول در حساب پیروی می‌کنند. در پاسخ به بخش دوم پرسش بالا شما به سادگی حجم افزوده شده را با حجم قبلی جمع کردید.

برخی از کمیت‌های نرده‌ای که تاکنون با آنها آشنا شده‌اید عبارتند از : انرژی، دما، توان، اختلاف پتانسیل الکتریکی، جرم و زمان. در مقابل، کمیت‌های دیگری نیز در فیزیک داریم که تنها با ذکر مقدار آنها برحسب یک یکای معین، به‌طور کامل مشخص نمی‌شوند.

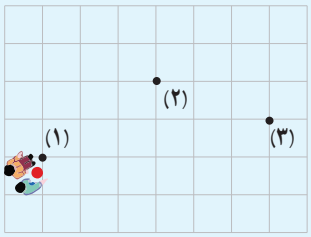
تصور کنید در حالی که چشمان خود را بسته‌اید، از دوستتان که در جایی ایستاده است بخواهید یک قدم بردارد. آیا می‌توانید همچنان با چشمان بسته بگویید که او پس از این حرکت در کجا ایستاده است؟ مطمئناً پاسخ شما منفی است. او ممکن است با این یک قدم، به شما نزدیک‌تر یا از شما دورتر شده باشد. یا حتی فاصله‌اش با شما هیچ تغییری نکرده باشد (چگونه؟) به‌عبارت دیگر جابه‌جایی او می‌تواند در هر راستا و سویی باشد. تنها درصورتی می‌توانید از مکان آخری او با اطلاع شوید که علاوه بر فاصله‌ای که او باید جابه‌جا شود، جهت (راستا و سوی) جابه‌جا شدن او را هم مشخص کنید. مثلاً بگویید یک قدم به سوی من یا به طرف جنوب یا جنوب شرق و یا ... بردارد.

جابه‌جایی : در فیزیک، کمیتی به نام جابه‌جایی تعریف می‌کنیم و همان‌طور که از نام آن برمی‌آید، معرف تغییر مکان یک جسم است. جابه‌جایی یک جسم، پاره‌خط جهت‌داری است که ابتدای آن مکان آغازی و انتهای آن مکان پایانی جسم است. همان‌طور که دیدیم تنها با دانستن مقدار جابه‌جایی نمی‌توانیم آن را به‌طور کامل مشخص کنیم، بلکه باید جهت (یعنی راستا و سوی) آن را نیز بدانیم.

جابه‌جایی‌های مساوی : یک دسته سرباز را در حال رژه رفتن مجسم کنید. جابه‌جایی آنها را در یک مدت مشخص (بازهٔ زمانی معین) رسم کنید. مجموعه‌ای از پاره‌خط‌های موازی و مساوی و هم‌سو به‌دست می‌آورید. در این حالت می‌گوییم که این سربازها جابه‌جایی مساوی داشته‌اند. به‌عبارت دیگر دو جابه‌جایی را وقتی مساوی می‌گویند که به یک اندازه و در یک جهت (یک راستا و یک‌سو) باشند.

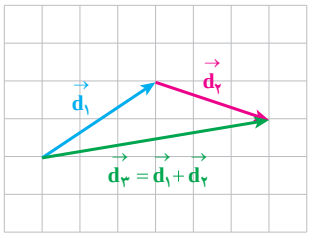
جابه‌جایی‌ها چگونه با هم جمع می‌شوند؟

فعالیت ۱ـ۹



روی یک صفحهٔ کاغذ شطرنجی، با انتخاب مقیاس مناسب شکل حیاط مدرسه یا خانهٔ خود را بکشید. نزدیک محلّ در ورودی حیاط را با شمارهٔ ۱ و وسط حیاط را با شمارهٔ ۲ و کنار دیوار عمود بر در ورودی را با شمارهٔ ۳ مشخص کنید. با این کار شما شکلی مشابه شکل روبه‌رو به‌دست آورده‌اید. سپس از دوست خود بخواهید که از محلّ شمارهٔ ۱ به محل شمارهٔ ۲ برود. بردار جابه‌جایی او را در شکل رسم کنید. (این جابه‌جایی پاره‌خط جهت‌داری است که ابتدایش نقطهٔ ۱ و انتهایش نقطهٔ ۲ است). نام این جابه‌جایی را $\vec{d}_1$ بگذارید. سپس از او بخواهید که از محل شمارهٔ ۲ به محلّ شمارهٔ ۳ برود. این جابه‌جایی را نیز در شکل رسم کنید و آن را $\vec{d}_2$ بنامید. جابه‌جایی کلّ دوست شما $\vec{d}_3$ (از نقطهٔ ۱ به نقطهٔ ۳) چگونه است؟ آیا طول $\vec{d}_3$ با مجموع طول‌های $\vec{d}_1$ و $\vec{d}_2$ برابر است؟ اگر نیست پس دو جابه‌جایی $\vec{d}_1$ و $\vec{d}_2$ را چگونه با هم جمع کنیم تا $\vec{d}_3$ به‌دست آید؟

با اندکی دقت در شکلی که از فعالیت ۱ــ۹ به‌دست آورده‌اید، درمی‌یابیم که برای یافتن حاصل جمع دو جابه‌جایی $\vec{d}_1$ و $\vec{d}_2$، مانند شکل ۱ــ۷ ابتدا جابه‌جایی $\vec{d}_1$ و سپس از انتهای آن جابه‌جایی $\vec{d}_2$ را رسم می‌کنیم. پاره‌خط جهت‌داری که ابتدای آن ابتدای $\vec{d}_1$ و انتهای آن انتهای $\vec{d}_2$ است، جابه‌جایی کل یا حاصل جمع دو جابه‌جایی ($\vec{d}_3$) را نشان می‌دهد.



شکل ۱ــ۷

جابه‌جایی، نمونه‌ای از یک کمیت برداری است. سایر کمیت‌های برداری نیز مانند جابه‌جایی‌ها با هم جمع می‌شوند. از این رو قاعدهٔ جمع جابه‌جایی‌ها را قاعدهٔ جمع برداری نیز می‌نامند.

کمیت برداری کمیتی است که بزرگی (اندازه) و جهت (راستا و سو) دارد، و از قاعدهٔ جمع برداری پیروی می‌کند.

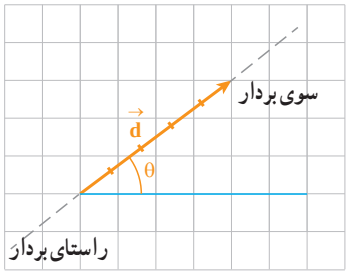
حاصل جمع چند بردار را برایند آن بردارها (یا بردار برایند) می‌نامند.

فعالیت ۱ـ۱۰

با توجه به تساوی دو جابه‌جایی توضیح دهید که دو بردار چه وقت با هم مساویند؟

کمیت‌های برداری را با پاره‌خط‌های جهت‌دار (پیکان) نمایش می‌دهند. پیکان را هم‌جهت با بردار و طول آن را متناسب با بزرگی بردار درنظر می‌گیرند. در این کتاب کمیت‌های برداری را با پیکان کوچکی (→) مشخص می‌کنیم که بر روی نماد کمیت قرار می‌دهیم مانند $\vec{d}$. بزرگی بردار $\vec{d}$ را با $|\vec{d}|$ و یا با نماد بدون پیکان آن (مانند d) مشخص می‌کنند (شکل ۱ــ۸).

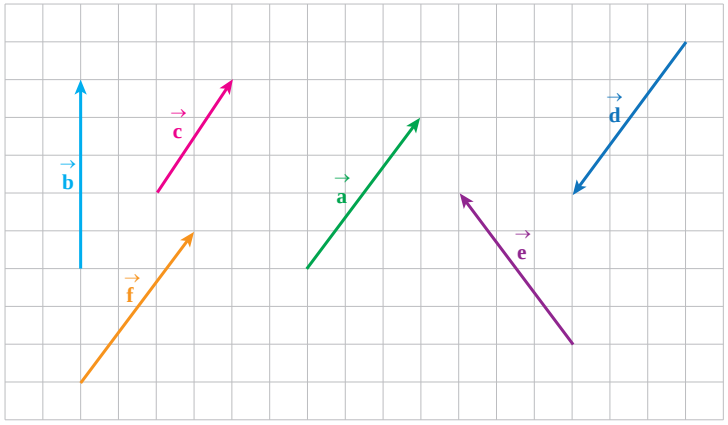
در این کتاب با کمیت‌های برداری دیگری از قبیل سرعت، شتاب، نیرو و ... آشنا خواهید شد که هریک را در جای خود معرفی خواهیم کرد.



شکل ۱ــ۸ــ بردار $\vec{d}$ با اندازه و جهت آن مشخص می‌شود. بزرگی این بردار $d = |\vec{d}| = ۵$ است.

مثال ۱ـ۳

در شکل زیر بردارهای مساوی با بردار $\vec{a}$ را مشخص کنید.



پاسخ: فقط بردار $\vec{f}$ است که اندازه و جهت آن با بردار $\vec{a}$ یکی است.

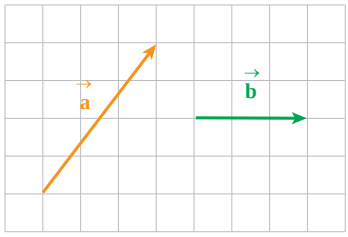
توجه داریم که جمع برداری دارای خاصیت جابه‌جایی است. یعنی حاصل‌جمع دو یا چند بردار به ترتیب بردارها بستگی ندارد.

مثال ۱ـ۴

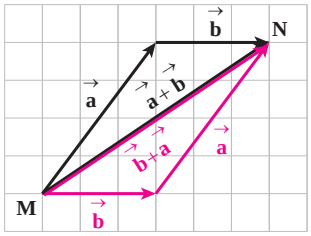
دانش‌آموزی دو جابه‌جایی پی‌درپی انجام می‌دهد. هریک از جابه‌جایی‌های او در شکل روبه‌رو به‌طور جداگانه نشان داده شده‌اند. جابه‌جایی برایند دانش‌آموز را در هریک از حالت‌های زیر رسم کنید.

الف) جابه‌جایی اول برابر $\vec{a}$ و جابه‌جایی دوم برابر $\vec{b}$ باشد.

ب) جابه‌جایی اول برابر $\vec{b}$ و جابه‌جایی دوم برابر $\vec{a}$ باشد.



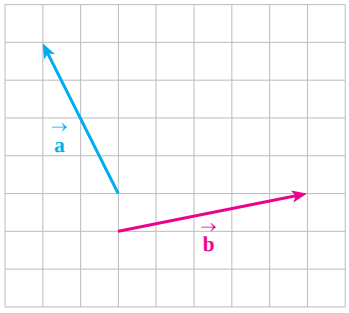
پاسخ : اگر دانش‌آموز در ابتدا روی نقطهٔ M باشد، جابه‌جایی‌های بند الف را با رنگ سیاه و جابه‌جایی‌های بند ب را با رنگ قرمز، مطابق با قاعدهٔ جمع برداری جمع می‌کنیم. با توجه به ویژگی‌های هندسی متوازی‌الاضلاع درمی‌یابیم که در هر دو حالت، دانش‌آموز به یک نقطه (نقطهٔ N) رسیده است.



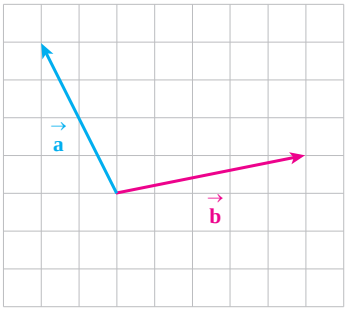
با دقت در شکل بالا درمی‌یابیم که برای رسم بردار برایند، می‌توانیم از روش دیگری نیز استفاده کنیم :

ابتدا بردارهای $\vec{a}$ و $\vec{b}$ را از یک مبدأ رسم می‌کنیم (شکل ۱ــ۹ــ ب).

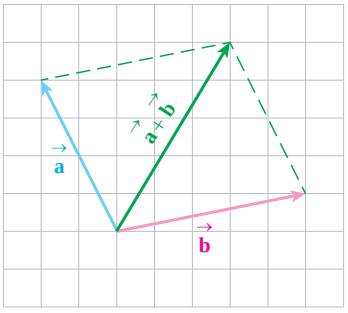
سپس متوازی‌الاضلاعی را رسم می‌کنیم که این دو بردار دو ضلع مجاور آن باشند. بردار برایند، قطری از متوازی‌الاضلاع است که نقطهٔ شروع دو بردار را به رأس روبه‌رو وصل می‌کند شکل (۱ــ۹ــ پ). این روش جمع دو بردار را روش متوازی‌الاضلاع برای جمع بردارها می‌نامیم.



(الف)



(ب)

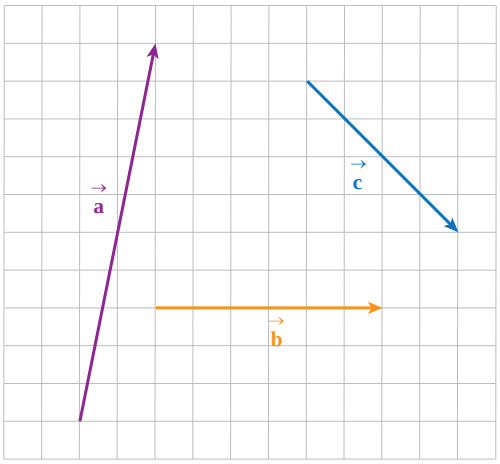


(پ)

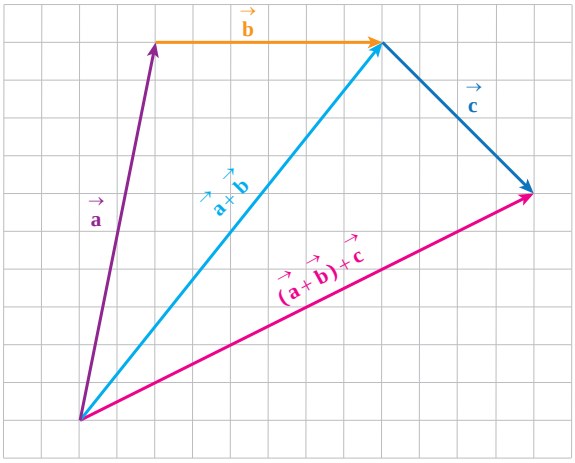
شکل ۱ــ۹

مثال ۱ـ۵

بردارهای $\vec{a}$ و $\vec{b}$ و $\vec{c}$ را در شکل روبه‌رو درنظر بگیرید. بردار برایند آنها را بدست آورید.



پاسخ : مطابق شکل روبه‌رو ابتدا بردار $\vec{a}$ و سپس از انتهای آن برداری مساوی $\vec{b}$ رسم می‌کنیم. مطابق قاعدهٔ جمع برداری، $\vec{a}+\vec{b}$ برداری است که ابتدای آن ابتدای بردار $\vec{a}$ و انتهای آن انتهای بردار $\vec{b}$ است. سپس این بردار $(\vec{a}+\vec{b})$ را با بردار $\vec{c}$ جمع می‌کنیم. یعنی از انتهای بردار $(\vec{a}+\vec{b})$ برداری مساوی $\vec{c}$ رسم می‌کنیم. بردار $(\vec{a}+\vec{b})+\vec{c}$ برداری است که ابتدای آن ابتدای بردار $(\vec{a}+\vec{b})$ و انتهای آن انتهای بردار $\vec{c}$ است.



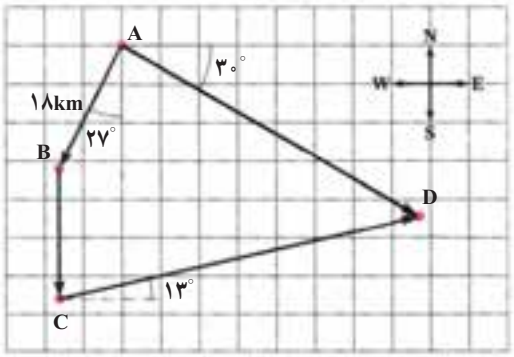
با حل این مثال درمی‌یابیم که برای جمع کردن چند بردار می‌توانیم به این ترتیب عمل کنیم که از انتهای بردار اول، برداری مساوی بردار دوم و از انتهای بردار دوم برداری مساوی بردار سوم و همین‌طور تا آخر رسم کنیم. بردار برایند، برداری است که ابتدای آن، ابتدای بردار اول و انتهای آن، انتهای بردار آخر است.

مثال ۱ـ۶

خودرویی از شهر A شروع به حرکت می‌کند و از شهرهای B و C می‌گذرد و به شهر D می‌رسد. این جابه‌جایی‌ها در شکل روبه‌رو نشان داده شده است. با استفاده از خط‌کش و نقاله و توجه به مقیاس،

الف) اندازهٔ جابه‌جایی‌های $\vec{BC}$ و $\vec{CD}$ را تعیین کنید.

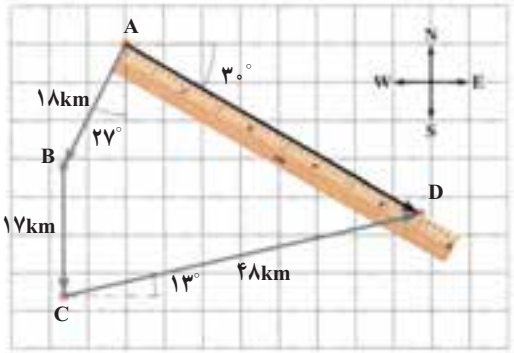
ب) بردار جابه‌جایی خودرو در کل مسیر را بیابید.



پاسخ :

الف) با استفاده از خط‌کش و با توجه به مقیاس، اندازهٔ جابه‌جایی‌ها را به‌دست می‌آوریم.

$|\vec{BC}| = BC = ۱۷km \qquad |\vec{CD}| = CD = ۴۸km$



ب) بردار جابه‌جایی کل، برداری است که شهر A را به شهر D وصل می‌کند. با استفاده از خط‌کش و با توجه به مقیاس، اندازهٔ جابه‌جایی کل به‌دست می‌آید.

$|\vec{AD}| = AD = ۴۵km$

به کمک نقاله زاویهٔ این بردار با راستای شرق ــ غرب، ۳۰° به‌دست می‌آید. می‌توان این نتیجه را به صورت «۳۰° جنوبِ شرق، یا ۶۰° شرقِ جنوب» بیان کرد.

تمرین ۱ـ۴

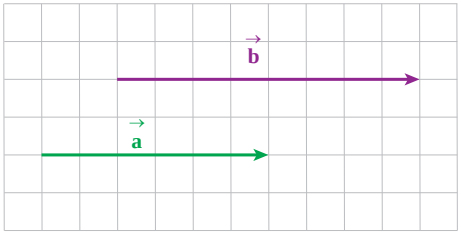
شخصی برای رسیدن به مقصد خود ابتدا در راستای شرق ــ غرب، ۴۰km به سمت شرق و سپس در راستای شمال ــ جنوب، ۲۰km به سمت جنوب می‌رود و سرانجام به اندازهٔ ۳۰km در جهتِ ۳۵° غربِ جنوب جابه‌جا می‌شود. با استفاده از خط‌کش، نقاله و انتخاب مقیاس مناسب جابه‌جایی کل را پیدا کنید.

محاسبه بزرگی بردار برایند : در بعضی حالت‌های خاص می‌توان بدون رسم شکل و از راه محاسبه نیز بزرگی بردار برایند را به‌دست آورد.[۱]

۱ــ در این کتاب تنها محاسبهٔ بزرگی برایند بردارهایی مد نظر است که یا در یک راستا قرار دارند و یا بر یکدیگر عمودند. برای تعیین برایند دو بردار که با یکدیگر زاویهٔ θ می‌سازند، **فقط** باید از خط‌کش و نقاله استفاده شود، لذا بیان هر رابطه به این منظور و ارزش‌یابی از آن **به‌طور کامل** خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است.

مثال ۱ـ۷

برایند بردارهای هم‌جهت $\vec{a}$ و $\vec{b}$ در شکل الف را به‌دست آورید.
بزرگی دو بردار a=۳cm و b=۴cm است.



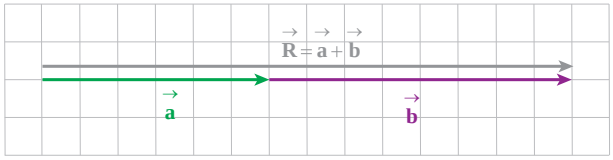
(الف)

پاسخ : مطابق شکل ب ابتدا بردار $\vec{a}$ و سپس از انتهای آن بردار $\vec{b}$ را رسم می‌کنیم. چون دو بردار هم‌جهت‌اند، در امتداد هم روی یک خط قرار می‌گیرند. بردار برایند نیز همان‌گونه که در شکل پیداست روی همین خط قرار می‌گیرد. این بردار هم‌جهت با دو بردار $\vec{a}$ و $\vec{b}$ است و بزرگی آن برابر مجموع بزرگی‌های دو بردار می‌شود.

$$\vec{R} = \vec{a} + \vec{b}$$

چون دو بردار هم‌جهت هستند، داریم :

$$R=a+b=۳+۴=۷$$



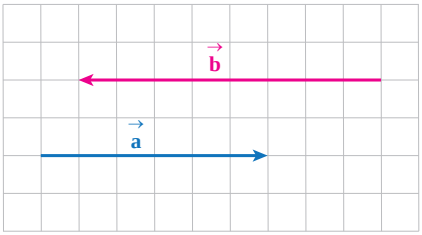
(ب)

با حل این مثال : درمی‌یابیم که بزرگی برایند دو بردار هم‌جهت $\vec{a}$ و $\vec{b}$ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$R=a+b \qquad (۱ـ۱)$$

مثال ۱ـ۸

در شکل الف برایند بردارهای $\vec{a}$ و $\vec{b}$ که در خلاف جهت یکدیگرند و بزرگی آنها a=۳m و b=۴m است را به‌دست آورید.



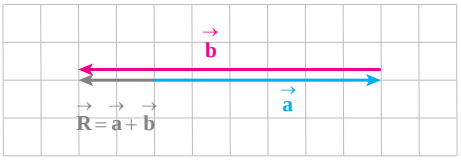
(الف)

پاسخ : مطابق شکل ب از انتهای بردار $\vec{a}$ برداری مساوی بردار $\vec{b}$ رسم می‌کنیم. بردار برایند همان‌گونه که در شکل پیداست، هم‌جهت با بردار بزرگ‌تر (یعنی بردار $\vec{b}$) است. بنابراین، بزرگی بردار برایند برابر تفاضل بزرگی‌های دو بردار می‌شود.

$$\vec{R} = \vec{a} + \vec{b}$$

چون دو بردار در خلاف جهت هم هستند، داریم :

$$R = |a-b| = |۳-۴| = ۱$$



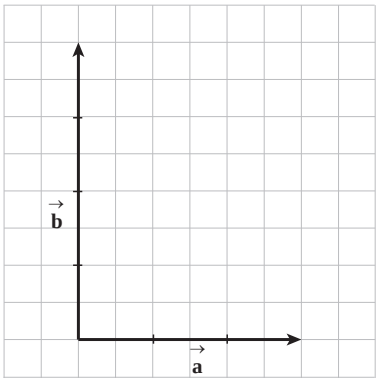
(ب)

با حل این مثال، درمی‌یابیم که بزرگی برایند دو بردار هم‌راستا و در خلاف جهت هم $\vec{a}$ و $\vec{b}$ از رابطهٔ زیر به دست می‌آید.

$$R=|a-b| \qquad (۱_۲)$$

مثال ۱ـ۹

در شکل الف اندازهٔ بردارهای عمود بر هم $\vec{a}$ و $\vec{b}$ به‌ترتیب ۳ و ۴ واحد است. بزرگی برایند این دو بردار را با استفاده از رسم و همین‌طور با محاسبه به‌دست آورید.

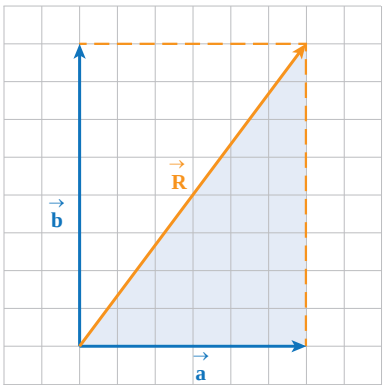


(الف)

پاسخ : برای به‌دست‌آوردن بردار برایند ($\vec{R}$)، مطابق قاعدهٔ جمع برداری عمل می‌کنیم. اگر بزرگی $\vec{R}$ را با خط‌کش اندازه بگیریم آن را ۵ واحد به‌دست می‌آوریم.

همان‌طورکه در شکل ب دیده می‌شود $\vec{R}$، وتر مثلث قائم‌الزاویه‌ای است که ضلع‌های آن $\vec{a}$ و $\vec{b}$ است. بنابراین، می‌توانیم با استفاده از قضیهٔ فیثاغورس بنویسیم.

$$R^۲=a^۲+b^۲ \Rightarrow R=\sqrt{۹+۱۶}=۵$$



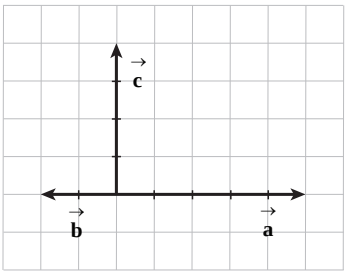
(ب)

با حل این مثال، درمی‌یابیم که بزرگی برایند دو بردار عمود بر هم $\vec{a}$ و $\vec{b}$ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$R=\sqrt{a^۲+b^۲} \qquad (۱_۳)$$

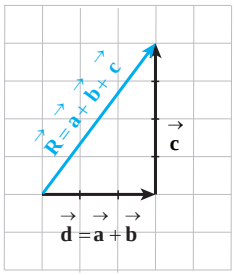
مثال ۱ـ۱۰

برایند بردارهای $\vec{a}$ و $\vec{b}$ و $\vec{c}$ در شکل الف را رسم و بزرگی برایند را محاسبه کنید. فرض کنید اندازه بردارها a=۵cm ، b=۲cm ، c=۴cm باشد.



(الف)

پاسخ : با توجه به اینکه ترتیب بردارها را می‌توانیم به هرصورت که بخواهیم تغییر دهیم، بهتر است اول برایند آنهایی را به‌دست آوریم که هم‌راستا هستند. برایند دو بردار $\vec{a}$ و $\vec{b}$ را $\vec{d}$ می‌نامیم و ابتدا این برایند را به‌دست می‌آوریم. $\vec{d}$ برداری است هم‌جهت با $\vec{a}$ و بزرگی آن برابر |۵−۲|=۳cm است. اکنون برایند دو بردار $\vec{c}$ و $\vec{d}$ را مطابق شکل ب به‌دست می‌آوریم.



(ب)

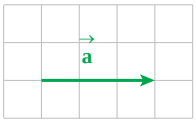
$$R=\sqrt{d^{۲}+c^{۲}}=\sqrt{۹+۱۶}=\sqrt{۲۵}=۵$$

حاصل ضرب یک عدد در یک بردار : وقتی برداری را در عدد مثبتی مانند m ضرب می کنیم جهت بردار حاصل با بردار اولیه یکی است و بزرگی آن m برابر بردار اول است.

اگر برداری را در یک عددی منفی مانند m ضرب کنیم، بردار حاصل در خلاف جهت بردار اولیه خواهد شد و بزرگی بردار حاصل |m| برابر بردار اول است.

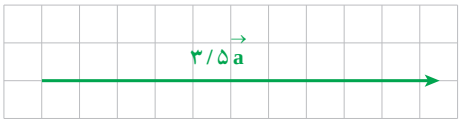
مثال ۱ـ۱۱

بردار $\vec{a}$ در شکل روبه‌رو رسم شده است. بردار ۳/۵ $\vec{a}$ را رسم کنید.



(الف)

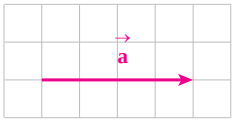
پاسخ : بردار ۳/۵ $\vec{a}$ هم‌جهت (هم‌راستا و هم‌سو) با بردار $\vec{a}$ و بزرگی آن ۳/۵ برابر بزرگی بردار $\vec{a}$ است.



(ب)

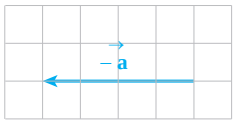
مثال ۱ـ۱۲

بردار $\vec{a}$ در شکل روبه‌رو رسم شده است. بردار $-\vec{a}$ را رسم کنید. این بردار را قرینهٔ بردار $\vec{a}$ نیز می‌گویند.



(الف)

پاسخ : بردار $-\vec{a}$ همان‌گونه که از شکل پیداست، به بزرگی بردار $\vec{a}$ و در خلاف جهت آن خواهد بود.



(ب)

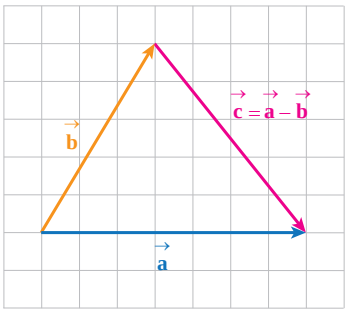
تفریق دو بردار : حاصل تفریق دو بردار $\vec{a}$ و $\vec{b}$ برداری مانند $\vec{c}$ است.

$\vec{c}$ برداری است که اگر با $\vec{b}$ جمع شود بردار $\vec{a}$ به‌دست می‌آید، یعنی :

$$\vec{a}-\vec{b}=\vec{c}$$

$$\vec{b}+\vec{c}=\vec{a}$$

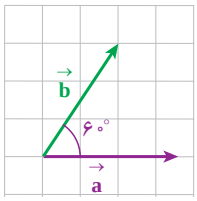
در شکل ۱ـ۱۰، بردارهای $\vec{a}$ ، $\vec{b}$ و $\vec{c}$ طوری رسم شده‌اند که $\vec{b}+\vec{c}=\vec{a}$ شود. بنابراین برای به‌دست آوردن $\vec{c}$ ، نخست دو بردار $\vec{a}$ و $\vec{b}$ را از یک نقطه رسم می‌کنیم. برداری که ابتدای آن بر انتهای بردار $\vec{b}$ (عامل دوم تفریق) و انتهای آن بر انتهای بردار $\vec{a}$ (عامل اول تفریق) منطبق باشد، بردار $\vec{c}$ است.



شکل ۱ـ۱۰ـ حاصل تفریق دو بردار

مثال ۱ـ۱۳

دو بردار $\vec{a}$ و $\vec{b}$ مطابق شکل الف با یکدیگر زاویهٔ ۶۰° می‌سازند و بزرگی آنها با هم برابر است. بردار $\vec{c}=\vec{a}-\vec{b}$ را به‌دست آورید و بزرگی آن را تعیین کنید.



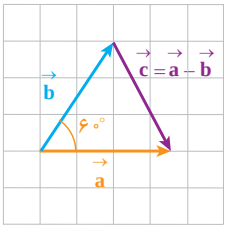
(الف)

پاسخ : با توجه به شکل ب، بردار $\vec{c}$ برداری است که از انتهای $\vec{b}$ شروع و به انتهای $\vec{a}$ ختم می‌شود. بزرگی این بردار با توجه به آنکه مثلث حاصل در شکل ب متساوی‌الاضلاع است (چرا؟) برابر با بزرگی هریک از دو بردار $\vec{a}$ و $\vec{b}$ است یعنی :

$$|\vec{c}|=|\vec{a}-\vec{b}|$$

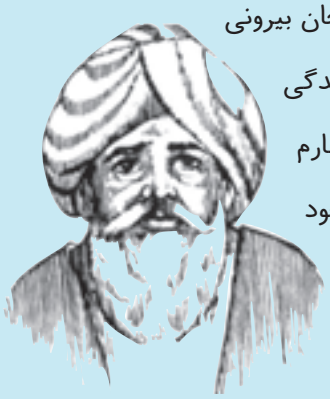
$$=a$$

$$=b$$



(ب)

ابوبکرمحمدبن حسین کرَجی



ابوبکر محمدبن حسین کرجی هم روزگار با ابوریحان بیرونی و زکریای رازی بوده است و ۳۲ سال پیش از ابوریحان زندگی را بدرود گفت. از تاریخ تولد این دانشمند ایرانی قرن چهارم و پنجم هجری اطلاع دقیقی در دست نیست. تحصیلات خود را در شهرری که آن زمان مرکز دانشمندان اسلامی بود به اتمام رساند و سپس برای آشنایی با دانشمندان دیگر و تحصیلات بیشتر راهی بغداد شد و در کرخ بغداد سکنی گزید. از همین‌رو در تاریخ او را با نام کرخی هم شناخته‌اند که این مسئله یک اشتباه تاریخی است و برخی گمان کرده‌اند که چون محل تحصیلات او در کرخ بوده است، نام او کرخی است و تقریباً همهٔ مورخان نسبت او را کرخی نامیده بودند تا اینکه در سال ۱۹۳۴ میلادی دانشمندی ایتالیایی در مقاله‌ای ثابت کرد که این دانشمند کرجی نام دارد و یک ایرانی است و نه عراقی؛ و از آن پس همهٔ مؤلفان از او به نام کرجی یاد کرده‌اند. کرجی در بغداد، در زمان تصرف این شهر به دست آل‌بویه به تحصیل مشغول بود و با فرزند عضدالدوله دیلمی بهاءالدوله و وزیر او ارتباط برقرار ساخت و حتی کتاب «الفخری فی‌صناعی الجبر و المقابلی» را به نام فخرالملوک وزیر بهاءِالدوله تألیف کرد. کرجی در حدود سال ۴۰۳ هجری قمری به زادگاه خود کرج بازگشت و کتاب انباط‌مياه الخفيي (به معنی استخراج آب‌های نهان زمین) را تألیف کرد.

از نوشته‌های کرجی در این کتاب چنین برمی‌آید که او دربارهٔ ویژگی‌های فیزیکی خاک و کاربرد مهندسی آن دانش فراوانی داشته است. برای نمونه، او از راه بهره‌وری از خاک رُس برای آب‌بندی و ساختن سدهای خاکی و نیز روش‌های فشرده کردن خاک سخن رانده است. کرجی همچنین در ساختن روش‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری نیز جایگاه والایی در تاریخ مهندسی دارد. او در کنار بررسی ابزارهای اندازه‌گیری درازا (طول)، بلندا (ارتفاع)، زاویه و دستورهای نقشه‌برداری و گزینش راه، قنات، اختراع‌های خود را که دربرگیرندهٔ تراز و چند وسیلهٔ اندازه‌گیری دیگر است، تشریح می‌کند.

وجود نام این دانشمند بزرگ به مدت دو دهه در دایرةالمعارف علوم نیویورک نشان از شهرت جهانی این مرد بزرگ دارد که متأسفانه در کشور ما ناشناخته مانده است.

پرسش‌های فصل اوّل

۱ گسترش دانش فیزیک تأثیر زیادی بر زندگی بشر داشته است، دربارهٔ یکی از این تأثیرها تحقیق کنید.

۲ جرم یک سنجاق ته‌گرد را چگونه می‌توان با یک ترازوی آشپزخانه اندازه‌گیری کرد؟

۳ روش‌هایی برای اندازه‌گیری ارتفاع یک برج پیشنهاد دهید.

۴ می‌دانیم جمع دو بردار جابه‌جاپذیر است. آیا تفریق بردارها نیز جابه‌جاپذیر است؟ به‌طوری که $\vec{a}-\vec{b}$ و $\vec{b}-\vec{a}$ مساوی باشد؟

مسائل فصل اوّل

۱ جرم ذرهٔ غباری $6/7\times10^{-10}$ کیلوگرم است. جرم آن را برحسب گرم، میلی‌گرم، میکروگرم و نانوگرم بنویسید.

۲ در بعضی از جدول‌ها زمان گردش زمین به دور خورشید ۳۱ مگا ثانیه و طول عمر متوسط انسان ۲ گیگا ثانیه اعلام شده است. این دو طول زمان را با هم مقایسه کنید.

۳ یکی از راه‌های اندازه‌گیری عمق آب اقیانوس‌ها آن است که یک موج فراصوتی را از سطح آب به اعماق آب می‌فرستند. این موج با برخورد به کف اقیانوس به سطح آب بازمی‌گردد و در سطح آب آشکارسازی می‌شود. با اندازه‌گیری بازهٔ زمانی رفت و برگشت یک علامت فراصوتی و با داشتن سرعت انتشار صوت در آب، فاصلهٔ سطح آب تا کف اقیانوس محاسبه می‌شود. اگر بازهٔ زمانی رفت و برگشت یک علامت فراصوتی ۱۴s و سرعت انتشار صوت در آب ۱۴۵۰m/s باشد، عمق آب اقیانوس را محاسبه کنید.

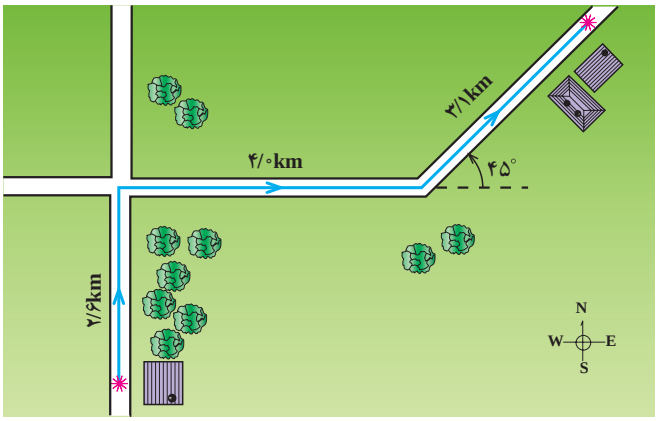
۴ ابعاد سلول‌ها و باکتری‌ها ۱μm، اندازهٔ قطر نوک خودکار معمولی ۱mm و قطر نوک انگشت کوچک انسان ۱cm است. این ابعاد برحسب nm چقدرند؟

۵ قلب یک ورزشکار در هر ثانیه (در حال استراحت) $90cm^3$ خون می‌کشد. در طول یک شبانه‌روز چه مقدار خون برحسب m^3 کشیده می‌شود؟

۶ سریع‌ترین رشد گیاه متعلق به گیاهی موسوم به *هسپرویوکاویپلی* است که در طیّ ۱۴ روز، ۳/۷ m رشد می‌کند. آهنگ رشد این گیاه برحسب میکرومتر بر ثانیه چقدر است؟

۷ دایرهٔ بزرگی بکشید و محیط و قطر آن را با بیشترین دقّتی که می‌توانید به کمک متر پارچه‌ای و یا نخ اندازه بگیرید. با استفاده از این مقادیر، عدد π را با بیشترین دقّتی که می‌توانید به‌دست آورید.

۸ یک پستچی از نقطهٔ شروع حرکت خود در شکل روبه‌رو مسیری را می‌پیماید که در شکل نشان داده شده است. بردار جابه‌جایی کل را رسم و بزرگی آن را با مقیاس مناسب به‌دست آورید.

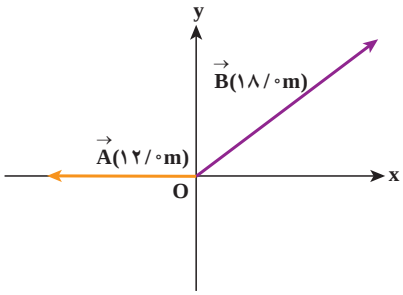


۹ برای دو بردار $\vec{A}$ و $\vec{B}$ در شکل روبه‌رو

الف) بردار $\vec{A}+\vec{B}$

ب) بردار $\vec{A}-\vec{B}$

را با رسم نمودار به‌دست آورید.

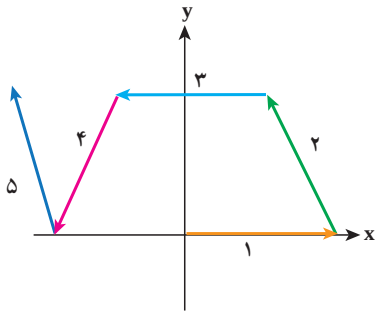


۱۰ شخصی ۸ متر به‌طرف شمال حرکت می‌کند و سپس جهت حرکت خود را عوض می‌کند و ۴ متر به طرف جنوب می‌رود. بزرگی و جهت بردار جابه‌جایی او چقدر است؟

۱۱ بزرگی بردار $\vec{a}$ برابر ۲ و در جهت غرب به شرق است. به‌علاوه می‌دانیم $\vec{b}=-۲\vec{a}$. بزرگی و جهت بردارهای زیر را تعیین کنید.

الف) $\vec{b}$ ب) $\vec{a}+\vec{b}$ پ) $\vec{a}-\vec{b}$

۱۲ نوعی مورچهٔ کویری که در بیابان‌ها زندگی می‌کند، وقتی به دنبال غذاست، حرکتش را از لانه‌اش آغاز می‌کند و پس از طی مسیری درهم و برهم به مقصد می‌رسد. این مورچه ممکن است نیم کیلومتر در چنین مسیر پیچیده‌ای، روی شن‌زار هموار و بی‌شکل حرکت کند، بی‌آنکه هیچ ردّی از خود بر جای گذارد. با این حال، این مورچه به طریقی می‌داند که چگونه مستقیماً به سمت لانه‌اش باز گردد. به‌عنوان مثالی خیالی فرض کنید این مورچه پنج مسیر ۶ سانتی‌متری را در جهت‌های نشان داده شده در شکل با شروع از لانه‌اش طی کند. بردار جابه‌جایی کل را که مورچه بر روی آن به لانهٔ خود بازمی‌گردد، با رسم نموداری با مقیاس مناسب به‌دست آورید.

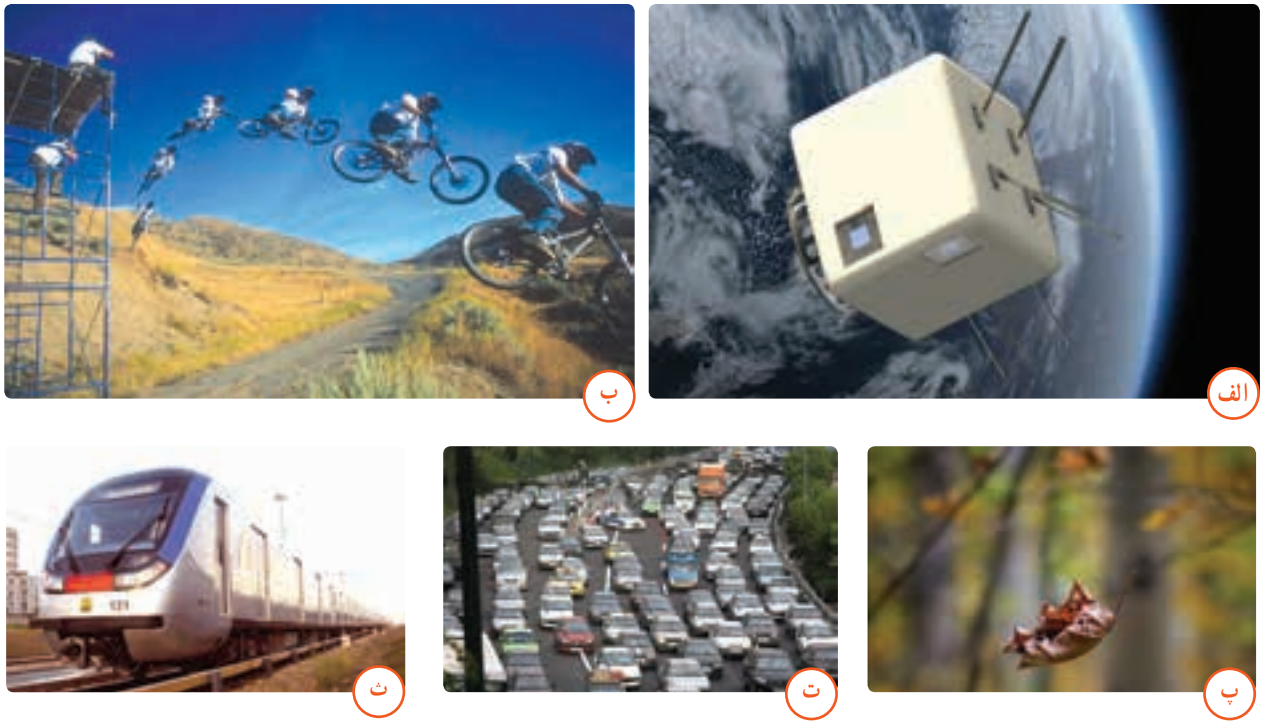


۲ حرکت در خط راست

جاده‌ای در تپه‌های جنوب سمنان

انسان‌ها از دیرباز، برای سهولت جابه‌جایی بین دو منطقه، از جاده استفاده می‌کردند.

هنگامی که در راه مدرسه به اطراف خود نگاه می‌کنید، حرکت‌های بسیاری را می‌بینید. افرادی که از شما دور یا به شما نزدیک می‌شوند، خودروهایی که با سرعت‌های متفاوت در حرکت‌اند، افرادی که با دوچرخه در حال رفتن به محل کار خود هستند، پرندگانی که در فضا پرواز می‌کنند، برگ‌هایی که از درخت می‌افتند و ... (شکل ۲ــ۱).



شکل ۲ــ۱ ــ تصویرهایی از حرکت در دنیای پیرامون ما

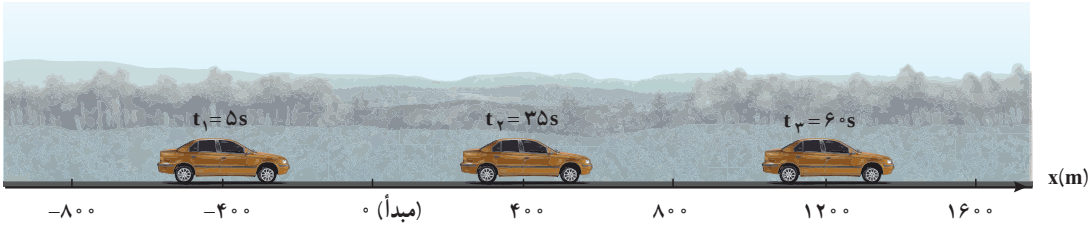
زمانی که حرکت‌هایی مانند افتادن یک برگ از شاخهٔ درخت یا حرکت یک خودرو و ... را مشاهده می‌کنیم گرچه ظاهراً جسمی را می‌بینیم که از جایی به جای دیگر حرکت می‌کند یا جابه‌جا می‌شود، ولی در بیشتر موارد، حرکت هر بخش ممکن است با حرکت بخش دیگر تفاوت داشته باشد. برای مثال، حرکت یک دوچرخه‌سوار را درنظر بگیرید (شکل ۲ــ۲). اگرچه این حرکت ساده به‌نظر می‌رسد ولی با کمی توجه معلوم می‌شود که همین حرکت ساده بسیار پیچیده است. در حالی که دوچرخه‌سوار در مسیری مستقیم در حرکت است پای او بالا و پایین می‌رود و رکاب در مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند. به‌همین ترتیب هریک از اجزای دوچرخه علاوه‌بر حرکت به‌همراه دوچرخه، خودشان نیز حرکت‌های دیگری دارند.

شکل ۲ــ۲ــ حرکت دوچرخه‌سوار

این پیچیدگی‌ها، باعث می‌شود که بررسی و توصیف جزئیات حرکت‌هایی که به‌طور معمول با آنها برخورد می‌کنیم، پیچیده و دشوار شود. بنابراین بررسی حرکت را از حالتی ساده یعنی حرکت یک جسم بدون درنظر گرفتن حرکت جداگانه هریک از اجزای آن شروع می‌کنیم. همچنین به منظور سادگی بیشتر، تنها به حرکت یک جسم روی مسیر مستقیم (خط راست) که یکی از ساده‌ترین انواع حرکت است می‌پردازیم.

۲ــ۱ مکان، جابه‌جایی

حرکت خودرویی در یک بزرگراه مستقیم را در نظر می‌گیریم. برای بررسی حرکت این خودرو، یک محور مانند محور x در راستای بزرگراه انتخاب می‌کنیم. جهت این محور می‌تواند هم سوی حرکت خودرو یا در خلاف سوی آن باشد. مکانی از بزرگراه را به‌عنوان مبدأ محور (x=۰) در نظر می‌گیریم (شکل ۲ــ۳). اگر محور را مدرج کنیم، می‌توانیم مکان خودرو را در هر لحظه گزارش نماییم. یعنی مثلاً بگوییم در لحظهٔ $t_1=5s$، مکان خودرو $x_1=-400m$ است (شکل ۲ــ۳).



شکل ۲ــ۳ــ مکان خودرو در لحظات مختلف

در شکل ۲ــ۴ خودرو از لحظهٔ $t_1=5s$ تا لحظهٔ $t_2=35s$ از مکان $x_1=-400m$ تا مکان $x_2=+400m$ جابه‌جا شده است. جابه‌جایی خودرو در این بازهٔ زمانی برابر است با :

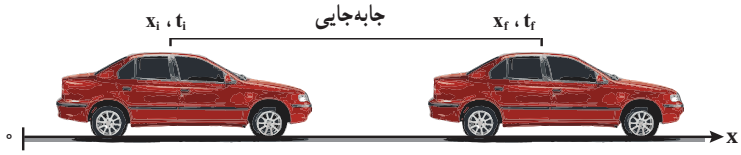
$$\Delta x=x_2-x_1=+400-(-400)=+800m$$

با توجه به علامت مثبت جابه‌جایی به‌دست آمده، خودرو در این بازهٔ زمانی در جهت مثبت محور x جابه‌جا شده است.

شکل ۲ــ۴ــ جابه‌جایی خودرو در بازهٔ زمانی t_1 تا t_2

بنابراین اگر متحرک در لحظهٔ t_i در مکان x_i و در لحظهٔ t_f درمکان x_f باشد[1]، جابه‌جایی آن در بازهٔ زمانی t_i تا t_f، از رابطهٔ ۲ــ۱ به‌دست می‌آید.

$$\Delta x = x_f - x_i \qquad (۲ــ۱)$$



شکل ۲ــ۵ــ جابه‌جایی در بازهٔ زمانی t_i تا t_f

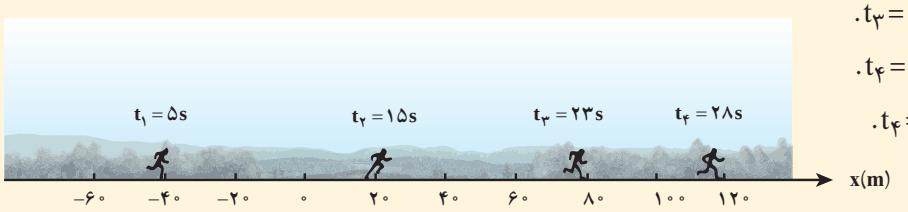
تمرین ۲ــ۱

شکل زیر، مکان دونده‌ای که روی مسیری مستقیم می‌دود، در لحظات مختلف را نشان می‌دهد. جابه‌جایی دونده در هریک از بازه‌های زمانی زیر چند متر است؟

الف) از $t_1 = ۵s$ تا $t_3 = ۲۳s$.

ب) از $t_2 = ۱۵s$ تا $t_4 = ۲۸s$.

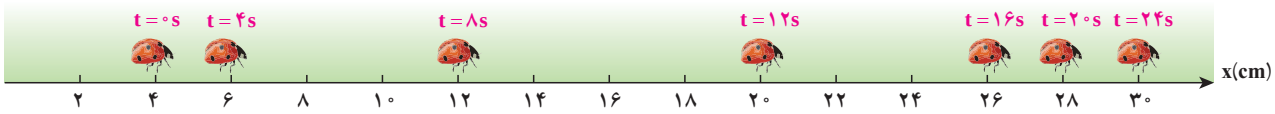
پ) از $t_1 = ۵s$ تا $t_4 = ۲۸s$.



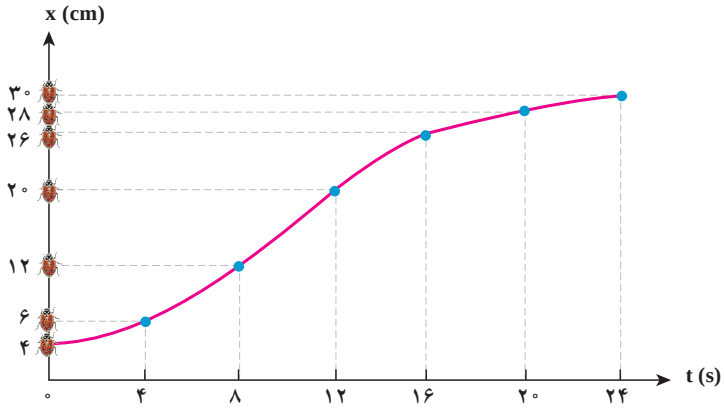
برای توصیف حرکت یک جسم می‌توان از نموداری که مکان جسم را در هر لحظه نشان می‌دهد، استفاده کرد. در بسیاری از موارد رسم این نمودار برای بررسی حرکت، مناسب است. برای رسم این نمودار، غالباً زمان را روی محور افقی و مکان را روی محور قائم مشخص می‌کنیم.

برای مثال، به حرکت کفش‌دوزک که در شکل ۲ــ۶ نشان داده شده است، توجه کنید. این کفش‌دوزک در لحظهٔ $t_1 = ۰s$ در مکان $x_1 = ۴cm$ قرار دارد، در $t_2 = ۴s$ در مکان $x_2 = ۶cm$ قرار دارد و ... . اگر بخواهیم نمودار مکان ــ زمان حرکت کفش‌دوزک را رسم کنیم، ابتدا هریک از محورهای مکان و زمان را با مقیاسی مناسب مدرّج کرده و در زمان‌های داده شده، مکان کفش‌دوزک را روی محور قائم تعیین می‌کنیم و سپس نمودار مکان ــ زمان را همانند شکل ۲ــ۷ رسم می‌نماییم.

۱ــ حرف i از اول کلمهٔ انگلیسی initial به معنای اولیه و حرف f از اول کلمهٔ final به معنای نهایی گرفته شده است.



شکل ۲ــ۶ــ حرکت کفش‌دوزک روی خط راست



با استفاده از این نمودار می‌توان دریافت که متحرک در هر لحظه در چه مکانی قرار دارد و جابه‌جایی آن بین هر دو لحظه چقدر است. مثلاً در بازهٔ زمانی ۱۲s تا ۱۶s جابه‌جایی آن $\Delta x = ۲۶ - ۲۰ = ۶cm$ است.

شکل ۲ــ۷ــ نمودار مکان ــ زمان کفش‌دوزک

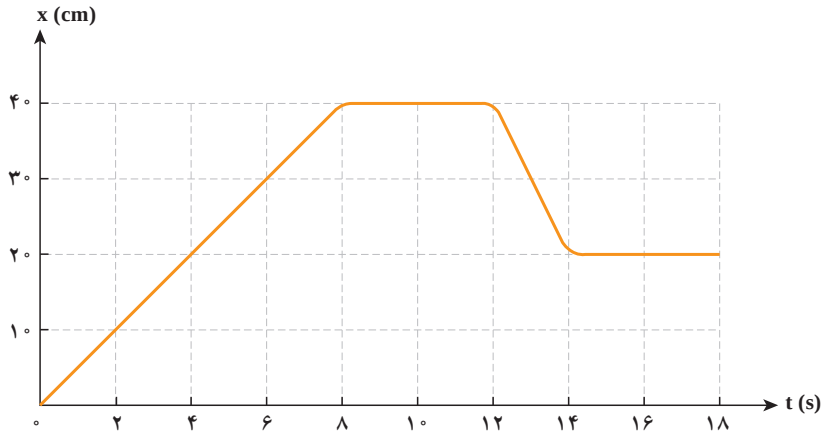
تمرین ۲ـ۲

جدول روبه‌رو مکان متحرکی در لحظه‌های داده شده در جدول را نشان می‌دهد. نمودار مکان ــ زمان این متحرک را رسم کنید.

t(s)	۰	۱	۲	۳	۴	۵
x(m)	۰	−۱	۰	۳	۸	۱۵

مثال ۲ـ۱

مورچه‌ای روی یک خط راست در حرکت است. نمودار مکان ــ زمان مورچه به شکل روبه‌رو است.



الف) در چه بازهٔ زمانی مورچه در جهت محور x حرکت می‌کند؟

ب) در چه بازهٔ زمانی مورچه در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟

پ) در چه بازه‌های زمانی مورچه ایستاده است؟

ت) در چه لحظه‌هایی فاصلهٔ مورچه از مبدأ ۳۰cm است؟

ث) در چه بازهٔ زمانی فاصلهٔ مورچه از مبدأ بیشترین مقدار است؟

ج) جابه‌جایی مورچه در بازهٔ زمانی ۴s تا ۸s چند سانتی‌متر است؟

پاسخ :

الف) از لحظهٔ $t=۰s$ تا لحظهٔ $t=۸s$.

ب) از لحظهٔ $t=۱۲s$ تا لحظهٔ $t=۱۴s$.

پ) در بازه‌های زمانی $t=۸s$ تا $t=۱۲s$ و $t=۱۴s$ تا $t=۱۸s$.

ت) در لحظه‌های $t=۶s$ و $t=۱۳s$.

ث) در بازهٔ زمانی $t=۸s$ تا $t=۱۲s$.

ج) $\Delta x=x_f-x_i=۴۰-۲۰=+۲۰cm$.

مثال ۲ـ۲

رابطهٔ بین مکان و زمان برای دوچرخه‌سواری که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند، از لحظهٔ $t=۰s$ تا لحظهٔ $t=۶۰۰s$ به‌صورت $x=۴t+۴۰$ است که در آن، x برحسب متر و t برحسب ثانیه است.

الف) نمودار مکان ــ زمان دوچرخه‌سوار را در بازهٔ زمانی $t=۰s$ تا $t=۵۰s$ رسم کنید.

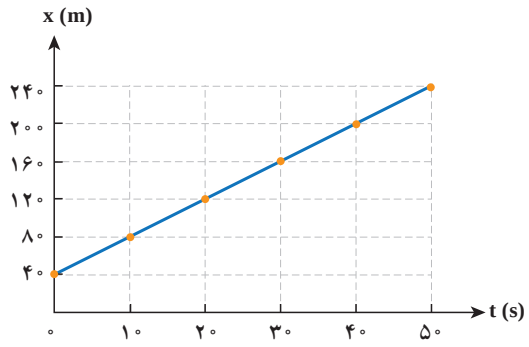
ب) جابه‌جایی دوچرخه‌سوار در بازهٔ زمانی $t=۰s$ تا $t=۶۰۰s$ را به‌دست آورید.

پاسخ :

الف) برای رسم نمودار، مکان دوچرخه‌سوار را در چند لحظه، از جمله در $t=۰s$ (لحظهٔ صفر، لحظهٔ شروع اندازه‌گیری زمان است و به آن مبدأ زمان می‌گوییم)، $t=۱۰s$ ، ... و $t=۵۰s$ به‌دست می‌آوریم و با استفاده از نقطه‌های به‌دست آمده خطی که از این نقطه‌ها می‌گذرد را رسم می‌کنیم.

چون رابطه داده شده معادله یک خط راست است و برای رسم نمودار آن، داشتن دو نقطه کافی است، با معلوم کردن مکان در دو لحظهٔ $t=۰s$ و $t=۵۰s$ نیز می‌توان نمودار را رسم نمود.

t(s)	x(m)
۰	۴۰
۱۰	۸۰
۲۰	۱۲۰
۳۰	۱۶۰
۴۰	۲۰۰
۵۰	۲۴۰

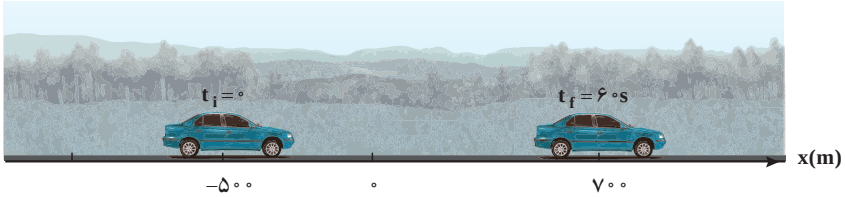


ب)

$$\left.\begin{array}{l} t_i=۰s \Rightarrow x_i=۴۰m \\ t_f=۶۰۰s \Rightarrow x_f=۴\times۶۰۰+۴۰=۲۴۴۰m \end{array}\right\} \Rightarrow \Delta x=x_f-x_i=۲۴۴۰-۴۰=+۲۴۰۰m$$

۲ـ۲ سرعت متوسط و سرعت لحظه‌ای

شکل ۲ـ۸ مکان خودرویی را که در حرکت است در دو لحظهٔ متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۲ـ۸ـ مکان خودرو در دو لحظهٔ متفاوت

این خودرو از لحظهٔ $t_i = ۰s$ تا لحظهٔ $t_f = ۶۰s$ به اندازهٔ $\Delta x = x_f - x_i = ۷۰۰ - (-۵۰۰) = +۱۲۰۰m$ در جهت محور x جابه‌جا شده است، یعنی به‌طور متوسط در هر ثانیه ۲۰m در جهت محور x جابه‌جا شده است $(\frac{۱۲۰۰m}{۶۰s} = ۲۰m/s)$. در فیزیک به نسبت جابه‌جایی به مدت زمان جابه‌جایی، سرعت متوسط جسم می‌گویند و آن را به‌صورت زیر نشان می‌دهند:

$$\text{سرعت متوسط} = \frac{\text{جابه‌جایی}}{\text{زمان جابه‌جایی}} \qquad (۲ـ۲)$$

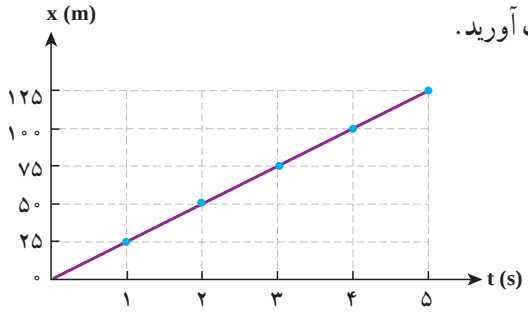
جابه‌جایی را با Δx، زمان جابه‌جایی را با Δt و سرعت متوسط را با $\bar{v}$ نشان می‌دهیم. بنابراین می‌توانیم رابطهٔ ۲ـ۲ را به‌صورت زیر بنویسیم:

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (۳ـ۲)$$

در رابطهٔ ۲ـ۳ یکای Δx، متر (m)، یکای Δt، ثانیه (s) و یکای $\bar{v}$، متر بر ثانیه (m/s) است. البته یکاهای دیگری مانند km/h، mil/h و ... نیز برای سرعت استفاده می‌شود. توجه داریم سرعت متوسط یک جسم متحرک همواره با جابه‌جایی آن هم‌جهت است.

مثال ۲ـ۳

شکل زیر، نمودار مکان ـ زمان خودرویی که روی مسیر مستقیم حرکت می‌کند را نشان می‌دهد.



الف) سرعت متوسط خودرو در بازه‌های زمانی زیر را به‌دست آورید.

۱ـ از t=۰s تا t=۲s

۲ـ از t=۰s تا t=۴s

۳ـ از t=۲s تا t=۴s

۴ـ از t=۲s تا t=۵s

۵ـ از t=۳s تا t=۵s

ب) از مقایسهٔ سرعت‌های متوسط به‌دست آمده در بازه‌های زمانی مختلف، چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ :

الف ـ ۱) $\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۵۰-۰}{۲-۰}=۲۵\ m/s$

الف ـ ۲) $\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۱۰۰-۰}{۴-۰}=۲۵\ m/s$

الف ـ ۳) $\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۱۰۰-۵۰}{۴-۲}=۲۵\ m/s$

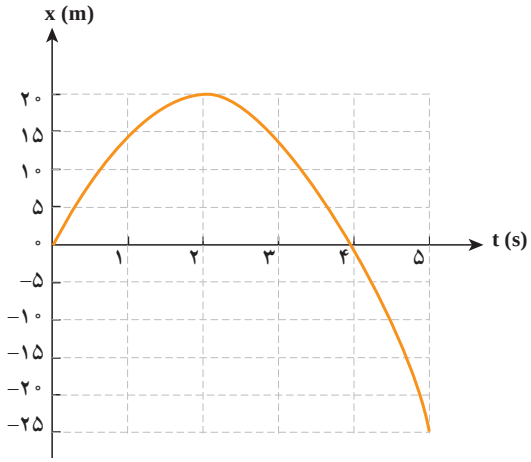
الف ـ ۴) $\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۱۲۵-۵۰}{۵-۲}=۲۵\ m/s$

الف ـ ۵) $\bar{v}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۱۲۵-۷۵}{۵-۳}=۲۵\ m/s$

ب) از مقایسهٔ سرعت‌های متوسط به‌دست آمده در بازه‌های زمانی مختلف در بند الف، درمی‌یابیم که سرعت متوسط خودرو در همهٔ بازه‌های زمانی مختلف مساوی بوده است. در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم سرعت خودرو، ثابت است.

مثال ۲ـ۴

شکل مقابل، نمودارمکان ــ زمان متحرکی که روی خط راست حرکت می‌کند را نشان می‌دهد.



الف) با استفاده از شکل، ستون مربوط به جابه‌جایی و سرعت متوسط در بازه‌های زمانی مختلف، در جدول زیر را کامل کنید.

ب) در کدام بازهٔ زمانی، در جدول، اندازهٔ سرعت متوسط بیشینه و در کدام یک اندازهٔ سرعت متوسط کمینه است؟

پ) در کدام بازه‌های زمانی در جدول، سرعت متوسط در جهت محور x و در کدام بازه‌ها، سرعت متوسط در خلاف جهت محور x است؟

ت) از مقایسهٔ سرعت‌های متوسط به دست آمده در بازه‌های زمانی مختلف چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

بازهٔ زمانی	$\Delta x(m)$	$\bar{v}(m/s)$
از t=۰s تا t=۲s		
از t=۰s تا t=۴s		
از t=۲s تا t=۴s		
از t=۲s تا t=۵s		
از t=۳s تا t=۵s		

پاسخ :

الف)

بازهٔ زمانی	$\Delta x(m)$	$\bar{v}(m/s)$
از t=۰s تا t=۲s	+۲۰	+۱۰
از t=۰s تا t=۴s	۰	۰
از t=۲s تا t=۴s	−۲۰	−۱۰
از t=۲s تا t=۵s	−۴۵	−۱۵
از t=۳s تا t=۵s	−۴۰	−۲۰

ب) در بازهٔ t=۳s تا t=۵s، اندازهٔ سرعت متوسط بیشینه، و در بازهٔ t=۰s تا t=۴s اندازهٔ سرعت متوسط کمینه است.

پ) در بازه‌های زمانی که علامت سرعت متوسط، مثبت است، سرعت متوسط در جهت محور x و در بازه‌های زمانی که علامت سرعت متوسط، منفی است، سرعت متوسط در خلاف جهت محور x است.

ت) از مقایسهٔ سرعت‌های متوسط به‌دست‌آمده در بازه‌های زمانی مختلف، درمی‌یابیم سرعت متوسط خودرو در بازه‌های زمانی مختلف، متفاوت است. در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم سرعت خودرو متغیر است.

شکل ۲ــ۹ــ سرعت‌سنج خودرو در هر لحظه، اندازهٔ سرعت لحظه‌ای را نشان می‌دهد.

سرعت متحرک در هر لحظه از زمان یا در هر نقطه از مسیر را سرعت لحظه‌ای می‌گویند. در حالت‌هایی مانند مثال ۲ــ۳ که سرعت متوسط در بازه‌های زمانی مختلف، یکسان است، سرعت لحظه‌ای با سرعت متوسط برابر است؛ اما در حالت‌هایی مانند مثال ۲ــ۴ که سرعت متوسط در بازه‌های زمانی مختلف، متفاوت است، سرعت لحظه‌ای متحرک در حال تغییر است. توجه داریم که سرعت‌سنج خودرو (شکل ۲ــ۹) در هر لحظه، اندازهٔ سرعت لحظه ای خودرو را نشان می‌دهد. در کتاب فیزیک پیش‌دانشگاهی با مفهوم سرعت لحظه‌ای بیشتر آشنا می‌شویم.

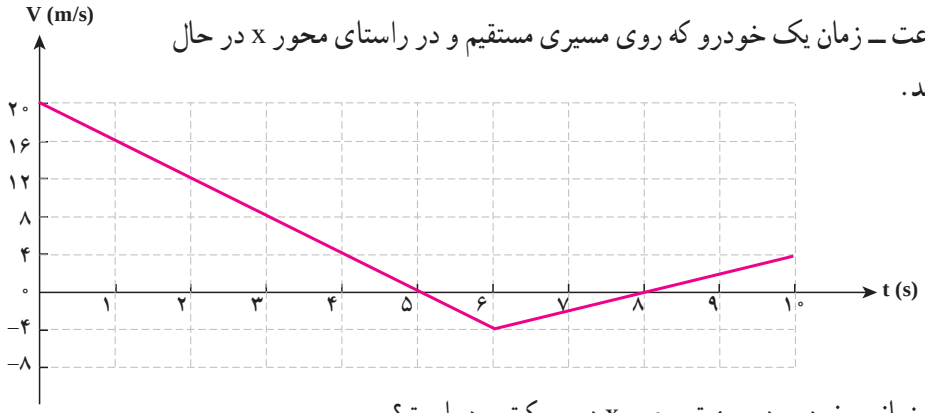
سرعت لحظه‌ای را از این به بعد برای اختصار سرعت می‌نامیم و آن‌را با v نشان می‌دهیم. یکای سرعت لحظه‌ای در SI، متر بر ثانیه (m/s) است. جدول ۲ــ۱، برخی از سرعت‌های تقریبی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ــ۱ــ برخی از سرعت‌های تقریبی

سرعت حلزون	$۱۰^{-۳}$m/s
راه‌رفتن سریع	۲m/s
دونده دوِی سرعت	۱۰m/s
سرعت بیشینه خودرو در بزرگراه	۳۰m/s
حرکت کاتوره‌ای مولکول‌های هوا	۵۰۰m/s
سریع‌ترین هواپیما	۱۰۰۰m/s
ماهواره مخابراتی در مدار	۳۰۰۰m/s
سرعت فضاپیمای خاص	۸۳۰۰m/s
سرعت مداری زمین	$۲/۹۸\times۱۰^{۴}$m/s
سرعت دنباله‌دار هالی	$۴/۱۷\times۱۰^{۴}$m/s
سرعت الکترون در حرکت مداری	۲×۱۰^{۶}m/s
سرعت نور در خلأ یا هوا	$۳/۰\times۱۰^{۸}$m/s

مثال ۲ـ۵

شکل زیر نمودار سرعت ــ زمان یک خودرو که روی مسیری مستقیم و در راستای محور x در حال حرکت است را نشان می‌دهد.



الف) در چه بازه‌های زمانی، خودرو در جهت محور x در حرکت بوده است؟

ب) در چه بازهٔ زمانی، خودرو در خلاف جهت محور x در حرکت بوده است؟

پ) در چه زمان‌هایی خودرو توقف لحظه‌ای داشته است؟

ت) در چه لحظه‌هایی خودرو در حرکتش تغییر جهت داده است؟

ث) سرعت خودرو را در لحظات $t_1=2s$ ، $t_2=6s$، $t_3=7s$، $t_4=10s$ تعیین کنید.

ج) در بازهٔ زمانی $t_i=0s$ تا $t_f=10s$ تغییر سرعت خودرو را به‌دست آورید.

پاسخ :

الف) در بازهٔ زمانی $t=0s$ تا $t=5s$ و همچنین $t=8s$ تا $t=10s$.

ب) در بازهٔ زمانی $t=5s$ تا $t=8s$.

پ) در لحظه‌های $t=5s$ و $t=8s$.

ت) در لحظه‌های $t=5s$ و $t=8s$.

ث) $t_2=6s \Rightarrow v_2=-4m/s$ $\quad$ $t_1=2s \Rightarrow v_1=+12m/s$

$t_4=10s \Rightarrow v_4=+4m/s$ $\quad$ $t_3=7s \Rightarrow v_3=-2m/s$

ج)

$$\left.\begin{array}{l} t_i=0s \Rightarrow v_i=+20m/s \\ t_f=10s \Rightarrow v_f=+4m/s \end{array}\right\} \Rightarrow \Delta v=v_f-v_i=4-20=-16m/s$$

تمرین ۲ـ۳

در جدول زیر سرعت متحرکی که بر روی خط راست در حرکت است، در چند لحظه مشخص شده است.

الف) نمودار سرعت ــ زمان را برای آن رسم کنید.

ب) از روی نمودار در مورد نحوهٔ تغییر سرعت متحرک بحث کنید.

t(s)	۰	۱	۲	۳	۴	۵
v(m/s)	۰	۰/۷	۱/۲	۱/۵	۱/۶	۱/۵

۲ـ۳ حرکت یکنواخت

هرگاه سرعت لحظه‌ای متحرکی که برروی خط راست حرکت می‌کند، در تمام لحظه‌ها یکسان باشد، حرکت آن یکنواخت نامیده می‌شود، مانند حرکت خودرویی که در یک بزرگراه و در مسیری مستقیم با سرعت ثابت در حال حرکت است. در این حرکت نمودار مکان ــ زمان، یک خط راست است مانند شکل ۲ــ۱۰ و در نتیجه سرعت متوسط بین هر دو لحظهٔ دلخواه با سرعت لحظه‌ای برابر است. بنابراین :

$$v = \bar{v} \Rightarrow v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad (۲ــ۴)$$

از رابطهٔ ۲ــ۴ می‌توان نوشت :

$$\Delta x = v\Delta t \qquad (۲ــ۵)$$

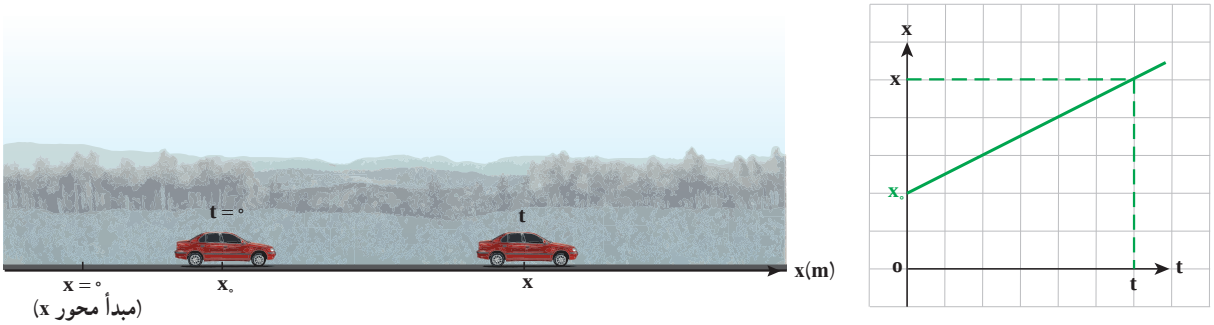
اگر متحرک در لحظهٔ $t = ۰$ در مکان $x_۰$ و در لحظهٔ t در مکان x باشد :

$$x - x_۰ = v(t - ۰)$$

و یا :

$$x = vt + x_۰ \qquad (۲ــ۶)$$

در این رابطه که آن را معادله حرکت یکنواخت می‌نامند، x برحسب متر (m)، v برحسب متر بر ثانیه، (m/s)، t برحسب ثانیه (s) و $x_۰$ نیز برحسب متر (m) است. باید توجه داشت مکان $(x_۰, x)$ می‌تواند مثبت یا منفی باشد. سرعت (v) هم در صورتی که در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این‌صورت منفی است.



شکل ۲ــ۱۰ــ نمودار مکان ــ زمان در حرکت با سرعت ثابت با فرض مثبت بودن $x_۰$ و v

مثال ۲ـ۶

معادلهٔ حرکت قطاری که روی یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، در SI به‌صورت $x = ۲۰t + ۲۰۰۰$ است. (مبدأ مختصات، ایستگاه درنظر گرفته شده است.)

الف) سرعت قطار چند متر بر ثانیه و چند کیلومتر بر ساعت است؟

ب) مکان قطار در $t = ۰s$، $t = ۱۰۰s$ و $t = ۵۰۰s$ را برحسب متر و کیلومتر تعیین کنید.

پ) اگر قطار با همین سرعت به حرکت خود ادامه دهد، در مدت ۱/۵ h چند کیلومتر مسافت می‌پیماید؟

ت) نمودار مکان ــ زمان قطار را دربازهٔ زمانی $t = ۰s$ تا $t = ۶۰۰s$ رسم کنید.

پاسخ :

الف) با مقایسهٔ معادلهٔ حرکت قطار با رابطهٔ ۲ــ۶ معلوم می‌شود که سرعت قطار ۲۰ m/s است.

$$۲۰m/s = ۲۰ \times \frac{۰/۰۰۱km}{\frac{۱}{۳۶۰۰}h} = ۲۰ \times ۳/۶\frac{km}{h} = ۷۲km/h$$

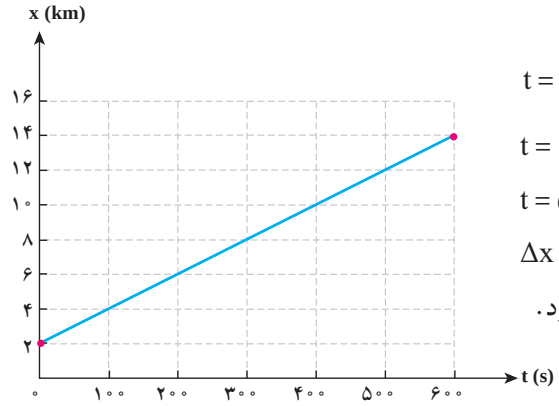
ب) $t = ۰s \Rightarrow x = ۲۰۰۰m = ۲km$

$t = ۱۰۰s \Rightarrow x = ۲۰ \times ۱۰۰ + ۲۰۰۰ = ۴۰۰۰m = ۴km$

$t = ۵۰۰s \Rightarrow x = ۲۰ \times ۵۰۰ + ۲۰۰۰ = ۱۲۰۰۰m = ۱۲km$

پ) $\Delta x = v\Delta t \Rightarrow \Delta x = ۷۲km/h \times ۱/۵h = ۱۰۸km$

ت) نمودار مکان ــ زمان قطار مطابق شکل روبه‌رو می‌شود.



مثال ۲ـ۷

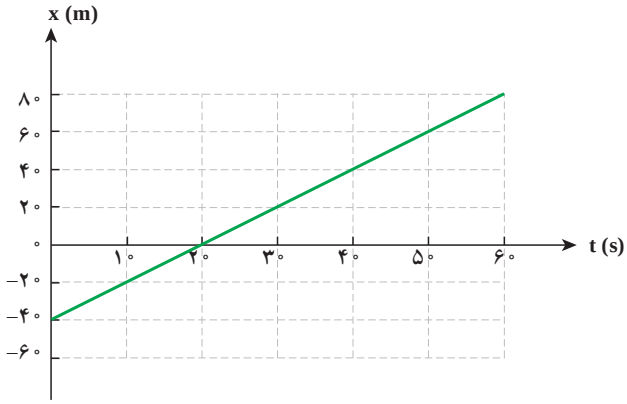
شکل مقابل نمودار مکان ــ زمان شخصی را نشان می‌دهد که با سرعت ثابت در مسیری مستقیم حرکت می‌کند.

الف) سرعت حرکت این شخص چقدر است؟ نمودار سرعت ــ زمان را برای آن رسم کنید.

ب) شخص در مبدأ زمان ($t = ۰s$) در چه مکانی قرار دارد؟

پ) شخص در مدت ۵ min چند متر جابه‌جا می‌شود؟

ت) در چه لحظه‌هایی شخص در فاصلهٔ ۲۰متری مبدأ است؟



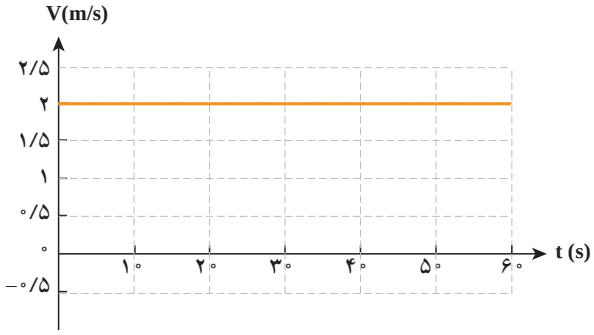
پاسخ :

الف) $v = \bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۶۰}{۳۰} = ۲m/s$

ب) $t = ۰\ s \Rightarrow x_{۰} = -۴۰m$

پ) $\Delta x = v.\Delta t = ۲ \times (۵ \times ۶۰) = ۶۰۰m$

ت) در لحظه‌های $t = ۱۰s$ و $t = ۳۰s$.



تمرین ۲ـ۴

جسمی با سرعت ثابت بر مسیری مستقیم در حرکت است. اگر جسم در لحظهٔ $t_1 = ۵s$ در مکان $x_1 = ۶m$ و در لحظهٔ $t_2 = ۲۰s$ در مکان $x_2 = ۳۶m$ باشد،

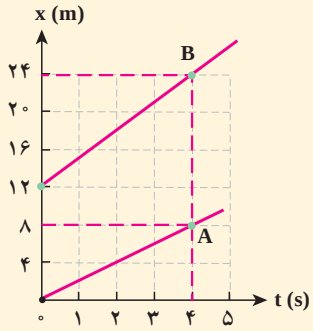
الف) مکان متحرک در لحظهٔ $t = ۰$ و سرعت آن را بیابید.

ب) معادلهٔ مکان ــ زمان را بنویسید.

پ) نمودار مکان ــ زمان را رسم کنید.

تمرین ۲ـ۵

شکل مقابل نمودار مکان ــ زمان دو متحرک A و B را نشان می‌دهد. سرعت هر یک از آنها را حساب کنید، نمودار سرعت ــ زمان هر کدام را رسم کنید و معادلهٔ حرکت هر یک از آنها را بنویسید.



۲ـ۴ شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای

هنگامی که خودرو از حال سکون به راه می‌افتد، با مشاهده سرعت‌سنج خودرو ملاحظه می‌شود که سرعت آن به تدریج افزایش می‌یابد و درهنگام ترمز کردن سرعت آن به تدریج کاهش می‌یابد. در این موارد که سرعت متحرک تغییر می‌کند می‌گوییم حرکت شتابدار یا غیریکنواخت است.

در فیزیک به نسبت تغییر سرعت به زمان تغییر آن، شتاب متوسط گفته می‌شود و آن را به‌صورت زیر نشان می‌دهند :

$$\text{شتاب متوسط} = \frac{\text{تغییر سرعت}}{\text{زمان تغییر سرعت}} \qquad (۲ــ۷)$$

تغییر سرعت را با Δv ، مدت زمان تغییر سرعت را با Δt و شتاب متوسط را با $\bar{a}$ نشان می‌دهیم. بنابراین می‌توانیم رابطهٔ ۲ــ۷ را به‌صورت زیر بنویسیم.

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} \qquad (۲ــ۸)$$

در رابطهٔ ۲ــ ۸ یکای Δv، متر بر ثانیه (m/s)، یکای Δt، ثانیه (s) و یکای $\bar{a}$ ، متر برمجذور ثانیه (m/s^2) است. توجه داریم که شتاب متوسط همواره با تغییر سرعت، هم‌جهت است. هنگامی که

درخودرویی با سرعت ۹۰km/h یا در هواپیمایی با سرعت ۹۰۰km/h سفر می‌کنید، بدن شما هیچ حسی از این حرکت ندارد. ولی اگر خودرو یا هواپیما در مدت زمان کوتاهی تغییر سرعت دهد، این تغییررا به شدت احساس می‌کنید و حتی ممکن است از آن وحشت‌زده شوید. بخشی از هیجان ایجاد شده هنگام سوار شدن در وسایل شهربازی‌ها نیز ناشی از تغییرات سریع سرعت است. یعنی بدن ما به شتاب‌ها واکنش نشان می‌دهد اما به سرعت‌ها واکنش نشان نمی‌دهد.

مثال ۲ـ۸

سرعت متحرکی در لحظهٔ $t_1=20s$ برابر $10m/s$ و در لحظهٔ $t_2=45s$ برابر $20m/s$ است. شتاب متوسط آن بین دو لحظهٔ t_1 و t_2 چقدر است؟

پاسخ :

$$\bar{a}=\frac{\Delta v}{\Delta t}\Rightarrow \bar{a}=\frac{20-10}{45-20}=\frac{10}{25}=0/4m/s^2$$

مثال ۲ـ۹

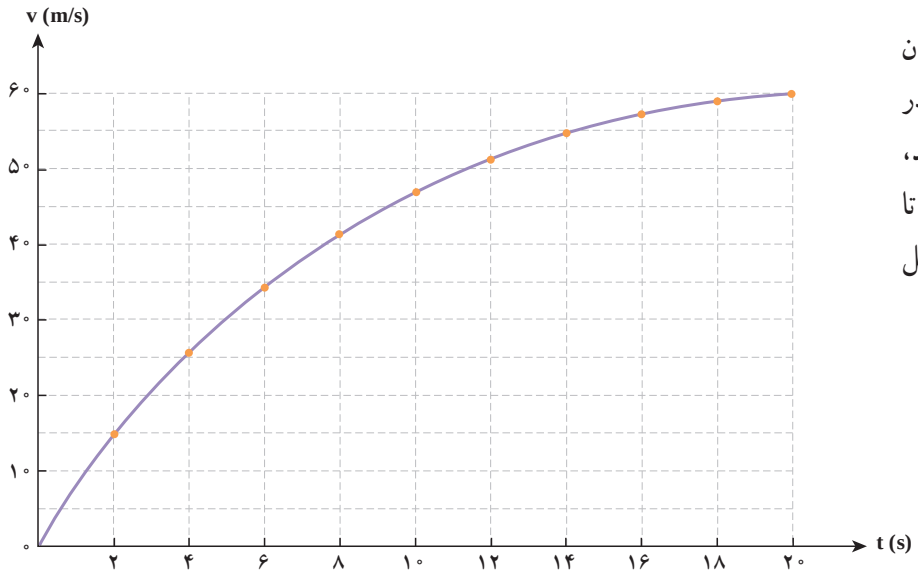
وقتی ملخی می‌خواهد بپرد، خودش را با فشار به پاهایش، از زمین بلند می‌کند و به این روش شتاب روبه بالا می‌گیرد. فیلم‌برداری از ملخ در این حالت، نشان می‌دهد ملخ به مدت $0/013s$ به پاهایش فشار می‌آورد و در پایان این مدت سرعتش $3m/s$ می‌شود. شتاب متوسط ملخ در این مدت چقدر است؟

پاسخ :

$$\bar{a}=\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{v_f-v_i}{\Delta t}=\frac{3-0}{0/013}=231m/s^2$$

مثال ۲ـ۱۰

نمودار سرعت ــ زمان برای یک ماشین مسابقه که در مسیر مستقیم حرکت می‌کند، از لحظهٔ شروع حرکتش تا $20s$ پس از این لحظه در شکل روبه‌رو رسم شده است.



الف) شتاب متوسط خودرو را در هریک از بازه‌های زمانی زیر حساب کنید.

۱ـ $t_1 = 0s$ تا $t_2 = 2s$

۲ـ $t_3 = 4s$ تا $t_4 = 14s$

۳ـ $t_4 = 14s$ تا $t_5 = 20s$

ب) در کدام یک از بازه‌های زمانی، در بند الف، شتاب متوسط بیشینه و در کدام یک کمینه است؟

پاسخ :

الف ـ۱) $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{15-0}{2-0} = +7/5 m/s^2$

الف ـ۲) $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{55-25}{14-4} = +3/0 m/s^2$

الف ـ۳) $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{60-55}{20-14} = +0/8 m/s^2$

ب) در بازه‌های زمانی بند الف، در بازهٔ زمانی $t_1 = 0s$ تا $t_2 = 2s$ ، شتاب متوسط بیشینه، و در بازهٔ زمانی $t_4 = 14s$ تا $t_5 = 20s$ ، شتاب متوسط کمینه است.

مثال ۲ـ۱۱

رابطهٔ بین سرعت و زمان برای موتورسواری که در بخشی از یک بزرگراه مستقیم حرکت می‌کند، $v = 2t + 4$ است، که t برحسب s و v برحسب m/s است.

الف) نمودار سرعت ـ زمان موتورسوار در بازهٔ زمانی $t_1 = 0s$ تا $t_2 = 12s$ را رسم کنید.

ب) شتاب متوسط موتورسوار در بازه‌های زمانی زیر را بیابید :

۱) $t_1 = 0s$ تا $t_2 = 4s$

۲) $t_2 = 4s$ تا $t_3 = 8s$

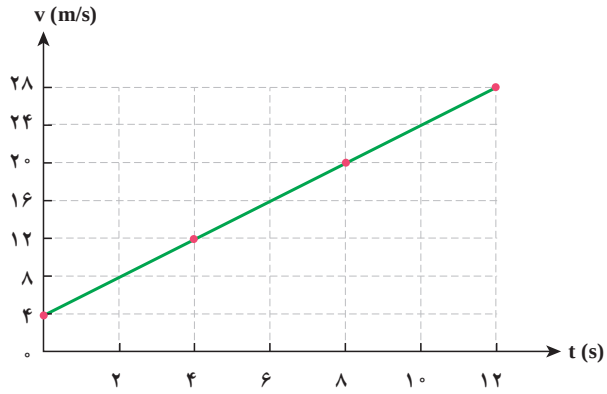
۳) $t_3 = 8s$ تا $t_4 = 12s$

پ) شتاب متوسط‌های به‌دست آمده در بازه‌های زمانی مختلف دربند ب را باهم مقایسه و در مورد آن بحث کنید.

پاسخ :

الف) سرعت موتورسوار در لحظه‌های $t_1 = 0s$ ، $t_2 = 4s$، $t_3 = 8s$ و $t_4 = 12s$ را با استفاده از رابطهٔ بین سرعت و زمان به‌دست می‌آوریم، سپس با استفاده از نقاط به‌دست آمده، نمودار سرعت ـ زمان را رسم می‌کنیم.

t(s)	۰	۴	۸	۱۲
v(m/s)	۴	۱۲	۲۰	۲۸



ب ـ ۱) $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{۱۲-۴}{۴-۰} = +۲m/s^۲$

ب ـ ۲) $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{۲۰-۱۲}{۸-۴} = +۲m/s^۲$

ب ـ ۳) $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{۲۸-۲۰}{۱۲-۸} = +۲m/s^۲$

پ) از مقایسهٔ شتاب متوسط‌های به‌دست آمده در بازه‌های زمانی مختلف در بند ب، درمی‌یابیم شتاب متوسط موتورسوار در این بازه‌ها مساوی است. در این حالت، اصطلاحاً می‌گوییم شتاب موتورسوار، ثابت است.

شتاب متحرک در هر لحظه از زمان یا در هر نقطه از مسیر را شتاب لحظه‌ای می‌گویند.

در حالت‌هایی مانند مثال ۲ـ۱۱ که شتاب متوسط در بازه‌های زمانی مختلف، یکسان است، شتاب لحظه‌ای با شتاب متوسط برابر است، اما درحالت‌هایی مانند مثال ۲ـ۱۰ که شتاب متوسط در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت است، شتاب لحظه‌ای متحرک در حال تغییر است. در کتاب فیزیک پیش‌دانشگاهی با مفهوم شتاب لحظه‌ای بیشتر آشنا می‌شویم. شتاب لحظه‌ای را پس از این برای سادگی شتاب می‌نامیم که به معنی شتاب جسم در یک لحظهٔ مشخص است. شتاب لحظه‌ای را با a نشان می‌دهیم و یکای آن در SI، متر بر مجذور ثانیه ($m/s^۲$) است. جدول ۲ـ۲ برخی از شتاب‌های تقریبی را نشان می‌دهد.

جدول ۲ـ۲ـ برخی شتاب‌های تقریبی

شتاب توپ فوتبال هنگام یک برخورد محکم با پا	$۳ \times ۱۰^۳ m/s^۲$
شتاب کک (نوعی حشره) در ابتدای پرش	$۲ \times ۱۰^۳ m/s^۲$
شتاب تصادف خودرو (با سرعت ۱۰۰km/h با دیوار)	$۱ \times ۱۰^۳ m/s^۲$
شتاب (حداکثر) چترباز در لحظهٔ باز شدن چتر	$۳/۲ \times ۱۰^۲ m/s^۲$
شتاب سقوط آزاد بر سطح خورشید	$۲/۷ \times ۱۰^۲ m/s^۲$
شتاب (حداکثر) پرتاب انفجاری صندلی هواپیما	$۱/۵ \times ۱۰^۲ m/s^۲$
شتاب سقوط آزاد بر سطح زمین	$۹/۸ m/s^۲$
شتاب ترمز خودرو	$۸ m/s^۲$
شتاب سقوط آزاد بر سطح ماه	$۱/۷ m/s^۲$

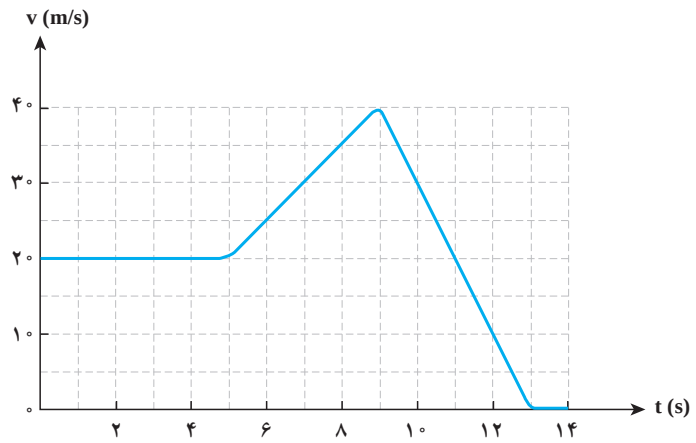
مثال ۲ـ۱۲

شکل روبه‌رو نمودار سرعت ـ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند. شتاب متحرک را در لحظه‌های داده شده به‌دست آورید. توجه داریم که اگر نمودار سرعت ـ زمان در یک بازهٔ زمانی به‌صورت خط راست باشد، شتاب لحظه‌ای با شتاب متوسط در آن بازهٔ زمانی برابر است.

الف) $t = ۲s$

ب) $t = ۷s$

پ) $t = ۱۰s$



پاسخ :

الف) $a = \bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{۲۰ - ۲۰}{۵ - ۰} = ۰ \, m/s^۲$

ب) $a = \bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{۴۰ - ۲۰}{۹ - ۵} = +۵ \, m/s^۲$

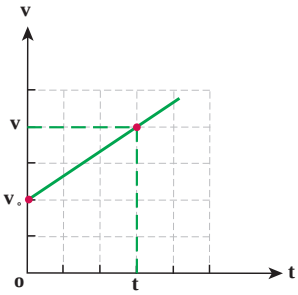
پ) $a = \bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{۰ - ۴۰}{۱۳ - ۹} = -۱۰ \, m/s^۲$

در لحظه‌هایی که علامت شتاب مثبت است، شتاب در جهت محور x است و در لحظه‌هایی که علامت شتاب منفی است، شتاب در خلاف جهت محور x است.

۲ـ۵ حرکت با شتاب ثابت

هرگاه در حرکتی شتاب در لحظه‌های مختلف یکسان باشد، آن حرکت را حرکت با شتاب ثابت می‌نامیم. در این حالت نمودار سرعت ـ زمان به‌صورت یک خط راست است (مانند شکل ۲ـ۱۱) در چنین حرکتی، شتاب در هر لحظهٔ دلخواه با شتاب متوسط متحرک در هر بازهٔ زمانی برابر می‌شود یعنی :

$$a = \bar{a} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} \qquad (۲ـ۹)$$



شکل ۲ـ ۱۱ـ نمودار سرعت ـ زمان در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن $v_۰$ و a

اگر در رابطهٔ ۲ـ۹ $t_i = ۰$ و $t_f = t$ باشد در این صورت v_i سرعت در لحظهٔ صفر با نماد $v_۰$ و v_f سرعت در لحظهٔ t با نماد v است و می‌توان نوشت :

$$a = \frac{v - v_۰}{t}$$

$$v = at + v_۰ \qquad (۲ـ۱۰)$$

دیدیم در حرکت با شتاب ثابت، نمودار سرعت ـ زمان یک خط راست است. می‌توان نشان داد که در حرکت با شتاب ثابت، سرعت متوسط بین دو لحظه، نصف مجموع سرعت‌های آن دو لحظه است، یعنی :

$$\bar{v} = \frac{v_i + v_f}{۲} \qquad (۲ـ۱۱)$$

مثال ۲ـ۱۳

قطاری زیرزمینی از یک ایستگاه به راه می‌افتد، در امتداد ریل‌های مستقیم با شتاب ثابت $۱ m/s^۲$ حرکت می‌کند و به سرعت مناسب $۲۰ m/s$ می‌رسد.

الف) چه مدت طول می‌کشد تا قطار به این سرعت برسد؟

ب) سرعت متوسط قطار در این مدت چقدر است؟

پ) قطار در این مدت چقدر جابه‌جا می‌شود؟

پاسخ :

الف) $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow ۱ = \frac{۲۰ - ۰}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = ۲۰s$

ب) $\bar{v} = \frac{v_i + v_f}{۲} = \frac{۰ + ۲۰}{۲} = ۱۰ m/s$

پ) $\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow ۱۰ = \frac{\Delta x}{۲۰} \Rightarrow \Delta x = ۲۰۰m$

مثال ۲ـ۱۴

خودرویی در یک جادهٔ مستقیم و خشک با سرعت ۲۴m/s درحرکت است. راننده با دیدن مانعی ترمز می‌کند. اگر اندازهٔ شتاب منفی خودرو هنگام ترمز $۸m/s^۲$ باشد،

الف) چقدر طول می‌کشد تا خودرو بایستد؟

ب) از لحظهٔ ترمز تا ایست کامل، خودرو چقدر پیش می‌رود؟

پ) نمودار سرعت ــ زمان خودرو از لحظهٔ ترمز تا ایست کامل را رسم کنید.

پاسخ :

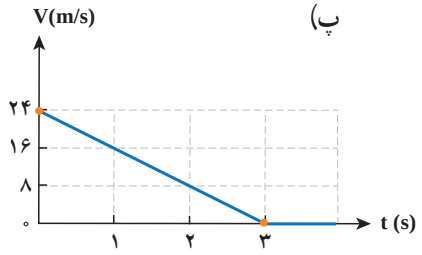
الف) $v = at + v_۰$

$۰ = -۸t + ۲۴ \Rightarrow t = ۳s$

ب) $\bar{v} = \frac{v_i + v_f}{۲} = \frac{۲۴ + ۰}{۲} = ۱۲ m/s$

$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow ۱۲ = \frac{\Delta x}{۳ - ۰} \Rightarrow \Delta x = ۳۶m$

پ)



برای به‌دست آوردن رابطهٔ ریاضی میان مکان و زمان در حرکت با شتاب ثابت، با استفاده از رابطه‌های ۲ــ۳ و ۲ــ ۱۱ داریم :

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{v_i + v_f}{۲}$$

و از آنجا می‌توان نوشت :

$$\Delta x = \frac{v_i + v_f}{۲} \Delta t \qquad (۲ــ۱۲)$$

در این رابطه Δx جابه‌جایی در بازهٔ Δt و v_i و v_f به ترتیب سرعت در لحظهٔ t_i و سرعت در لحظهٔ t_f است. اگر متحرک در لحظهٔ $t_i = ۰$ در مکان $x_i = x_۰$ و دارای سرعت $v_i = v_۰$ باشد و در لحظهٔ $t_f = t$ در مکان $x_f = x$ و دارای سرعت $v_f = v$ باشد، داریم :

$$x - x_۰ = \frac{v + v_۰}{۲} t$$

و بنا به رابطهٔ ۲ـ۱۰

$$x - x_{\circ} = \frac{at + v_{\circ} + v_{\circ}}{۲} t$$

$$x = \frac{۱}{۲} at^{۲} + v_{\circ} t + x_{\circ} \qquad (۱۳ـ۲)$$

این رابطه معادلهٔ مکان ــ زمان حرکت با شتاب ثابت است.

مثال ۲ـ۱۵

یک نوع هواپیمای جت با شتاب ثابت $۲/۵ m/s^{۲}$ شروع به حرکت روی مسیر مستقیم می‌کند و پس از $۴۰ s$ از روی باند فرودگاه بلند می‌شود.

الف) سرعت هواپیما در لحظهٔ بلند شدن چقدر است؟

ب) هواپیما پیش از بلند شدن چه فاصله‌ای را می‌پیماید؟

پ) نمودار مکان ــ زمان هواپیما را رسم کنید.

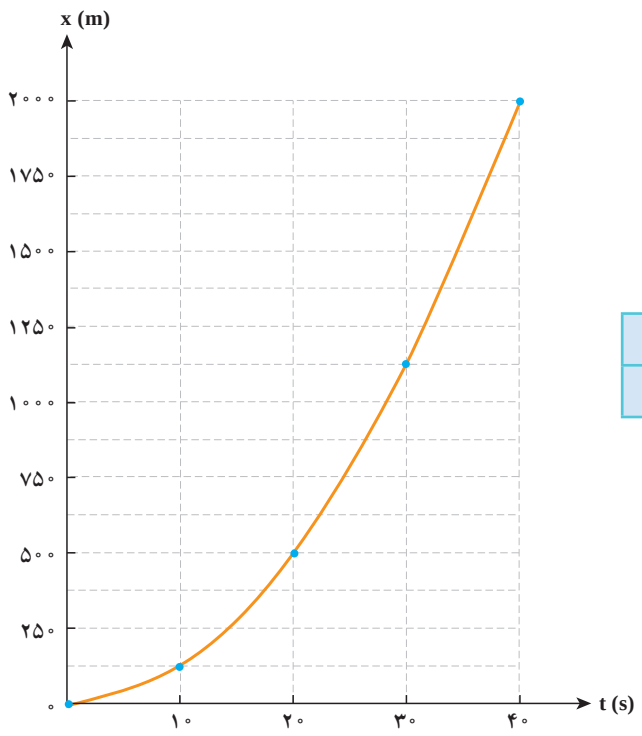
پاسخ :

الف) $v = at + v_{\circ} = ۲/۵ \times ۴۰ + ۰ = ۱۰۰ m/s$

ب) $x = \frac{۱}{۲} at^{۲} + v_{\circ} t + x_{\circ} \Rightarrow \Delta x = \frac{۱}{۲} at^{۲} + v_{\circ} t = \frac{۱}{۲} \times ۲/۵ \times ۴۰^{۲} + ۰ = ۲۰۰۰ m$

پ) با استفاده از معادلهٔ $x = \frac{۱}{۲} at^{۲} + v_{\circ} t + x_{\circ}$ و با درنظرگرفتن $x_{\circ} = ۰$، مکان هواپیما را در چند لحظهٔ متفاوت پیدا می‌کنیم.

t(s)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
x(m)	۰	۱۲۵	۵۰۰	۱۱۲۵	۲۰۰۰



برای جسمی که با شتاب ثابت حرکت می‌کند رابطهٔ ریاضی بین مکان و سرعت به‌صورت زیر است :

$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) \qquad (۱۴\text{ـ}۲)$$

فعالیت ۲ـ۱

با استفاده از رابطه‌های حرکت با شتاب ثابت، رابطهٔ ۲ـ۱۴ را به‌دست آورید.

مثال ۲ـ۱۷

در یک آزمایش تصادف، خودرویی با سرعت ۵۴km/h با دیواری ثابت و محکم برخورد می‌کند. پس از اینکه قسمت جلوی خودرو ۰/۴m فرو می‌رود قسمت عقب می‌ایستد. اگر فرض کنیم شتاب منفی قسمت عقب خودرو در مدت زمان برخورد ثابت باشد،

الف) این شتاب چقدر است؟

ب) چقدر طول می‌کشد تا قسمت عقب خودرو بایستد؟

پاسخ :

الف)

$$v_0 = 54\,km/h = \frac{54\times 1000}{3600}\,m/s = 15\,m/s$$

$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0)$$

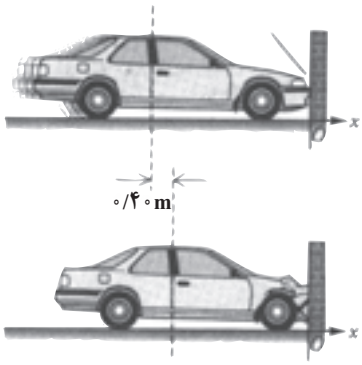
$$0 - 15^2 = 2a\times 0/4 \Rightarrow a \simeq -280\,m/s^2$$

ب)

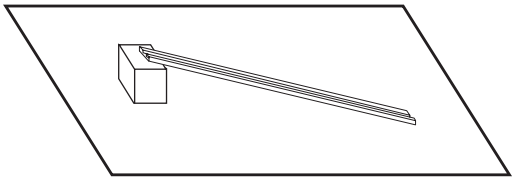
$$v = at + v_0$$

$$0 = -280t + 15 \Rightarrow t \simeq 0/05\,s$$

توجه داشته باشید که در چنین تصادفی، سرنشین خودرو، به شدت آسیب می‌بیند مگر اینکه کمربند ایمنی یا کیسهٔ هوا او را نگه دارد.



آزمایش ۲ـ۱



وسایل لازم :

۱ـ تختهٔ شیاردار یا میلهٔ پرده به طول ۲m یا بیشتر

۲ـ گلولهٔ شیشه‌ای (تیله) یا فلزی

۳ـ زمان‌سنج (کرنومتر)

۴ـ متر نواری

شرح آزمایش : می‌توان نشان داد شتاب حرکت گلوله روی میلهٔ پردهٔ شیب‌دار مقدار ثابتی است. می‌خواهیم این شتاب را برای طول راه‌های مختلف اندازه بگیریم. بنابراین :

۱ــ یک سر میله را روی چند کتاب و یا هر وسیلهٔ در دسترس طوری قرار دهید که سر میله از زمین حدود ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر بالاتر باشد.

۲ــ گلوله را در بالاترین نقطهٔ میله قرار دهید. برای ساکن نگه‌داشتن گلوله می‌توانید با یک خط‌کش، مداد یا ... جلوی به حرکت درآمدن آن را بگیرید.

۳ــ فاصلهٔ ۱/۰۰ m از محل قرار گرفتن اولیهٔ گلوله را علامت بزنید.

۴ــ گلوله را رها کنید تا مسافت موردنظر را طی کند و زمان آن را اندازه بگیرید. برای کم کردن خطای آزمایش این اندازه‌گیری را چندبار تکرار و مقدارهای به‌دست آمده را میانگین‌گیری کنید.

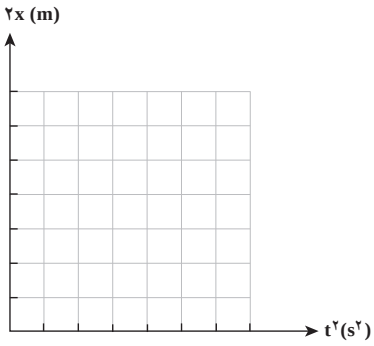
۵ــ اندازه‌گیری زمان حرکت را برای طول راه‌های بعدی مطابق جدول انجام دهید و نتایج را در جدول ثبت کنید.

توجه : در اجرای این آزمایش می‌توانید انتهای میله را مماس بر دیوار یا یک مانع سخت قرار دهید و آن‌گاه نقطهٔ شروع حرکت را روی میله و در فاصلهٔ ۱/۰۰m، ۱/۲۰m و ... از انتهای میله بگیرید.

۶ــ با استفاده از رابطهٔ $x = \frac{۱}{۲}at^۲$ ، شتاب را محاسبه و در جدول ثبت کنید.

۷ــ نمودار ۲x برحسب $t^۲$ را رسم کنید.

ردیف	مسافت (m)	زمان (s)	$a=۲x/t^۲$
۱	۱/۰۰		
۲	۱/۲۰		
۳	۱/۴۰		
۴	۱/۶۰		
۵	۱/۸۰		
۶	۲/۰۰		



ابن سینا

ابوعلی حسین‌بن‌عبداللّه، ملقب به ابن سینا که در غرب به اَوی سینا معروف است در سال ۳۵۹ هجری شمسی در اَفشنه در نزدیکی بخارا به دنیا آمد و در سال ۴۱۶ هجری شمسی در همدان درگذشت. ابن‌سینا که از کودکی هوشی سرشار داشت، به سرعت علوم زمان خود را فرا گرفت و در ۱۶ سالگی شروع به طبابت کرد. ابن سینا در فنون مختلف و متنوع تألیفات زیادی دارد و آثار او بالغ بر ۲۷۰ عنوان می‌شود. گرچه مهم ترین آثار او اثر فلسفی شفا و کتاب دایرة المعارف گونهٔ قانون در پزشکی است، امّا او در علوم و فنون زمانهٔ خود نیز دستی بر آتش داشته است. کتاب معیار العقول یکی از کتاب‌های منتسب به ابن سینا است که مباحث آن به فنّ طراحی و ساخت جراَثقال‌ها مربوط می‌شود و لذا از آثار مهندسی تمدن اسلامی محسوب می‌گردد. در این کتاب نخست به ماشین‌های ساده‌ای مانند اهرم‌های ساده و مرکب، قرقره‌های ساده و مرکب، چرخ و محور اشاره می‌شود که همگی اجزای تشکیل‌دهندهٔ جراَثقال‌ها هستند و سپس به خودِ جراَثقال پرداخته می‌شود. البته سوای این مطالب، ابن سینا در بخش طبیعیات کتاب‌های مهم خود مانند شفا، اشارات و تنبیهات و دانشنامهٔ علایی بخش نظری فیزیک مکانیک را نیز توسعه داد و قواعد جدیدی را برای توصیف حرکات عرضه کرد. او ضمن بحث عمیق دربارهٔ مفاهیم و کمیت‌های اساسی مکانیک نظری مانند جسم، ماده، هیأت، زمان، مکان، فضا و نظایر آن، عوامل یا نیروهای محرّکه را به دو دستهٔ داخلی و خارجی تفکیک کرد و ضمن تشریح منشأ هرکدام، سرانجام موفق به توصیف درست حرکت‌هایی شد که مکانیک ارسطویی از تبیین آنها عاجز بود.

پرسش‌های فصل دوم

۱ بررسی کنید، کدام معادله‌ها می‌تواند مربوط به حرکت ذره‌ای با شتاب ثابت باشد؟

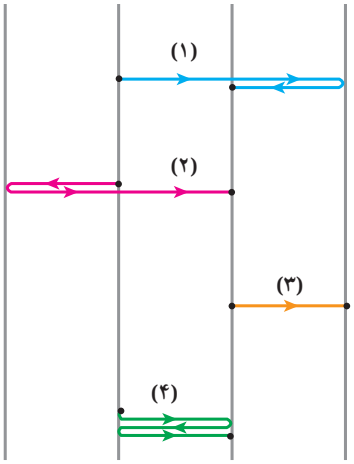
الف) $v = ۳m/s$

ب) $v = ۴t^۲ + ۲t - ۶$

پ) $v = ۳t - ۴$

ت) $v = \frac{۱}{۲}t^۲ + ۵t$

ث) $v = -\frac{۵}{۳}t + ۸$



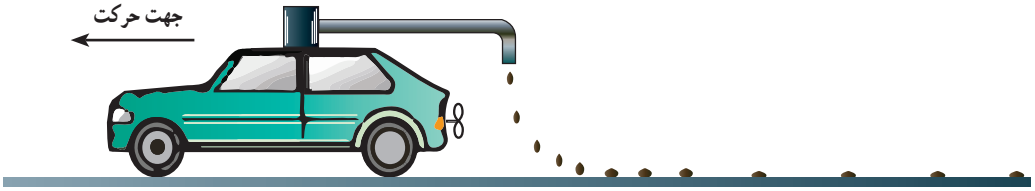
۲ شکل روبه‌رو چهار مسیر را نشان می‌دهد که روی هریک از آنها جسمی از نقطهٔ شروع تا پایان را در بازهٔ زمانی یکسانی می‌پیماید. فاصلهٔ خط‌های مشخص شده یکسان است.

الف) اندازهٔ سرعت متوسط متحرک در این چهار مسیر را با هم مقایسه کنید.

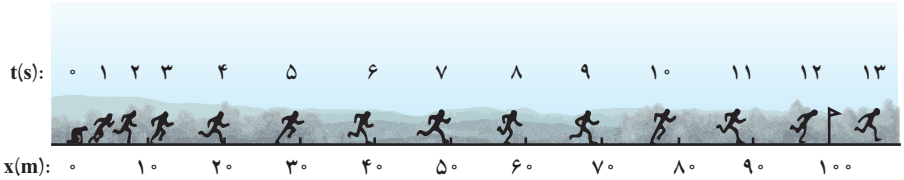
ب) مسیری را رسم کنید که سرعت متوسط جسم در آن در همین بازهٔ زمانی دوبرابر حالت (۲) باشد.

۳ ظرفی حاوی مایع رنگین که با آهنگ ثابتی چکّه می‌کند را مطابق شکل زیر روی یک ماشین بازی کوک شده می‌گذاریم و آن را به حرکت درمی‌آوریم. الف) چگونه با استفاده از ردّ قطره‌های مایع رنگین می‌توان دربارهٔ نوع حرکت ماشین کوکی اظهارنظر کرد؟

ب) اگر ردّ قطره‌ها به شکل زیر باشد، نوع حرکت را در هر ناحیه تعیین کنید.



۴ شکل زیر مربوط به یک مسابقهٔ دو ۱۰۰ متر است.

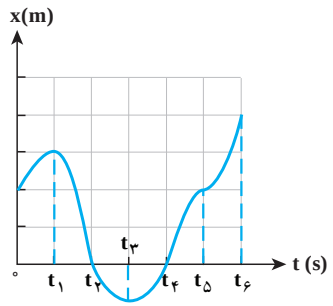


در جدول فاصلهٔ دونده تا محل شروع مسابقه در لحظه‌های مختلف داده شده است:

t(s)	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۲/۵
x(m)	۰	۱	۵	۱۱	۱۹	۲۹	۳۸	۴۸	۵۸	۶۷	۷۷	۸۶	۹۵	۱۰۰

نمودار مکان ــ زمان دونده را رسم کنید.

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



الف) متحرک چندبار از مبدأ مکان عبور می‌کند؟

ب) در کدام بازه‌های زمانی متحرک درحال دورشدن از مبدأ است؟

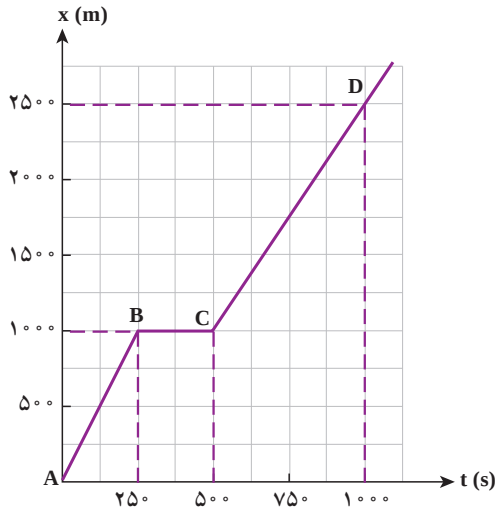
پ) در کدام بازه‌های زمانی متحرک در حال نزدیک شدن به مبدأ است؟

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

ث) جابه‌جایی کل در جهت محور xهاست یا خلاف آن؟

مسائل فصل دوم

۱ شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان حرکت یک دوندهٔ دوی نیمه استقامت برروی یک خط راست را نشان می‌دهد.



الف) بین کدام دو نقطه، دونده سریع‌تر در حال دویدن بوده است؟

ب) بین کدام دو نقطه، دونده ایستاده است؟

پ) سرعت دونده را بین دو نقطهٔ A و B از نمودار حساب کنید.

ت) سرعت دونده را بین دو نقطهٔ C و D حساب کنید.

ث) سرعت متوسط دونده را در بازهٔ زمانی $t_۱ = ۰s$ تا $t_۲ = ۱۰۰۰s$ حساب کنید.

۲ دانستن محل قرارگیری یک ماهواره درمأموریت‌های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش‌بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت‌های اصلی کارشناسان فضایی است. بدین منظور تَپ‌های الکترومغناطیسی که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند را به طرف ماهوارهٔ موردنظر ارسال می‌کنند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می‌شود. اگر زمان رفت و برگشت یک تپ ۰/۳ ثانیه باشد، فاصلهٔ ماهواره از ایستگاه زمینی، تقریباً چه مقدار است؟

۳ معادلهٔ حرکت جسمی که روی خط راست در حرکت است در SI به‌صورت $x = ۳t - ۴$ است.

الف) چه مدت پس از لحظهٔ صفر متحرک به مبدأ می‌رسد؟

ب) متحرک در لحظهٔ $t = ۱s$ در چه مکانی قرار دارد؟

پ) جابه‌جایی متحرک بین دو لحظهٔ $t = ۱s$ و $t = ۵s$ چقدر است؟

۴ راننده‌ای فاصلهٔ مستقیم بین دو شهر را به ترتیب زیر می‌پیماید.

ابتدا به مدت یک ساعت با سرعت متوسط ۱۵m/s رانندگی کرده و پس از آن به مدت ۱۰ دقیقه توقف می‌کند. آنگاه با سرعت متوسط ۲۰m/s به مدت ۳۰ دقیقه به رانندگی ادامه می‌دهد و بقیه مسیر را تا مقصد به مدت یک ربع ساعت با سرعت متوسط ۱۲m/s رانندگی می‌کند.

الف) فاصلهٔ بین دو شهر چند کیلومتر است؟

ب) سرعت متوسط او در کل مسیر چند کیلومتر بر ساعت است؟

۵ سرعت یک خودرو در مدت ۲۰ ثانیه، روی یک مسیر مستقیم از ۱۰m/s به ۱۸m/s می‌رسد.

الف) شتاب متوسط خودرو در این مدت چقدر است؟

ب) اگر سرعت با همین شتاب تغییر کند، پس از چه مدت سرعت آن به ۱۰۸ کیلومتر بر ساعت می‌رسد؟

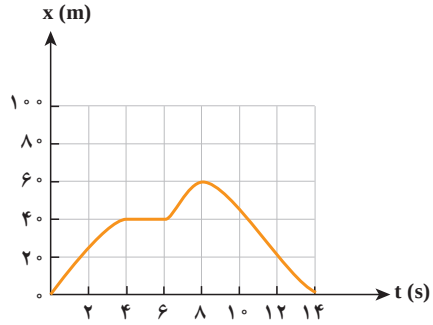
۶ سرعت فضاپیمایی ۳۰ ثانیه پس از شروع حرکت به ۱۲۰۰km/h می‌رسد. شتاب متوسط آن در این مدت چقدر است؟

۷ راننده خودرویی که با سرعت ۷۲km/h در حرکت است، مانعی را مقابل خود می‌بیند و سرعت خود را کم می‌کند به‌طوری که پس از ۸ ثانیه می‌ایستد.

الف) شتاب متوسط حرکت از لحظهٔ شروع کند شدن حرکت تا توقف خودرو چقدر است؟

ب) اگر در مدت کندشدن حرکت خودرو، شتاب آن ثابت فرض شود، خودرو چه مسافتی را تا لحظهٔ توقف پیموده است؟

۸ شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان متحرکی است که روی یک مسیر مستقیم در حال حرکت است.



الف) در چه لحظه‌ای دوچرخه‌سوار بیشترین فاصله از مبدأ را دارد؟

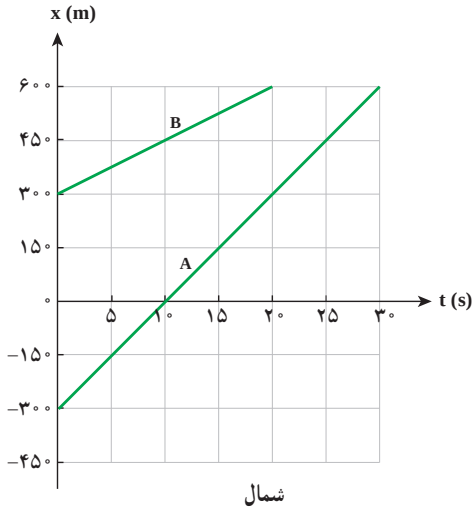
ب) در چه بازهٔ زمانی دوچرخه سوار در جهت محور x حرکت می‌کند؟

پ) در چه بازه‌های زمانی دوچرخه‌سوار در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟

ت) در چه بازهٔ زمانی، دوچرخه‌سوار ساکن است؟

ث) جابه‌جایی دوچرخه‌سوار در کل مدت حرکت چقدر است؟

۹ شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان دو خودرو را نشان می‌دهد که روی خط راست حرکت می‌کنند.

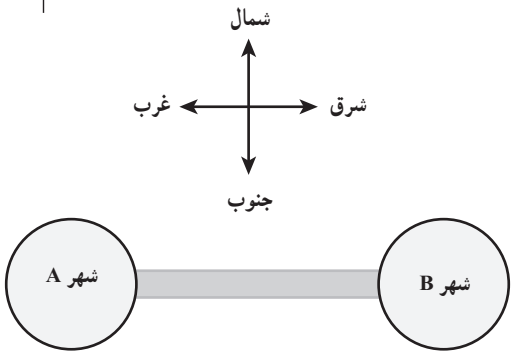


الف) معادلهٔ حرکت هریک از آنها را بنویسید.

ب) اگر حرکت خودروها با همین سرعت ادامه پیدا کند، در چه لحظه‌ای دو خودرو به هم می‌رسند؟

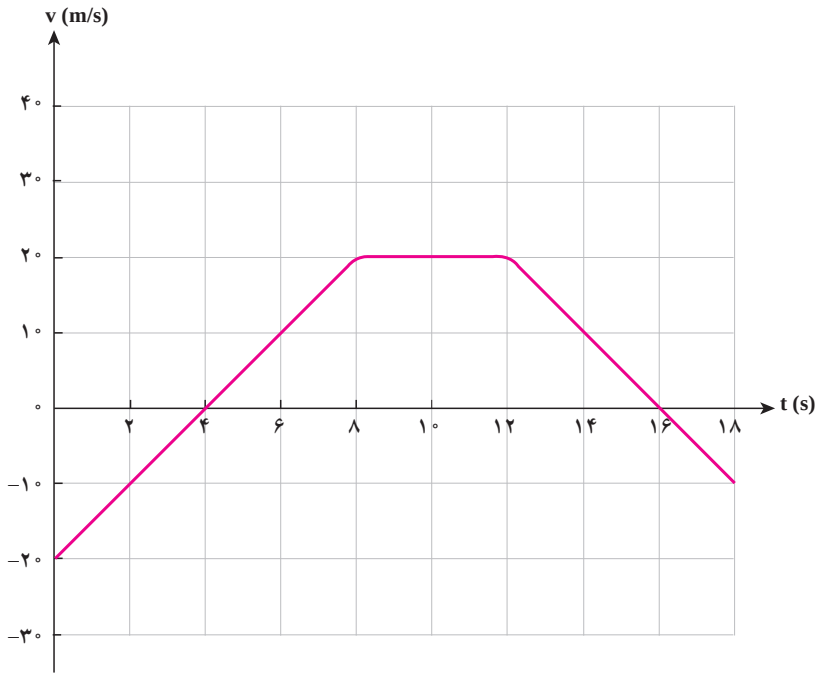
پ) در لحظه‌ای که دو خودرو به هم می‌رسند، در چه مکانی هستند؟

۱۰ موتورسواری در یک بزرگراه مستقیم مانند شکل از شهر A به طرف شهر B در حال حرکت است. اگر سرعت موتورسوار در $t_1 = ۱۵۰s$، ۱۸km/h و در $t_2 = ۱۷۰s$، ۹۰km/h باشد،



الف) شتاب متوسط موتورسوار در این مدت چقدر و در چه جهتی است؟

ب) اگر در $t_3 = ۱۸۰s$، سرعت موتورسوار به ۷۲km/h برسد، شتاب متوسط موتورسوار بین لحظه‌های t_2 و t_3 چقدر و در چه جهتی است؟



۱۱ شکل روبه‌رو نمودار سرعت ــ زمان متحرکی است که روی یک مسیر مستقیم و در راستای محور x در حرکت است.

الف) در چه بازهٔ زمانی موتورسوار در جهت مثبت محور x حرکت می‌کند؟

ب) در چه بازه‌های زمانی، موتورسوار در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟

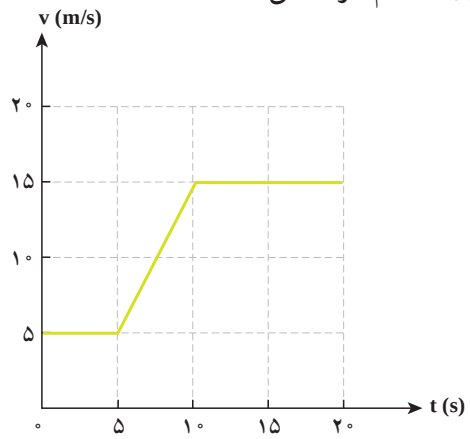
پ) در چه بازهٔ زمانی، موتورسوار با سرعت ثابت حرکت کرده است؟

ت) در چه لحظه هایی جهت حرکت موتورسوار تغییر کرده است؟

ث) سرعت موتورسوار در لحظه‌های $t = ۰s$ و $t = ۲s$ و $t = ۴s$ و $t = ۱۴s$ و $t = ۱۸s$ را تعیین کنید.

ج) شتاب حرکت در $t = ۴s$ و $t = ۱۰s$ و $t = ۱۶s$ را به‌دست آورید.

۱۲ شکل روبه‌رو نمودار سرعت ــ زمان خودرویی را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند.



الف) شتاب در لحظه‌های $t = ۳s$، $t = ۸s$، $t = ۱۱s$ و $t = ۱۵s$ را به‌دست آورید.

ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی $t_۱ = ۰s$ تا $t_۲ = ۲۰s$ را به‌دست آورید.

پ) خودرو در هریک از بازه‌های زمانی $t_۱ = ۵s$ تا $t_۲ = ۱۱s$ و $t_۲ = ۱۱s$ تا $t_۳ = ۲۰s$ چقدر جابه‌جا شده است؟

ت) سرعت متوسط خودرو در بازه‌های $t_۱ = ۵s$ تا $t_۲ = ۱۱s$ و $t_۳ = ۱۵s$ تا $t_۴ = ۲۰s$ را به‌دست آورید.

۱۳ خودرویی در مسیری مستقیم با شتاب ثابت شروع به حرکت می‌کند و پس از ۲۰ ثانیه سرعتش به ۳۶km/h می‌رسد. سپس با همین سرعت به مدت ۱۰ دقیقه به حرکتش ادامه می‌دهد. پس از آن ترمز می‌کند و بعد از ۵ ثانیه متوقف می‌شود. اگر در مدت ترمز کردن شتاب ثابت باشد،

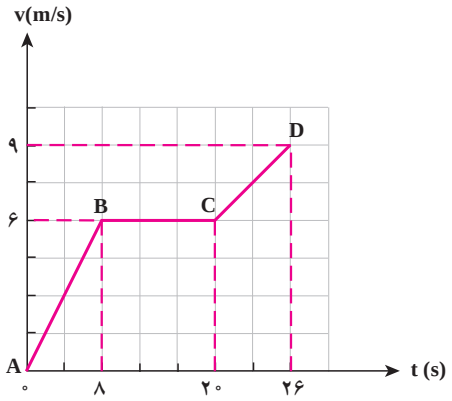
الف) شتاب حرکت را در هر مرحله معلوم کنید.

ب) نمودار سرعت ــ زمان را از لحظهٔ شروع حرکت تا لحظهٔ توقف خودرو رسم کنید.

۱۴ متحرکی روی محور x و با شتاب ثابت در حرکت است. سرعت متحرک در مکان x = +۱۰m، +۴m/s و در مکان x= +۱۹m +۱۸ km/h است.

الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟

ب) رسیدن از سرعت +۴m/s به سرعت +۱۸ km/h چه مدتی طول می‌کشد؟



۱۵ شکل روبه‌رو نمودار سرعت ــ زمان متحرکی را در ۲۶ ثانیه نشان می‌دهد.

الف) شتاب در هریک از مرحله‌های AB ، BC و CD چقدر است؟

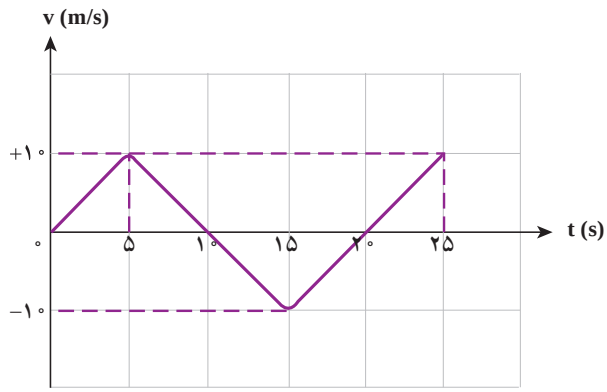
ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی صفر تا ۲۶ ثانیه چقدر است؟

۱۶ سر یک دارکوب در حین نخستین تماس منقار آن با تنهٔ درخت، با سرعت ۷/۵۰m/s روبه جلو حرکت می‌کند. منقار دارکوب پس از سوراخ کردن تنهٔ درخت و فرو رفتن در آن به اندازهٔ ۱/۸۷mm، متوقف می‌شود. با فرض آنکه در این حرکت شتاب ثابت باشد، بزرگی شتاب را به‌دست آورید.

۱۷ سر یک مار زنگی در حین ضربه زدن به یک طعمه می‌تواند ۵۰m/s^{۲} شتاب بگیرد. اگر یک خودرو می‌توانست چنین شتابی داشته باشد، چقدر طول می‌کشید تا از حال سکون به سرعت ۱۰۰km/h برسد؟

۱۸ یک دونده در ۰/۷۵ ثانیهٔ اول مسابقه، شتاب ۸/۰m/s^{۲} می‌گیرد. الف) سرعت دونده را در پایان ۰/۷۵ s اول محاسبه کنید. ب) اکنون فرض کنید دونده تا آخر مسابقه با سرعت ۶/۰m/s به دویدن ادامه دهد و پس از عبور از خط پایان حرکتش را با شتاب ثابت کُند کند. اگر اندازهٔ شتاب منفی دونده پس از عبور از خط پایان، ۲/۰m/s^{۲} باشد، پس از عبور از خط پایان چقدر طول می‌کشد تا دونده متوقف شود؟ و در این مدت چه مسافتی را طی می‌کند؟

۱۹ نمودار سرعت ــ زمان یک متحرک مطابق شکل زیر است. نمودار شتاب ــ زمان متحرک را رسم کنید.



۳

دینامیک

به‌نظر شما برای کشیدن تور ماهی‌گیری به چه مقدار نیرو نیاز است؟

ماهی‌گیران در سواحل خلیج فارس

در فصل دوم با کمیت‌هایی مانند مکان، جابه‌جایی، سرعت و شتاب آشنا شدیم و با تعریف این کمیت‌ها، حرکت را توصیف کردیم. دیدیم که ممکن است حرکت با سرعت ثابت انجام شود یا ممکن است حرکت جسم شتاب‌دار باشد و در نتیجه سرعت تغییر کند. اما از طرح و پاسخ پرسش‌هایی مانند در چه صورتی یک جسم ساکن می‌ماند؟ چگونه می‌توان جسم ساکنی را به حرکت درآورد؟ چه عاملی باعث تغییر سرعت جسم می‌شود؟ چه عاملی باعث تغییر در حرکت و به‌طور کلی چه عاملی باعث تغییر در وضعیت جسم می‌شود؟ و ... خودداری کردیم.

در این فصل می‌خواهیم این پرسش‌ها را طرح کنیم و پاسخ آنها را بیابیم. برای یافتن پاسخ این پرسش‌ها، باید در ابتدا با کمیتی به نام نیرو بیشتر آشنا شویم.

۳ـ۱ نیرو

در کتاب‌های علوم دبستان و راهنمایی تا حدودی با «نیرو» آشنا شده‌اید. در مکالمه‌های روزانه از این واژه استفاده می‌کنید. منظور از این واژه چیست؟ ساده‌ترین پاسخ این است که بگوییم «هرگاه بخواهیم جسمی را هُل دهیم یا بکشیم، به آن نیرو وارد می‌کنیم». برای شناخت بیشتر نیرو، بهتر است در مورد «اثر نیرو بر یک جسم» بحث کنیم.

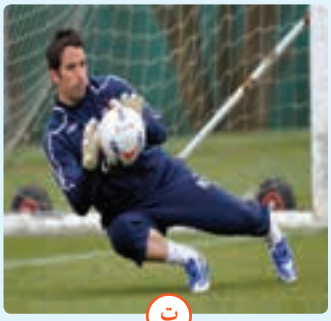
فعالیت ۳ـ۱

در هر یک از شکل‌های زیر، اثری را که نیرو بر جسم گذاشته است، شرح دهید.

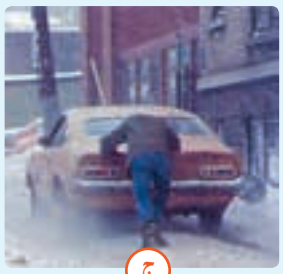
الف

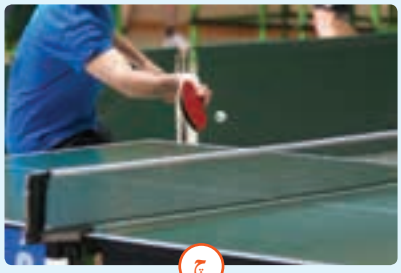
ب

پ


ت

ث


ج


چ

در بسیاری از موارد برای آنکه دوجسم به‌هم نیرو وارد کنند باید باهم تماس داشته باشند. مثلاً برای برداشتن یک کتاب از قفسهٔ کتاب‌ها باید دست شما به آن برسد تا با وارد کردن نیرو به کتاب، بتوانید آن را بردارید. برای اعمال نیروی دست بر کتاب وجود دست و کتاب لازم است.

همچنین در بازی فوتبال وقتی توپ به طرف شما پرتاب می‌شود، اگر توپ به پای شما یا به جسم دیگری برخورد نکند مسیر توپ تغییر نمی‌کند. برای آنکه به توپ نیرو وارد شود و مسیر آن تغییر کند وجود پا و توپ لازم است تا در تماس پا به توپ به آن نیرو وارد شود. اما گاهی برای تأثیر نیرو تماس لازم نیست. مثلاً به فعالیت زیر توجه کنید :

فعالیت ۳ـ۲

به شکل روبه‌رو نگاه کنید. این تصویر سیبی را در حال افتادن نشان می‌دهد. پاسخ پرسش‌های زیر را در کلاس به بحث بگذارید :

الف) چه عاملی باعث سقوط سیب شده است؟

ب) این نیرو را چه جسمی به سیب وارد می‌کند؟

پ) آیا بین سیب و این جسم تماس برقرار است؟

نیروهای گرانشی، مغناطیسی و الکتریکی می‌توانند از راه دور و بدون تماس اجسام باهم اثر کنند. مثلاً خورشید از فاصلهٔ بسیار دور بر سیاره‌های منظومهٔ خورشیدی نیرو وارد می‌کند یا یک آهن‌ربا، از راه دور به یک قطعه آهن نیرو وارد می‌کند و آن را به سوی خود می‌کشد. با توجه به آنچه تاکنون در مورد نیرو بیان شد، می‌توان گفت :

۱ــ نیرو عاملی است که اگر بر یک جسم وارد شود سبب تغییر اندازهٔ سرعت جسم یا تغییر جهت آن می‌شود. مثلاً ممکن است جسم ساکن با اعمال نیرو شروع به حرکت کند یا جسم متحرک در اثر اعمال نیرو متوقف شود.

۲ــ نیرو برهم‌کنش (تأثیر) دو جسم بر یکدیگر است.

۳ــ تأثیر دو جسم بر هم ممکن است ناشی از تماس دو جسم باشد و یا دو جسم از راه دور بر یکدیگر نیرو وارد کنند.

نیرو کمیتی برداری و دارای اندازه و جهت است. تجربه‌های روزانه نشان می‌دهد که اگر بخواهیم جسمی مثلاً یک توپ فوتبال را با سرعت زیاد پرتاب کنیم، باید به آن نیروی بزرگی وارد کنیم. مثلاً هنگام زدن پنالتی در بازی فوتبال برای آنکه دروازه‌بان نتواند توپ را بگیرد، باید با وارد کردن نیروی بزرگ‌تری به توپ آن را با سرعت بیشتری به سوی دروازه شوت کنیم. از طرف دیگر برای آنکه توپ از دسترس دروازه‌بان خارج باشد، نیرو را در جهتی بر توپ وارد و روانهٔ دروازه می‌کنیم که احتمال می‌دهیم دروازه‌بان به آن سمت حرکت نمی‌کند.

بزرگی (اندازه) نیرو را به کمک نیروسنج اندازه می‌گیریم. شکل ۳ــ۱ نمونه‌هایی از چند نوع نیروسنج را نشان می‌دهد. یکای اندازه‌گیری نیرو، نیوتون (با نماد N) نام دارد که با تعریف آن، در همین فصل آشنا می‌شوید.

شکل ۳ــ۱ــ نمونه‌هایی از چند نیروسنج

۳ــ۲ قانون‌های نیوتون دربارهٔ حرکت

در بخش‌های قبل دیدیم که نیرو عامل تغییر سرعت در اجسام است.

نیوتون، دانشمند انگلیسی، با اطلاع از نظرهای دانشمندان قبل از خود موفق شد قانون‌های حرکت را که امروزه به نام خود او «قانون‌های نیوتون دربارهٔ حرکت» نام دارد، در کتاب اصول خود بیان کند. این قانون‌ها به شرح زیر هستند.

قانون اول نیوتون : پیشینیان گالیله معتقد بودند که جسم متحرک برای ادامهٔ حرکتش به نیرو نیاز دارد. گالیله با آزمایش‌هایش نشان داد حرکت جسم می‌تواند بدون نیاز به نیرو تداوم داشته باشد. نیوتون با بهبود بخشیدنِ این نظر قانون اول را به صورت زیر بیان کرد :

«یک جسم حالت سکون یا حرکت یکنواخت روی خط راست خود را حفظ می‌کند مگر آنکه تحت تأثیر نیرویی مجبور به تغییر آن حالت شود.»

به بیان دیگر اگر به جسمی نیرو وارد نشود چنانچه جسم ساکن باشد ساکن می‌ماند و اگر در حرکت باشد به حرکت خود با سرعت ثابت ادامه می‌دهد.

به جسم‌های اطراف خود نگاه کنید. آیا جسمی را می‌یابید که به آن نیرو وارد نشود؟ به‌همهٔ جسم‌ها نیروی وزن وارد می‌شود. در نتیجه نمی‌توان جسمی را یافت که به آن نیرو وارد نشود تا بتوان قانون اول نیوتون را مورد آزمایش قرار داد.

هرگاه به جسمی که در حال حرکت است نیرویی وارد نشود مانند جسمی که از زمین بسیار دور شود و به ماه یا سیاره‌های دیگر نیز نزدیک نباشد، جسم با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. این مسئله را بشر در فرستادن سفینه‌های فضایی به خارج از زمین تقریباً آزموده است. وقتی سفینه به اندازهٔ کافی از زمین دور می‌شود با موتور خاموش و با سرعت تقریباً ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد.

اگر به جسمی نیرو وارد نشود جسم وضعیت سکون یا حرکت یکنواخت روی خط راست خود را حفظ می‌کند. به این ویژگی اجسام لختی گفته می‌شود. به‌همین مناسبت به قانون اول نیوتون قانون لختی نیز می‌گویند.

فعالیت ۳ـ۳

وقتی در ماشین ساکنی نشسته‌اید و ماشین ناگهان شروع به حرکت می‌کند، به صندلی فشرده می‌شوید و اگر در ماشین در حال حرکت نشسته باشید در توقف ناگهانی به جلو پرتاب می‌شوید. علت این پدیده‌ها را توضیح دهید.

قانون دوم نیوتون : در بخش قبل دیدیم که «اگر بر جسم نیرویی وارد نشود، جسم حالت سکون یا حرکت یکنواخت خود بر روی خط راست را حفظ می‌کند.» امّا آزمایش‌ها نشان می‌دهند اگر بر جسم نیرو وارد شود، جسم تحت تأثیر آن نیرو شتاب می‌گیرد. رابطهٔ میان نیروهای وارد بر جسم و شتاب حرکت جسم موضوع قانون دوم نیوتون است. قانون دوم نیوتون به‌صورت زیر بیان شده است :

«اگر به یک جسم نیروهایی وارد شود، شتابی می‌گیرد که با برایند نیروهای وارد بر جسم نسبت مستقیم دارد و با آن هم جهت است و با جرم جسم نسبت وارون دارد.»

اگر جرم جسم m و برایند نیروهای وارد به آن $\vec{F}_{\text{برایند}}$ باشد، قانون دوم نیوتون با رابطهٔ زیر بیان می‌شود :

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

و یا

$$\vec{F}_{\text{برایند}} = m\,\vec{a} \qquad (۱ـ۳)$$

یکای نیرو در SI نیوتون (N) است که از رابطهٔ ۳ـ۱ تعریف می‌شود. اگر در این رابطه جرم برحسب کیلوگرم (kg) و شتاب برحسب متربرمجذور ثانیه (m/s^2) قرار داده شود، نیرو برحسب $kg.m/s^2$ خواهد شد که آن را نیوتون (N) می‌نامیم. بنابراین «یک نیوتون نیرویی است که اگر بر جسمی به جرم یک کیلوگرم وارد شود به آن شتابی برابر یک متر بر مجذور ثانیه می‌دهد.»

مثال ۳ـ۱

جسمی به جرم ۵۰۰g تحت تأثیر نیروی F = ۲N در جهت محور x قرار دارد. شتاب جسم چقدر و در چه جهتی است؟

پاسخ : بزرگی شتاب برابر است با

$$a = \frac{F_{\text{برایند}}}{m} = \frac{۲}{۰/۵} = ۴\,m/s^2$$

با توجه به قانون دوم نیوتون، شتاب جسم هم‌جهت با نیروی $\vec{F}$ و در نتیجه در جهت محور x است.

مثال ۳ـ۲

به دو توپ به جرم‌های $m_1 = ۱۰۰g$ و $m_2 = ۳۰۰g$ نیروی ۱۵N وارد می‌کنیم. بزرگی شتاب هر توپ را حساب کنید.

پاسخ :

$$a = \frac{F_{\text{برایند}}}{m}$$

$$a_1 = \frac{F_{\text{برایند}}}{m_1} = \frac{۱۵}{۰/۱} = ۱۵۰\,m/s^2 \qquad a_2 = \frac{F_{\text{برایند}}}{m_2} = \frac{۱۵}{۰/۳} = ۵۰\,m/s^2$$

در این مثال دیدیم که هرچه جرم جسم بیشتر باشد مقاومتش در برابر شتاب گرفتن (تغییر سرعت) بیشتر است. بنابراین می‌توان گفت : جرم هر جسم معیاری برای مقاومت جسم در مقابل تغییر سرعت است که به آن لختی نیز گفته می‌شود.

قانون سوم نیوتون : وقتی با دست دیوار را هُل می‌دهیم، حس می‌کنیم که دیوار نیز ما را هُل می‌دهد. به این ترتیب در برهم کنش دست ما و دیوار دو نیرو وجود دارد. اگر نیروی دست خود به دیوار را نیروی کُنش بنامیم، نیروی دیوار به دست ما نیروی واکنش نامیده می‌شود. همین‌طور درست است که نیروی دیوار به دستمان را نیروی کنش و نیروی دست ما به دیوار را نیروی واکنش بنامیم.

نکتهٔ مهم این است که در مکانیک کلاسیک نیروهای کنش و واکنش همیشه همراه هم ظاهر می‌شوند و هیچ یک بدون دیگری نمی‌تواند وجود داشته باشد.

قانون سوم نیوتون رابطهٔ کمّی میان نیروهای کنش و واکنش را به‌صورت زیر بیان می‌کند :

«هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند جسم دوم نیز به جسم اول نیرویی هم‌اندازه ولی در خلاف جهت آن وارد می‌کند.»

برای مثال در شکل ۳ــ۲ نیروهای $\vec{F}_{۱۲}$ (نیرویی که جسم اول به جسم دوم وارد می‌کند) و $\vec{F}_{۲۱}$ (نیرویی که جسم دوم به جسم اول وارد می‌کند) نیروهای کنش و واکنش (عمل و عکس‌العمل) هستند.

$$\vec{F}_{۱۲} = -\vec{F}_{۲۱} \Rightarrow F_{۱۲} = F_{۲۱}$$

شکل ۳ــ۲ــ دو آهن‌ربای میله‌ای که روی دو گاری سوار شده‌اند بر هم نیرو وارد می‌کنند

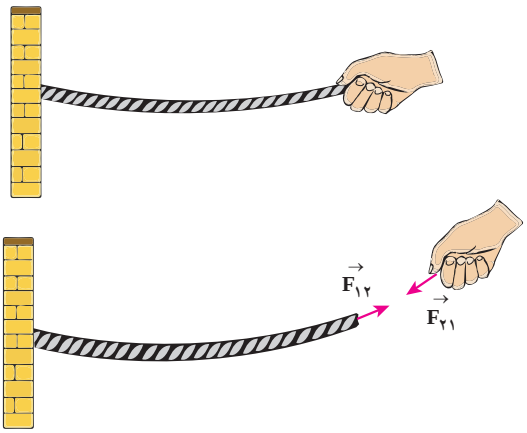
در مورد نیروهای کنش و واکنش توجه کنید که :

ــ این دو نیرو همواره هم‌اندازه، هم‌راستا و در سوهای مخالف یکدیگرند.

ــ این دو نیرو به دو جسم وارد می‌شوند.

ــ این دو نیرو هم‌نوع‌اند. به‌عنوان مثال هر دو گرانشی‌اند یا هر دو الکتریکی‌اند یا ...

مثال ۳ــ۳



مطابق شکل، یک سر طنابی را به دیوار محکم کرده و سر دیگر آن را با دست می‌کشیم. اگر طناب از دیوار جدا نشود، نیروهای کنش و واکنش بین «دست و طناب» را مشخص کنید.

پاسخ : در شکل نیروهای بین دست و طناب نشان داده شده است. در این شکل، دست را جسم ۱ و طناب را جسم ۲ نامیده‌ایم.

$\vec{F}_{۱۲} = -\vec{F}_{۲۱}$ کنش و واکنش $\Rightarrow F_{۱۲} = F_{۲۱}$

تمرین ۳ـ۱

در هر یک از شکل‌های زیر نیروهای کنش و واکنش را مشخص کنید.

برخورد دو خودرو

برخورد دست با کیسه بوکس

خارج شدن گیاه از دانه (جوانه زدن)

برخورد چکش با میخ

۳ـ۳ معرفی چند نیروی خاص

دیدیم که نیرو عامل ایجاد شتاب و در نتیجه، عامل تغییر در سرعت جسم است. بنابراین برای بررسی حرکت یک جسم باید نیروهای وارد بر آن را مشخص و اندازه‌گیری کنیم.

در این بخش به معرفی چند نیروی خاص می‌پردازیم که در بحث حرکت از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

نیروی گرانشی : آیا تاکنون از خود پرسیده‌اید که چرا آب در جویبارها به طرف پایین حرکت می‌کند؟ چرا وقتی یک جسم را به بالا پرتاب می‌کنیم، پس از مدتی به پایین می‌افتد؟ چرا آب دریاها دچار جذر و مد می‌شود؟ ماه تحت تأثیر چه نیرویی در مدار خود به دور زمین می‌چرخد؟

در سال ۱۶۶۵ میلادی نیوتون، دانشمند انگلیسی، نشان داد نیرویی که ماه را در مدارش به دور زمین نگه می‌دارد، از جنس همان نیرویی است که موجب افتادن یک سیب می‌شود. به این نیرو

نیروی گرانشی گفته می‌شود. نیروی گرانشی بین دو جسم با استفاده از قانون گرانش عمومی به دست می‌آید. بنا به قانون گرانش نیوتون :

«نیروی گرانشی میان دو ذره با حاصل ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مجذور فاصلهٔ آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.»

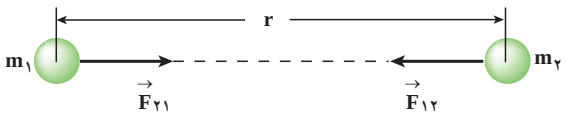
اگر جرم دو ذره m_1 و m_2 و فاصلهٔ میان آنها مطابق شکل ۳ـ۳ برابر r باشد، اندازهٔ نیروی گرانشی میان دو ذره (F) از رابطهٔ ۳ـ۲ به‌دست می‌آید :

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad \text{کنش و واکنش} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = F$$

$$F = G\frac{m_1.m_2}{r^2} \qquad (۳ـ۲)$$

در این رابطه G ثابت گرانش عمومی نام دارد. در SI که یکای جرم کیلوگرم (kg)، یکای نیرو نیوتون (N) و یکای فاصله متر (m) است، G برابر است با :

$$G = 6/67 \times 10^{-11}\ N.m^2/kg^2$$



شکل ۳ـ۳ـ دو ذره به جرم‌های m_1 و m_2 بر هم نیروی گرانشی وارد می‌کنند.

مثال ۳ـ۴

دو جسم به جرم‌های ۵۰kg و ۶۰kg در فاصلهٔ یک متر از یکدیگر واقع شده‌اند. نیروی گرانش میان آنها را محاسبه کنید.

پاسخ :

$$F = G\frac{m_1.m_2}{r^2}$$

$$F = 6/67 \times 10^{-11} \times \frac{50 \times 60}{1^2} = 2 \times 10^{-7}\ N$$

همان‌طور که محاسبهٔ بالا نشان می‌دهد نیروی گرانشی میان جسم‌های با جرم کوچک قابل ملاحظه نیست.

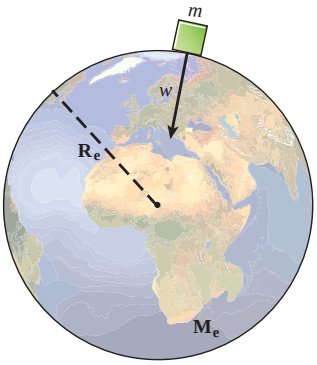
تمرین ۳ـ۲

جرم زمین تقریباً $5/98 \times 10^{24}$kg و شعاع زمین تقریباً $6/37 \times 10^{6}$m است. نیروی گرانشی زمین که به شما وارد می‌شود حدود چند نیوتون است؟ برای محاسبهٔ نیروی گرانشی زمین جرم آن در مرکز زمین فرض می‌شود.

وزن : وزن یک جسم بر روی سطح زمین برابر با نیروی گرانشی است که زمین برجسم وارد می‌کند. معمولاً وزن را با W نشان می‌دهند[1]. اگر جرم جسم را با m، جرم زمین را با M_e و شعاع آن را با R_e نشان دهیم داریم :

$$W = F_{\text{گرانشی}} \quad , \quad F_{\text{گرانشی}} = G\frac{M_e.m}{R_e^2}$$

$$W = G\frac{M_e.m}{R_e^2} \qquad (۳_۳)$$



شکل ۳ــ۴ــ به هر جسمی به جرم m نیروی وزن W از سوی زمین که جرم آن M_e و شعاع آن R_e است، وارد می‌شود.

می‌دانیم نیرو سبب شتاب گرفتن جسم می‌شود. اگر جسمی به جرم m را در نزدیکی سطح زمین رها کنیم، تحت تأثیر نیروی وزن به سمت زمین شتاب می‌گیرد و سقوط می‌کند (شکل ۳ــ۴). بنابراین براساس قانون دوم نیوتون می‌توان نوشت :

$$F = ma \Rightarrow G\frac{M_e.m}{R_e^2} = ma \qquad \Rightarrow a = G\frac{M_e}{R_e^2}$$

معمولاً شتاب سقوط اجسام را با g نشان می‌دهندکه به آن **شتاب گرانی** می‌گویند.

$$g = G\frac{M_e}{R_e^2} \qquad (۴_۳)$$

آن‌گاه رابطهٔ ۳ــ۳ را می‌توانیم با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۴ به‌صورت زیر بنویسیم[2] :

$$W = mg \qquad (۵_۳)$$

مثال ۳ـ۵

با استفاده از مقدارهای داده شده در تمرین ۳ــ۲ مقدار g را به‌دست آورید :

پاسخ :

$$g = G\frac{M_e}{R_e^2} = ۶/۶۷\times۱۰^{-۱۱}\times\frac{۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}}{(۶/۳۷\times۱۰^{۶})^۲} = ۹/۸\,m/s^۲$$

با صرف‌نظر کردن از نیروی مقاومت هوا، همهٔ اجسام در نزدیکی سطح زمین با شتاب ثابت $g = ۹/۸\ m/s^۲$ سقوط می‌کنند.

فعالیت ۳ـ۴

۱ــ تحقیق کنید که ضریب ثابت گرانش عمومی، G، نخستین بار توسط چه کسی اندازه‌گیری شده است. خلاصه‌ای از روش کار او را به کلاس گزارش کنید.

۲ــ شاید برایتان جالب باشد که بدانید حدود ۲۲۰۰ سال پیش شعاع زمین با روش ساده‌ای توسط «اراتوستن» محاسبه شده است. روش کار او را تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

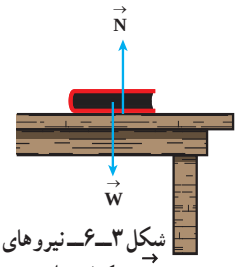
۱ــ اوّل حرف Weight

۲ــ رابطهٔ ۳ــ۴ با فرض چشم‌پوشی از چرخش زمین برقرار است.

نیروی عمودی سطح : جسمی را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۳ــ۵ روی سطح افقی میزی به حال سکون قرار دارد. چه نیروهایی به جسم وارد می‌شود؟ اگر جرم جسم برابر m باشد، نیروی وزن $W = mg$ را زمین به جسم وارد می‌کند و آن را به‌سوی پایین می‌کشد. چرا جسم رو به پایین به حرکت در نمی‌آید؟

شکل ۳ــ۵ــ کتابی روی میز به حالت سکون قرار دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، جسم ساکن و شتاب حرکت آن صفر است ($a = 0$). از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برایند نیروهای وارد بر جسم صفر است ($F = ma = 0$). در نتیجه باید نیرویی برابر وزن جسم اما در خلاف جهت به آن وارد شود تا با خنثی کردن نیروی وزن، مانع شتاب گرفتن جسم شود. با توجه به وضعیت جسم در شکل ۳ــ۵ این نیرو از سطح میز به جسم وارد می‌شود. در شکل ۳ــ۶ نیروهای وارد برجسم نشان داده شده‌اند. نیروی $\vec{N}$ که از طرف میز برجسم وارد می‌شود و بر سطح میز عمود است را «نیروی عمودی سطح» می‌نامیم. برای این شکل با استفاده از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود :



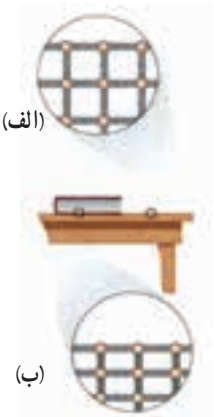
شکل ۳ــ۶ــ نیروهای $\vec{N}$ و $\vec{W}$ بر کتاب وارد می‌شوند.

$$F_{\text{برایند}} = ma = 0$$

$$N - W = 0$$

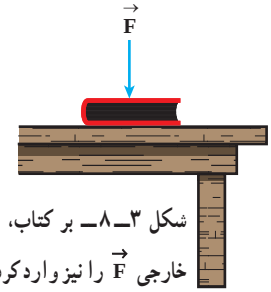
$$N = W$$

نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. برای مثال وقتی جسمی نه چندان سبک را روی سطح اسفنج قرار دهیم تغییر شکل اسفنج به‌خوبی دیده می‌شود. در این حالت اسفنج به جسم نیرو وارد می‌کند. اما وقتی جسم را روی سطحی سخت مانند میز بگذاریم تغییرشکل سطح میز جزئی است و با چشم قابل تشخیص نیست. اگر نیروی بین مولکول‌های سطح میز را با نیروی فنرهایی که مولکول‌ها را به‌هم وصل می‌کند مدل‌سازی کنیم، با قرار گرفتن جسم روی سطح میز مثل آن است که فنرها فشرده یا کشیده می‌شوند (شکل ۳ــ۷) و نیروی برایندی روبه‌بالا به جسم وارد می‌کنند که همان نیروی عمودی سطح است.



شکل ۳ــ۷ــ نیروی بین مولکول‌های سطح میز با فنرهایی شبیه‌سازی شده است. با قرار گرفتن کتاب، فنرها فشرده شده‌اند.

اکنون فرض کنید مطابق شکل ۳ــ۸ نیرویی به اندازهٔ F را به‌طور قائم و رو به پایین بر جسم وارد کنیم. آیا نیروی عمودی سطح، که میز بر جسم وارد می‌کند، تغییر می‌کند؟ با روش مشابه قبل می‌توان به پرسش بالا پاسخ داد.



شکل ۳ــ۸ــ بر کتاب، نیروی خارجی $\vec{F}$ را نیز وارد کرده‌ایم.

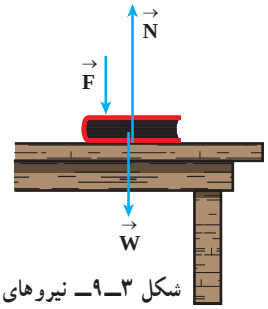
نیروهای وارد بر جسم را در شکل ۳ــ۹ نشان داده‌ایم. چون شتاب جسم صفر است بنابه قانون دوم نیوتون داریم :

$$F_{\text{برایند}} = ma = 0$$

$$N - F - W = 0$$

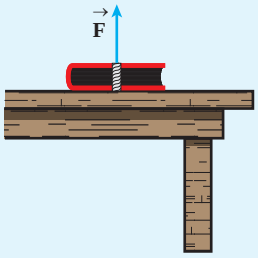
$$N = F + W$$

بنابراین نیروی عمودی تکیه‌گاه، افزایش یافته است.



شکل ۳ــ۹ــ نیروهای وارد بر کتاب در حضور نیروی $\vec{F}$

فعالیت ۳ـ۵



فرض کنید مطابق شکل، طنابی را به دور یک جسم بسته‌ایم و آن را با نیرویی به بزرگی F به سوی بالا می‌کشیم. اگر جسم همچنان بر سطح میز ساکن بماند، نیروی عمودی سطح وارد بر آن را برحسب F و W بنویسید.

همان‌گونه که دیدیم، برای به دست آوردن اندازهٔ نیروی عمودی سطح همواره از قانون دوم نیوتون استفاده می‌شود.

فعالیت ۳ـ۶

روی یک ترازوی فنری بایستید و عددی را که ترازو در حالت‌های زیر نشان می‌دهد بخوانید:

الف) ساکن روی ترازو ایستاده‌اید.

ب) ضمن آنکه روی ترازو ایستاده‌اید با دست میزی را که در کنارتان قرار دارد، به سمت پایین فشار دهید.

پ) با دست میز را به بالا بکشید.

به‌نظر شما ترازوی فنری اندازهٔ چه کمیتی را نشان می‌دهد؟

مثال ۳ـ۶

شخصی به جرم ۵۰kg درون آسانسوری ایستاده است. نیروی عمودی‌ای که کف آسانسور به شخص وارد می‌کند را در حالت‌های زیر محاسبه کنید:

الف) آسانسور ساکن است.

ب) آسانسور با سرعت ثابت به طرف بالا در حرکت است.

پ) آسانسور با شتاب روبه بالای $1m/s^2$ به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.

g را برابر $10m/s^2$ بگیرید.

پاسخ:

الف) آسانسور ساکن و شتاب حرکت صفر است. با توجه به نیروهای وارد بر شخص که در شکل صفحهٔ بعد نشان داده شده است:

$$a = 0$$

$$F_{\text{برایند}} = N - W = 0$$

$$N = W = mg$$

$$N = 50 \times 10 = 500N$$

ب) در این حالت نیز شتاب حرکت صفر است و با محاسبه‌ای مانند حالت الف نتیجه می‌شود که $N = ۵۰۰\ N$ است.

پ) در این حالت شتاب حرکت رو به بالا است و با توجه به قانون دوم نیوتون برایند نیروها نیز روبه بالا خواهد بود.

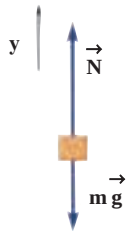
$F_{\text{برایند}} = ma$

$N - W = ma$

$N - ۵۰۰ = ۵۰ \times ۱$

$N = ۵۵۰N$

(الف)



نیروهای وارد به شخص

(ب)

تمرین ۳ـ۳

در مثال ۳ـ۶ فرض کنید آسانسوری که به‌طرف بالا در حرکت است با رسیدن به طبقهٔ موردنظر با شتاب روبه پایین $۲m/s^۲$ از سرعت خود می‌کاهد. در این حالت نیروی عمودی‌ای که کف آسانسور به شخص وارد می‌کند چند نیوتون است؟

نیروی اصطکاک: در تجربه‌های روزانه دیده‌اید که برای به حرکت در آوردن صندوق سنگینی که روی سطح افقی ساکن است باید نیروی بزرگی به آن وارد کنید و اگر نیروی کوچکی به آن وارد کنید صندوق ساکن می‌ماند. بنابراین باید نیرویی در خلاف جهت نیرویی که به صندوق وارد کرده‌اید، به آن وارد شده باشد. این نیرو را نیروی اصطکاک ایستایی می‌نامیم.

جسمی را درنظر بگیرید که آن را با کشیدن یا هُل دادن روی سطح افقی به حرکت درآورده‌اید. اگر دست از کشیدن یا هل دادن جسم بردارید سرعت آن کاهش می‌یابد و پس از مدتی می‌ایستد.

با توجه به اینکه نیرو عامل تغییر سرعت است، باید نیرویی در خلاف جهت حرکت به جسم وارد شده باشد. این نیرو را نیروی اصطکاک جنبشی می‌نامیم. نیروی اصطکاک را در دو حالت بررسی می‌کنیم.

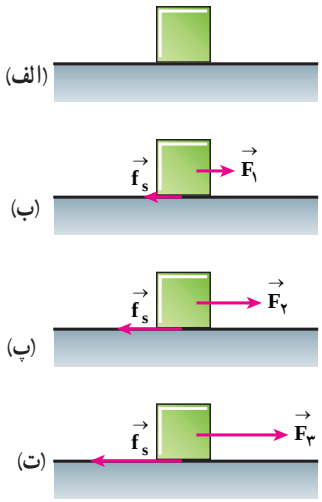
الف) اصطکاک ایستایی: فرض کنید جسمی مطابق شکل ۳ـ۱۰ـ الف روی یک سطح افقی ساکن است. به جسم نیروی افقی $\vec{F}$ را وارد می‌کنیم. در ابتدا اندازهٔ این نیرو را کوچک و برابر $F_۱$ می‌گیریم به‌طوری‌که جسم ساکن بماند (شکل ۳ ـ ۱۰ـ ب)، چون جسم ساکن است بنا به قانون دوم نیوتون باید برایند نیروهای وارد بر آن صفر باشد. بنابراین باید نیرویی افقی مانند $\vec{f_s}$ به جسم وارد شده باشد تا با خنثی کردن اثر نیروی $\vec{F_۱}$، مانع شتاب گرفتن و حرکت جسم شده باشد. نیروی $\vec{f_s}$ از

طرف سطح به جسم وارد می‌شود. به این نیرو، «نیروی اصطکاک ایستایی» می‌گوییم.

$$F_{\text{برایند}} = ma = 0$$

$$F_1 - f_s = 0$$

$$f_s = F_1$$



شکل ۳ــ۱۰ــ با افزایش نیروی پیشران F، f_s افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینهٔ معین برسد.

اکنون فرض کنید اندازهٔ نیروی $\vec{F}_1$ را افزایش داده و به اندازهٔ $\vec{F}_2$ رسانده‌ایم (شکل ۳ــ۱۰ــپ). اگر جسم همچنان ساکن بماند، با استدلالی شبیه قبل نتیجه می‌گیریم که نیروی اصطکاک ایستایی افزایش یافته و برابر اندازهٔ $\vec{F}_2$ شده است. بنابراین با افزایش نیروی $\vec{F}$ نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی $\vec{F}$ به حالتی می‌رسیم که اگر اندازهٔ آن برابر $\vec{F}_3$ شود، جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد. این بدان معناست که اگر اندازهٔ نیروی $\vec{F}$ از مقدار $\vec{F}_3$ اندکی بیشتر شود دیگر جسم ساکن نمی‌ماند و شروع به حرکت می‌کند (شکل ۳ــ۱۰ــت). به نیروی اصطکاک در این حالت «نیروی اصطکاک در آستانهٔ حرکت» می‌گوییم. بزرگی این نیرو برابر با بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی است و آن را با $f_{s,max}$ نشان می‌دهیم. آزمایش نشان می‌دهد که بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی با اندازهٔ نیروی عمودی سطح (N) متناسب است. بنابراین از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که در این حالت، $f_{s,max} = F_3$ است.

$$f_{s,max} = \mu_s N \qquad (۶ــ۳)$$

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

از رابطهٔ ۳ــ۶ نتیجه می‌شود که μ_s کمیتی بدون یکا است. توجه کنید که رابطهٔ ۳ــ۶ فقط در حالتی به‌کار می‌رود که جسم در آستانهٔ حرکت باشد. بنابراین:

$$f_s \le \mu_s N \qquad (۷ــ۳)$$

تمرین ۳ــ۴

اگر درشکل ۳ــ۱۰، بزرگی نیروهای $F_1=2N$، $F_2=4N$، $F_3=6N$ و جرم جسم 1/5 kg باشد، الف) بزرگی نیروهای اصطکاک ایستایی f_s را در هر حالت به‌دست آورید. ب) ضریب اصطکاک ایستایی μ_s را پیدا کنید. ($g=10\,m/s^2$ در نظر بگیرید)

آزمایش ۳ـ۱

وسایل لازم : نیروسنج، دو قطعهٔ چوبی هم جرم به شکل مکعب مستطیل، ترازو

شرح آزمایش :

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

۲ــ نیروسنج را مانند تصویر به مکعب چوبی وصل کنید و سر دیگر نیروسنج را با دست بگیرید و به‌طور افقی بکشید.

۳ــ نیروی دستتان را به آرامی افزایش دهید تا جایی که احساس کنید مکعب چوبی در آستانهٔ لغزیدن قرار گرفته است. در این حالت عددی که نیروسنج نشان می‌دهد، برابر با نیروی اصطکاک در آستانه حرکت است. این عدد را در جدول یادداشت کنید.

۴ــ اکنون مکعب چوبی را از طرف وجه کوچک‌تر روی سطح قرار دهید و آزمایش را تکرار کنید.

۵ــ مکعب دوم را روی مکعب اول قرار دهید و آزمایش را تکرار کنید.

۶ــ با اندازه‌گیری جرم هر قطعه و استفاده از رابطهٔ ۳ــ۶ مقدار μ_s در هر آزمایش را محاسبه و در جدول یادداشت کنید.

شماره آزمایش	وزن قطعه	مساحت سطح تماس قطعه با میز	عددی که نیروسنج نشان می‌دهد ($f_{s,max}$)	μ_s
۱				
۲				
۳				

۷ــ همراه با اعضای گروه خود، نتیجه‌های به‌دست آمده را تفسیر کنید.

شکل ۳ــ۱۱ــ اسکی‌باز بر سطح برف می‌لغزد.

ب) نیروی اصطکاک جنبشی : دیدیم بر جسمی که روی سطحی می‌لغزد (مانند اسکی‌باز شکل ۳ــ۱۱) نیرویی از طرف سطح وارد می‌شود که موازی با سطح و در خلاف جهت لغزش جسم است. این نیرو را که نیروی اصطکاک جنبشی نامیدیم با f_k نشان می‌دهیم.

آزمایش نشان می‌دهد که اندازهٔ نیروی اصطکاک جنبشی متناسب با اندازهٔ نیروی عمودی سطح است. یعنی $f_k \propto N$ است. این نیرو به طور محسوسی به مساحت سطح تماس دو جسم بستگی ندارد. ضریب این تناسب را با μ_k نشان می‌دهند و به آن ضریب اصطکاک جنبشی می‌گویند.

$$f_k = \mu_k N \qquad (۳ــ۸)$$

تجربه و آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک جنبشی مانند ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و ... بستگی دارد. ضریب اصطکاک جنبشی هم مانند ضریب اصطکاک ایستایی کمیتی بدون یکا است. معمولاً ضریب اصطکاک جنبشی میان دو سطح، کمتر از ضریب اصطکاک ایستایی میان آن دو سطح است. یعنی $\mu_k < \mu_s$. جدول ۳ـ۱ برخی از ضریب‌های اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

جدول ۳ـ۱ـ ضریب‌های اصطکاک ایستایی و جنبشی

ماده	μ_k	μ_s
فولاد بر فولاد	۰/۶	۰/۷
فولاد بر سرب	۰/۹	۰/۹
فولاد بر مس	۰/۴	۰/۵
مس بر چدن	۰/۳	۱/۱
مس بر شیشه	۰/۵	۰/۷
چوب اسکی موم اندود شده بر برف در $-۱۰^\circ C$	۰/۲	–
چوب اسکی موم اندود شده برف در $۰^\circ C$	۰/۰۵	–
لاستیک بر بتون	≃ ۱	≃ ۱

فعالیت ۳ـ۷

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوانید :

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

ب) نشان دهید نیروی اصطکاک جنبشی به‌طور محسوسی به مساحت سطح تماس دوجسم بستگی ندارد.

مثال ۳ـ۷

شکل مقابل شخصی را در حال هُل دادن یک کمد ۷۵ کیلوگرمی نشان می‌دهد. نیرویی که شخص به کمد وارد می‌کند افقی و کمد در حال حرکت است. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و کمد ۰/۴ باشد، نیروی اصطکاک جنبشی وارد به کمد چقدر است؟

پاسخ : نیروهای وارد بر کمد در شکل نشان داده شده است. چون جسم در امتداد قائم شتاب ندارد از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برایند نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$$N - W = ۰ \Rightarrow N = W = mg$$

$$\Rightarrow N = ۷۵۰N$$

با استفاده از رابطهٔ ۳ـ۸ داریم :

$$f_k = \mu_k N \Rightarrow f_k = ۰/۴ \times ۷۵۰ \Rightarrow f_k = ۳۰۰\ N$$

مثال ۳ـ ۸

در مثال ۳ــ۷ اگر شخص کمد را با نیروی $F = ۳۳۰N$ هل دهد شتاب حرکت کمد چقدر خواهد شد؟

پاسخ : از قانون دوم نیوتون برای محاسبه شتاب استفاده می کنیم.

برایند نیروهای افقی وارد بر جسم برابر است با :

$$F_{\text{برایند}} = ۳۳۰ - ۳۰۰ = ۳۰N$$

و در نتیجه

$$F_{\text{برایند}} = ma \Rightarrow ۳۰ = ۷۵a$$

$$a = \frac{۳۰}{۷۵} = ۰/۴ m/s^۲$$

نیروی کشسانی فنر : با تأثیر نیرو بر یک فنر آشنا هستید و می دانید که اگر یک سر فنری را به نقطه‌ای محکم کنید و سر دیگر آن را بکشید، طول فنر افزایش می یابد. اگر نیروی وارد بر فنر را افزایش دهید افزایش طول فنر هم بیشتر می‌شود.

آزمایش ۳ـ۲

وسایل لازم : فنر، وزنه‌هایی با جرم‌های متفاوت، خط کش

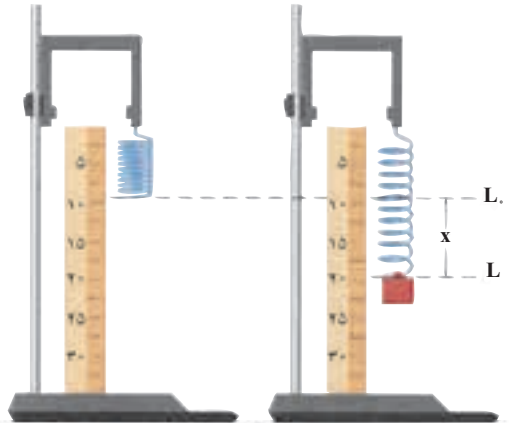
شرح آزمایش :

۱ــ فنر را از یک نقطه بیاویزید و طول آن را اندازه‌گیری کنید.

۲ــ وزنه‌های مختلف را به انتهای فنر بیاویزید و بعد از آنکه دستگاه وزنه ــ فنر به حال سکون درآمد، طول فنر را اندازه بگیرید.

در این حالت نیروی وارد بر فنر هم‌اندازه با وزن جسم آویزان است.

۳ــ جدول زیر را تکمیل و نتیجه آزمایش را در گروه خود تفسیر کنید و به کلاس ارائه دهید.



شماره آزمایش	وزن جسم آویخته به فنر (W)	طول فنر بدون وزنه	طول فنر کشیده شده	تغییر طول فنر (x)	نسبت $\frac{W}{x}$
۱					
۲					
۳					
۴					

آزمایش‌های متعدد مانند آزمایش ۳ـ۲ نشان می‌دهد که تغییر طول فنر تقریباً با اندازهٔ نیروی وارد بر آن متناسب است. اگر اندازهٔ نیروی وارد بر فنر را با نماد F_e و اندازهٔ تغییر طول فنر را با x نشان دهیم، بین آنها رابطهٔ زیر برقرار است :

$$F_e = kx \qquad (۳ـ۹)$$

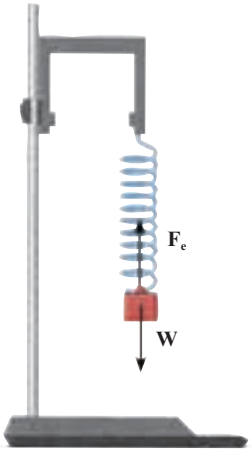
ضریب k در رابطه ۳ـ۹، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است. در رابطهٔ ۳ـ۹ نیرو برحسب نیوتون (N)، x برحسب متر (m) و k بر حسب نیوتون بر متر(N/m) است.

فعالیت ۳ـ۸

دو فنر متفاوت تهیه کنید و مانند آزمایش ۳ـ ۲ ثابت فنرها را به دست آورید. آیا فنری که ثابت آن بیشتر است، سخت‌تر نیز هست؟

مثال ۳ـ۹

ثابت یک فنر ۵۰N/m و طول آن ۱۰cm است. فنر را از یک نقطه می‌آویزیم و به انتهای آن وزنهٔ ۲۰۰ گرمی وصل می‌کنیم. طول فنر چند سانتی‌متر خواهد شد؟



پاسخ :

$$F_{\text{برایند}} = ma$$

$$F_e - W = ۰$$

$$kx = mg$$

$$۵۰x = ۰/۲ \times ۱۰$$

$$x = ۰/۰۴m = ۴cm$$

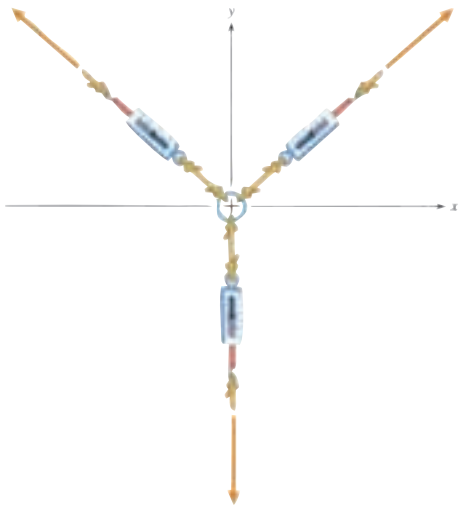
$$x = L - L_۰ \Rightarrow ۴ = L - ۱۰ \Rightarrow L = ۱۴cm$$

گفتیم نیرو کمیتی برداری است. با اجرای آزمایش ۳ـ۳ می‌توانید بررسی کنید که آیا نیرو از جمع برداری پیروی می‌کند یا نه؟

آزمایش ۳ـ۳

وسایل لازم : سه عدد نیروسنج، یک حلقه، چند برگ کاغذ سفید

شرح آزمایش :



۱ــ حلقه را روی صفحهٔ کاغذ قرار دهید و نیروسنج‌ها را مطابق شکل به حلقه وصل کنید.

۲ــ سه نفر از اعضای گروه، هرکدام یکی از نیروسنج‌ها را به‌گونه‌ای بکشند که حلقه ساکن باشد. در این حالت اندازه نیروها را بخوانید و جهت نیروها را روی کاغذ مشخص کنید.

۳ــ با مقیاس مناسب برای اندازهٔ نیروها و درنظر گرفتن جهت آنها، نیروها را روی صفحهٔ کاغذ رسم کنید.

۴ــ با به‌کار بردن روش متوازی‌الاضلاع در جمع بردارها، برایند دوتا از نیروها را رسم کنید و نشان دهید که بردار برایند هم اندازه با بردار سوم و در خلاف جهت آن است.

۳ــ۴ استفاده از قانون‌های نیوتون دربارهٔ حرکت

در این کتاب از آنچه در مورد قانون‌های نیوتون و معرفی نیروها یاد گرفتیم برای حل مسئله‌هایی استفاده می‌کنیم که در آنها نیروهای وارد بر جسم در یک راستا و یا بر یکدیگر عمود باشند. برای این منظور، به‌طور معمول مرحله‌های زیر را طی می‌کنیم.

۱ــ با مشخص کردن جسم موردنظر شکل ساده‌ای از آن را رسم می‌کنیم.

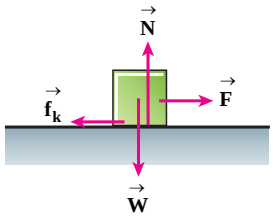
۲ــ نیروهای وارد بر جسم از طرف اجسام دیگر را مشخص و رسم می‌کنیم. (در این کتاب، این نیروها فقط در راستاهای افقی و قائم هستند.)

۳ــ در صورت لزوم نیروهایی مانند وزن، اصطکاک، کشسانی فنر و ... را محاسبه می‌کنیم.

۴ــ قانون دوم نیوتون ($\vec{F}_{\text{برایند}} = m\vec{a}$) را بنا به نیاز در راستای قائم و سپس افقی به‌کار می‌بریم.

مثال ۳ـ۱۰

در شکل روبه‌رو، کارگری سورتمهٔ حاوی بار را با نیروی افقی ۲۷۰N می‌کشد. اگر جرم سورتمه و بار آن ۱۰۰kg و ضریب اصطکاک جنبشی بین سورتمه و سطح ۰/۲۵ باشد، شتاب حرکت سورتمه را حساب کنید. (g = ۱۰ N/kg)



پاسخ : در شکل روبه‌رو، نیروهای وارد بر جسم نشان داده شده است.

شتاب جسم در راستای قائم صفر و جسم در این راستا حرکت نمی‌کند.

بنابراین :

$N-W=۰ \Rightarrow N=W=mg \Rightarrow N=۱۰۰۰N$

$f_k=\mu_k N=۰/۲۵\times ۱۰۰۰ \Rightarrow f_k=۲۵۰N$

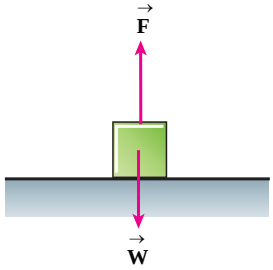
قانون دوم نیوتون را برای نیروهای وارد بر جسم در راستای افقی به‌کار می‌بریم :

$F_{برایند}=ma \Rightarrow F-f_k=ma \Rightarrow ۲۷۰-۲۵۰=۱۰۰a \Rightarrow a=۰/۲\ m/s^۲$

مثال ۳ـ۱۱

جسمی به جرم ۲kg روی سطحی به حال سکون است. طناب سبکی به جسم می‌بندیم و طناب را با نیروی ۲۵N به‌طور قائم بالا می‌کشیم. شتاب حرکت جسم چقدر می‌شود؟

پاسخ : به جسم در ضمن حرکت دو نیرو وارد می‌شود. یکی نیروی وزن و دیگری نیروی کشش طناب که برابر نیروی دست بر طناب است.



$F_{برایند}=ma$

$F-W=ma$

$۲۵-۲۰=۲a$

$a=۲/۵\ m/s^۲$

مثال ۳ـ۱۲

جسمی به جرم ۴kg روی سطح افقی با نیروی افقی ۱۰/۸N کشیده می‌شود. سرعت جسم در مدت ۵s با شتاب ثابت از ۴m/s به ۱۰m/s می‌رسد. نیروی اصطکاک جنبشی در مقابل حرکت جسم و ضریب اصطکاک جنبشی بین جسم و سطح را حساب کنید. (g=۱۰N/kg)

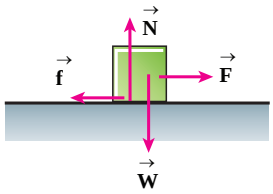
پاسخ : چون جسم با شتاب ثابت روی خط راست حرکت می‌کند، از رابطهٔ ۲ـ۷ استفاده و شتاب حرکت را محاسبه می‌کنیم.

$v=at+v_۰$

$۱۰=a\times ۵+۴$

$۵a=۶ \Rightarrow a=۱/۲m/s^۲$

نیروهای وارد برجسم در شکل نشان داده شده است.



$N=W=۴۰N$

آنگاه از قانون دوم نیوتون خواهیم داشت :

$F_{برایند}=ma$

$F-f_k=ma$

$۱۰/۸-f_k=۴\times ۱/۲ \Rightarrow f_k=۶N$

$f_k=\mu_k N \Rightarrow \mu_k=\frac{f_k}{N} \Rightarrow \mu_k=\frac{۶}{۴۰}=۰/۱۵$

بنوموسی

بنوموسی، سه برادر به نام‌های محمد، احمد و حسن فرزندان موسی‌بن شاکر خوارزمی از برجسته‌ترین دانشمندان و مهندسان ایرانی قرن سوم هجری بودند. این سه برادر در فعالیت‌های علمی با یکدیگر همکاری داشتند و عمدهٔ شهرت آنها به سبب فعالیت‌های علمی آنان است. بنوموسی در تلاش برای دستیابی به علوم، اشخاصی را با هزینهٔ شخصی به سرزمین روم می‌فرستادند و مترجمان را با دادن عطایا و بخشش‌های گزاف به مرکز خلافت جلب می‌کردند. محمد خود به آسیای صغیر سفر می‌کرد تا نسخه‌های کتب را خریداری کند. در حقیقت بنوموسی به‌طور مستقل، و نه به دستور خلفا، به جمع‌آوری کتب علمی و فلسفی و ترجمهٔ آنها مشغول بودند. با توجه به دانش و مهارت بنوموسی در علوم مختلف بسیاری از امور ساخت و مهندسی به ایشان سپرده می‌شد که از آن میان می‌توان به حفر برخی از نهرهای بزرگ چون نهر جعفریه و نهر عمودبن منجم در نزدیکی بصره اشاره کرد. آثار متعددی توسط برادران بنوموسی نوشته شده است که کتاب الحیل از مهم‌ترین آنهاست که خوشبختانه هنوز هم باقی مانده است. علم الحیل را می‌توان همان مهندسی مکانیک امروزی خواند. این کتاب در ۶ فصل از ابزارها و دستگاه‌های مکانیکی و هیدرولیکی همچون چگالی‌سنج، فوارهٔ توربینی، دستگاه خون‌گیری، دستگاه‌های بالابر آب و... سخن می‌گوید. تاریخ‌نویسان داخلی و خارجی در ستایش این کتاب بسیار سخن گفته‌اند.

در سال ۱۳۴۰ هـ .ش هاوزر در کتاب جداگانه‌ای به شرح و بررسی کتاب الحیل پرداخت. این کتاب در سال ۱۳۸۵ هـ.ش به انگلیسی ترجمه شد و در مقدمهٔ کتاب اسامی به‌کار رفته در دستگاه‌های بنوموسی همراه با شکل‌های توصیفی نیز آمده است. از دیگر کتاب‌های بنوموسی که هنوز موجودند می‌توان به کتاب‌های معرفة مساحة الاشکال البسیطه و الکرّیّه در هندسه، رؤیة الهلال و الدرجات فی طبایع البروج در نجوم اشاره کرد.

پرسش‌های فصل سوم

۱ کمربند نجات در خودرو چگونه در جاده‌ها، سرنشینان خودرو را از وارد شدن صدمه‌های احتمالی حفظ می‌کند؟

۲ در فیلمی علمی ـ تخیلی، موتور یک کشتی فضایی که در فضای خلأ خارج از جوّ زمین و دور از هر سیاره‌ای در حرکت است، از کار می‌افتد. در نتیجه کشتی فضایی کُند شده و می‌ایستد. آیا این تصویری صحیح از واقعیت است؟ قانون اول نیوتون دربارهٔ این رویداد چه می‌گوید؟

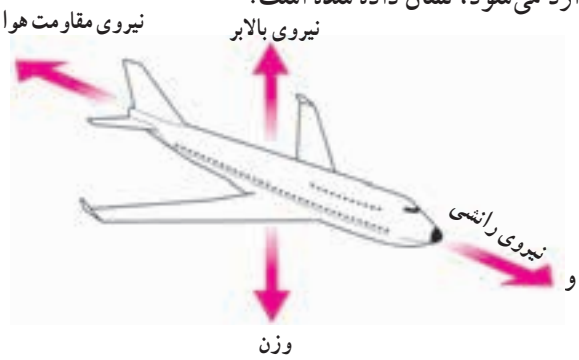
۳ در هر یک از موردهای زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش، هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟

الف) سیاره زهره در حال گردش به دور خورشید

ب) توپی که به دیوار برخورد می‌کند.

پ) قایقی ساکن بر آب یک دریاچه

۴ در شکل روبه‌رو چهار نیرویی که به یک هواپیمای در حال پرواز وارد می‌شود، نشان داده شده است. بزرگی این نیروها را در موقعیت‌های زیر بیان کنید.



الف) هواپیما در یک تراز پروازی است و با سرعت ثابت پرواز می‌کند.

ب) هواپیما شتاب رو به‌جلو و رو به بالا دارد.

پ) هواپیما شتاب رو به عقب و رو به پایین دارد.

۵ در هریک از موردهای زیر، شکل ساده‌ای از جسم را رسم کنید و نیروهای وارد بر آن را نشان دهید :

الف) جسمی که در هوا در حال سقوط است.

ب) جسمی که برروی سطح افقی دارای اصطکاک در حال حرکت است.

پ) چراغی که از یک سقف آویزان است.

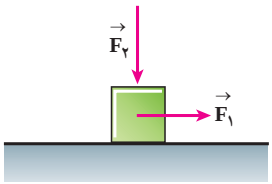
۶ آیا ممکن است که یک جسم در نزدیکی زمین با شتابی بزرگ‌تر از g رو به پایین حرکت کند؟ توضیح دهید.

۷ فرض کنید فضانوردی روی یک سیاره فرود آید که در آن $g = ۱۹/۶ m/s^۲$ است. آیا قدم زدن روی این سیاره در مقایسه با زمین ساده‌تر است یا سخت‌تر؟

۸ نیروی قائم $\vec{F}$ بر قطعه‌ای به جرم m که روی زمین قرار دارد، وارد می‌شود. اگر بزرگی نیروی $\vec{F}$ از صفر افزایش یابد، در هر یک از موارد زیر نیروی عمودی سطح ($\vec{N}$) چگونه تغییر می‌کند؟

الف) $\vec{F}$ رو به پایین باشد.

ب) $\vec{F}$ رو به بالا باشد.



۹ در شکل روبه‌رو، نیروی $\vec{F}_۱$ به بزرگی ۱۰N بر جعبه‌ای واقع بر کف زمین وارد می‌شود. ولی جعبه نمی‌لغزد. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم $\vec{F}_۲$ که جعبه را به سطح زمین می‌فشارد از صفر شروع به افزایش کند، الف) کمیت‌های زیر افزایش می‌یابند یا کاهش یا بدون تغییر می‌مانند؟

I) بزرگی نیروی اصطکاک ایستایی f_s وارد بر جعبه

II) بزرگی نیروی عمودی سطح N وارد بر جعبه

III) مقدار بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه

ب) آیا جعبه سرانجام خواهد لغزید؟

مسائل فصل سوم

۱ دونده‌ای به جرم ۶۰kg با شتاب $5m/s^2$ شروع به دویدن می‌کند و ۲ ثانیه با این شتاب می‌دود.
الف) اندازهٔ نیرویی که این شتاب را به دونده می‌دهد، محاسبه کنید و توضیح دهید که این نیرو از سوی چه جسمی به دونده وارد می‌شود؟
ب) واکنش نیرویی را که در قسمت (الف) محاسبه کرده‌اید، به چه جسمی وارد می‌شود؟

۲ دو جسم به جرم‌های m_1 و m_2 که روی یک سطح افقی به حال سکون قرار دارند ، تحت تأثیر نیروهایی یکسان شروع به حرکت می‌کنند. اگر بعد از گذشت زمان t، سرعت آنها به‌ترتیب برابر v_1 و v_2 شود، نسبت $\frac{v_2}{v_1}$ را محاسبه کنید.

۳ خودرویی به جرم ۲ تن از حال سکون روی جاده‌ای افقی شروع به حرکت می‌کند و بعد از پیمودن مسافت ۱۰۰m با شتاب ثابت، سرعتش به ۲۰m/s می‌رسد. برایند نیروهای وارد بر خودرو را در این حرکت محاسبه کنید.

۴ خودرویی به جرم ۹۰۰kg در جاده‌ای افقی و مستقیم شروع به حرکت می‌کند و پس از ۸s به‌سرعت ۱۲m/s می‌رسد.
الف) برایند نیروهای وارد بر خودرو در این مدت چقدر است؟
ب) نیروی رو به جلو که به خودرو وارد می‌شود را در صورتی که نیروهای مقاوم در مقابل حرکت خودرو ۴۵۰N باشد، محاسبه کنید.

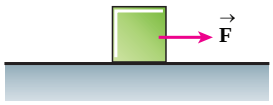
۵ خودرویی به جرم ۱۲۰۰kg با سرعت ۷۲km/h روی جاده‌ای افقی و مستقیم در حرکت است. در یک لحظه راننده ترمز می‌گیرد و خودرو پس از پیمودن مسافت ۱۰۰m می‌ایستد.
الف) شتاب حرکت خودرو پس از ترمز چقدر است؟
ب) نیروی اصطکاک وارد بر خودرو را محاسبه کنید.

۶ در چه ارتفاعی از سطح زمین نیروی گرانشی ۱۰٪ کاهش می‌یابد؟ شعاع زمین را ۶۳۷۰km فرض کنید.

۷ الف) نیروی گرانشی را که زمین بر ماه وارد می‌کند، محاسبه کنید.
ب) نیروی گرانشی ماه بر زمین چقدر است؟
(جرم زمین $6 \times 10^{24}kg$، جرم ماه $7/4 \times 10^{22}kg$، فاصلهٔ ماه از زمین 4×10^5km و $G = 6/7 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$ درنظر بگیرید.)

۸ در سه آزمایش، سه نیروی افقی متفاوت بر قطعه‌ای که بر سطح تختی قرار گرفته است، وارد می‌شود. بزرگی این نیروها عبارتند از $F_1 = 4N$، $F_2 = 8N$ و $F_3 = 12N$. در هر آزمایش، قطعه به رغم نیروی وارد برآن ساکن باقی می‌ماند.
الف) نیروی اصطکاک ایستایی f_s وارد از سطح بر قطعه در هر حالت چقدر است؟
ب) در مورد مقدار بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی چه می‌توان گفت؟

۹ جسمی را با سرعت افقی ۱۰m/s روی سطح افقی پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین جسم و سطح برابر ۰/۲ است.
الف) جسم پس از پیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟
ب) اگر جسم دیگری که جرم و سرعت آن به‌ترتیب دو برابر جرم و سرعت جسم اول و ضریب اصطکاکش با سطح همان ضریب اصطکاک قبلی است، روی همان سطح پرتاب شود، شتاب و مسافت پیموده شده آن چند برابر می‌شود؟



۱۰ جسمی به جرم ۵kg روی یک سطح افقی به حال سکون قرار دارد . به جسم نیروی افقی F را وارد می‌کنیم.

الف) به ازای F = ۱۵N جسم ساکن می‌ماند. نیروی اصطکاک وارد بر آن چقدر است؟

ب) به‌ازای F = ۲۰N جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد و با ضربهٔ افقی بسیار کوچکی شروع به حرکت می‌کند و پس از ۸s مسافت ۳۲m را می‌پیماید. ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را محاسبه کنید.

۱۱ می‌خواهیم به جسمی که جرم آن ۵kg است، شتاب $۲m/s^۲$ بدهیم. نیرویی را که باید به آن وارد کنیم در هر یک از حالت‌های زیر محاسبه کنید :

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.

ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک ۰/۲ به طرف راست حرکت می‌کند، و شتابش نیز به طرف راست است.

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

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

۱۲ وزنه‌ای به جرم ۲kg را به انتهای فنری به طول ۱۲cm که ثابت آن ۲۰N/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 ۲m/s رو به پایین در حرکت است.

پ) آسانسور با شتاب ثابت و روبه پایین $۲m/s^۲$ از حال سکون رو به پایین شروع به‌حرکت کند.

ت) آسانسور با شتاب ثابت و روبه بالای $۲m/s^۲$ از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۱۳ برای یک راننده دانستن مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد کلّ مسافت توقف، دو قسمت دارد.

الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را نام ببرید.

ب) دو عامل مؤثر در مسافت ترمز را نام ببرید.

پ) زمان واکنش راننده‌ای ۰/۶s است. در طی این زمان، خودرو ۲۴m طی می‌کند. سرعت خودرو را حساب کنید.

ت) با این سرعت راننده ترمز می‌کند و خودرو پس از ۱۰s متوقف می‌شود. شتاب کاهندهٔ خودرو را حساب کنید.

ث) وقتی خودرو ترمز کند، برایند نیروهای وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را ۱ تُن فرض کنید.

۴

کار و انرژی

تخت جمشید ـ شمال شیراز

بیش از ۲۵۰۰ سال پیش، ایرانیان با ذوق و سخت‌کوشی تمدنی را برپا کردند که بخشی از آثار به جای ماندهٔ آن را در این تصویر می‌بینید. این مکان به دروازهٔ همهٔ کشورها معروف است.

هنگامی که فعالیت‌های یک روز خود را در نظر می‌گیرید، مشاهده می‌کنید که اعمال متفاوتی انجام می‌دهید راه می‌روید، از پله بالا می‌روید، می‌نویسید و کیف خود را حمل می‌کنید. برای انجام این فعالیت‌ها به انرژی نیاز دارید که توسط مواد غذایی تأمین می‌شود. افراد دیگر نیز به همین ترتیب فعالیت‌های گوناگون دارند. بسیاری از این فعالیت‌ها، توسط وسیله‌هایی چون اتومبیل، جرثقیل و ... انجام می‌شوند. این وسیله‌ها از انرژی الکتریکی، شیمیایی و یا ... استفاده می‌کنند. در کتاب فیزیک(۱) و آزمایشگاه تا حدی با مفهوم انرژی و نوع‌های مختلف آن و تبدیل انرژی‌ها به یکدیگر آشنا شدید. در این فصل با مفهوم کار در فیزیک، انرژی مکانیکی و توان آشنا می‌شوید و تعریف دقیق‌تری از نوع‌های مختلف انرژی پتانسیل ارائه می‌شود.

۴ــ۱ کار

همه‌روزه با افرادی مواجه هستیم که در حال انجام فعالیت‌های متفاوتی هستند. نجّار را می‌بینیم که درحال اره و یا رنده کردن است. در فعالیت‌های ساختمانی کارگران مصالح ساختمانی را از محلی به محل دیگر حمل می‌کنند و ... البته بعضی از فعالیت‌ها نیز توسط ماشین‌های مخصوص انجام می‌شوند.

در شکل ۴ــ۱ دو نمونه از این فعالیت‌ها نشان داده شده‌اند. آیا شما نیز می‌توانید تعدادی از این فعالیت‌ها را نام ببرید؟

در بسیاری از فعالیت‌هایی که انجام می‌شوند :

الف) به اجسام نیرو وارد می‌شود. ب) آنها جابه‌جا می‌شوند.

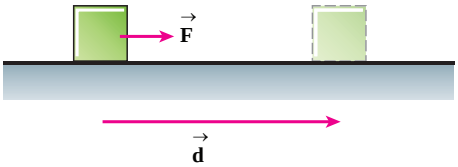
به‌عنوان مثال، در شکل ۴ــ۱ــ الف پسر به جعبه نیرویی به سمت بالا وارد می‌کند و آن را بالا می‌برد. در شکل ۴ــ۱ــ ب مادری به کالسکه نیرو وارد می‌کند و آن را به جلو می‌راند. کار در فیزیک را برای مثال‌هایی که در آنها بر جسم نیرو وارد می‌شود و جسم در جهت نیرو جابه‌جا می‌شود، به‌صورت حاصل‌ضرب نیرو در جابه‌جایی تعریف می‌کنیم. یعنی، اگر مطابق شکل ۴ــ۲ به جسم نیرویی به اندازهٔ F وارد و آن را به اندازهٔ d جابه‌جا کنیم، طبق تعریف، کار نیروی ثابت F، با رابطهٔ زیر داده می‌شود.

(الف)

(ب)

شکل ۴ــ۱ــ شخص با وارد کردن نیرو به جسم و جابه‌جا کردن آن، کار انجام می‌دهد.

$$W_F = Fd \qquad (۱ــ۴)$$



شکل ۴ــ۲ــ بر جسم نیروی $\vec{F}$ وارد می‌شود و جسم هم‌سو با نیرو به اندازهٔ d جابه‌جا می‌شود.

کار یک کمیت نرده‌ای است و یکای آن N.m است که ژول نامیده می‌شود. این یکا را با نماد J نمایش می‌دهیم. همان‌طور که در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم یکای انرژی و گرما نیز ژول است.

مثال ۴ـ۱

در شکل ۴ـ۱ـ ب اگر شخص نیرویی افقی برابر ۴N را به کالسکه وارد و آن را به اندازهٔ ۱۰m جابه‌جا کند، چه مقدار کار انجام می‌دهد؟

پاسخ : بر طبق رابطهٔ ۴ـ۱ داریم :

$$W = Fd$$

$$W = ۴\times۱۰=۴۰J$$

مثال ۴ـ۲

مطابق شکل ۴ـ۱ـ الف اگر شخصی نیرویی برابر ۳۰ نیوتون را به جسم اعمال کند و آن را به اندازهٔ ۰/۵ متر بالا ببرد چه مقدار کار انجام می‌دهد؟

پاسخ :

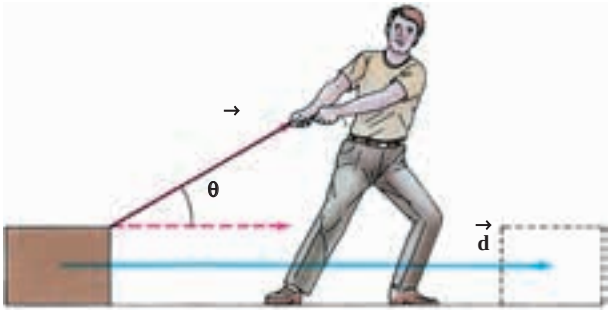
$$W = Fd$$

$$W=۳۰\times۰/۵ =۱۵J$$

در شکل ۴ـ۳ نیرویی که مرد بر جعبه وارد می‌کند، با جابه‌جایی جعبه زاویهٔ θ می سازد. در چنین مواردی برای تعیین کار نیروی ثابت $\vec{F}$ در جابه‌جایی $\vec{d}$ از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم :

$$W_F = Fd\cos\theta \qquad (۴ـ۲)$$

اگر در این رابطه θ=۰ باشد، رابطهٔ ۴ـ۱ به‌دست می‌آید.



شکل ۴ـ۳ ـ مرد با نیروی F که با راستای افق زاویهٔ θ می‌سازد، جعبه را به اندازهٔ d جابه‌جا می کند.

مثال ۴ـ۳

در شکل ۴ـ۳ اگر نیرویی که مرد بر جعبه وارد می‌کند ۵۰N و زاویهٔ آن با جابه‌جایی ۶۰° باشد. کار نیروی مرد را در ۳ متر جابه‌جایی حساب کنید.

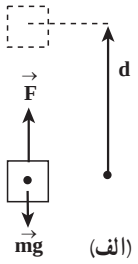
پاسخ : بر طبق رابطهٔ ۴ـ۲ داریم :

$$W_F=Fd\cos\theta$$

$$W_F = ۵۰\times۳\times\cos۶۰^\circ=۷۵J$$

در مواردی که بیش از یک نیرو به جسم وارد می‌شود، می‌توان کار هریک از نیروها را از رابطهٔ ۴ـ۲ به‌دست آورد.

مثال ۴ـ۴



(الف)

جسمی به جرم m را با نیروی ثابت F مطابق شکل الف به اندازهٔ d بالا می‌بریم.

الف) کار نیروی وزن در این‌جابه‌جایی چقدر است؟

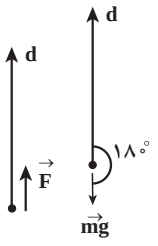
ب) کار نیروی F در این جابه‌جایی چقدر است؟

پاسخ : الف) در این حالت زاویهٔ بین نیروی وزن و بردار جابه‌جایی ۱۸۰° است (شکل ب).

در نتیجه، بر طبق رابطهٔ ۴ـ۲ داریم :

$$W_{mg}=mgd\cos ۱۸۰^\circ$$

$$=-mgd$$



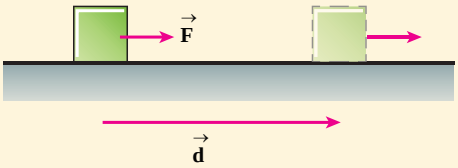
(ب)

ب) زاویهٔ نیروی F و جابه‌جایی، صفر است (شکل ب) درنتیجه داریم :

$$W_F = Fd\cos ۰^\circ$$

$$= Fd$$

تمرین ۴ـ۱



در شکل روبه‌رو نیروی ثابت $\vec{F}$ در امتداد افق به جسمی به جرم m وارد می‌شود و آن را در روی سطحی با ضریب اصطکاک جنبشی μ_k جابه‌جا می‌کند. مطلوبست :

الف) کار نیروی F .

ب) کار نیروی اصطکاک جنبشی.

پ) کار نیروی عمودی تکیه‌گاه.

ت) کار نیروی وزن.

مثال ۴ـ۵

در طول مدتی که وزنه‌بردار وزنه را بالای سر خود نگه می‌دارد :

الف) کار نیروی دست او بر روی وزنه چقدر است؟

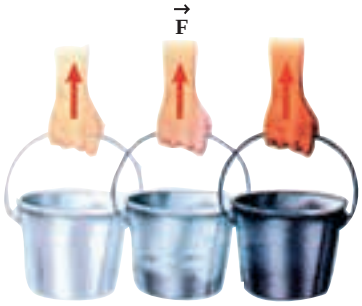
ب) آیا او در این مدت انرژی مصرف می‌کرد؟ توضیح دهید.

پاسخ : الف) در این حالت وزنه‌بردار برای نگهداشتن وزنه، نیرویی برابر با وزن آن به آن وارد می‌کند. ولی چون جابه‌جایی صفر است، کار او برابر است با :

$$W = Fd = mg \times ۰ = ۰J$$

ب) وزنه‌بردار در این مدت انرژی مصرف می‌کند و انرژی مصرف‌شده او در نهایت به‌صورت گرما به محیط بیرون داده می‌شود.

مثال ۴ـ۶



شخصی با سرعت ثابت در حال حرکت است و سطل آبی به جرم m رامطابق شکل روبه‌رو حمل و به اندازهٔ d جابه‌جا می‌کند. کار نیروی دست در این جابه‌جایی چقدر است؟

پاسخ : شخص برای اینکه سطل را نگه دارد، باید نیرویی برابر با وزن سطل رو به بالا به آن وارد کند. چون سطل با سرعت ثابت حرکت می‌کند، شخص نیرویی در جهت افقی به آن وارد نمی‌کند. زاویهٔ بین نیرو و جابه‌جایی ۹۰° است، درنتیجه :

$$W = Fd\cos\theta = mgd\cos ۹۰^\circ = ۰J$$

مثال‌های ۴ـ۵ و ۴ـ۶ نشان می‌دهند کاری که در فیزیک تعریف می‌شود با مفهوم کاری که در گفت‌وگوهای روزمره خود استفاده می‌کنیم، تفاوت دارد.

۴ـ۲ رابطهٔ کار و انرژی جنبشی

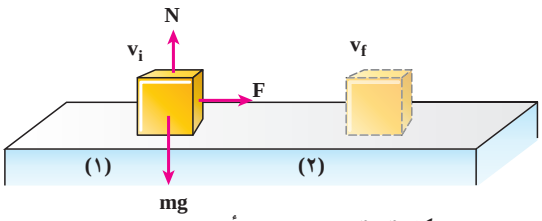
در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم که انرژی جنبشی جسمی به جرم m و سرعت v با رابطهٔ

$$K = \frac{۱}{۲}mv^۲ \qquad (۴ـ۳)$$

داده می‌شود. سرعت توپی که در امتداد قائم به هوا پرتاب شده باشد، رفته رفته کاهش می یابد و درنتیجه انرژی جنبشی توپ نیز کم می‌شود. اینک فرض کنید توپ را ازحال سکون از یک بلندی رها کنیم، سرعت و درنتیجه انرژی جنبشی توپ به تدریج افزایش می‌یابد. اکنون توپی را درنظر بگیرید که به دیواری برخورد کند و برگردد، در این برخورد ابتدا سرعت و انرژی جنبشی آن کاهش و سپس افزایش می‌یابد. روزانه شاهد تغییر انرژی جنبشی اجسام در محیط اطراف خود هستیم. مثلاً انرژی جنبشی اتومبیلی که ترمز کرده است، کاهش می‌یابد و ....

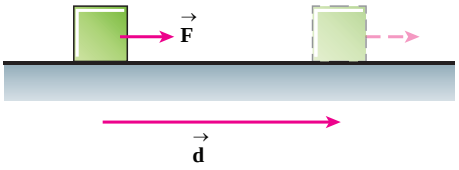
فعالیت ۴ـ۱

در هریک از مثال‌های بالا الف) نیروهای وارد بر جسم را تعیین کنید. ب) علامت کار هر نیرو را مشخص کنید.



شکل ۴ـ۴ـ جسم تحت تأثیر نیروی ثابت F، از سرعت اولیهٔ V_i به سرعت نهایی V_f می‌رسد.

در مثال‌های بالا هریک از نیروهای وارد بر جسم کار انجام می‌دهند و این کارها سبب تغییر انرژی جنبشی جسم می‌شود. برای توضیح این موضوع مثال زیر را در نظر می‌گیریم، جسمی به جرم m مطابق شکل ۴ـ۴ روی سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارد. این جسم تحت تأثیر نیروی ثابت F به اندازهٔ d روی سطح جابه‌جا می‌شود. کار نیروی عمودی سطح و وزن در این جابه جایی صفر است.



کار نیروی F با رابطهٔ زیر داده می‌شود :

$$W = Fd$$

چون F مساوی برایند نیروهای وارد بر جسم است، داریم :

$$F = ma$$

در اثر اعمال نیروی F سرعت جسم از مقدار v_i در نقطهٔ (۱) به مقدار v_f در نقطهٔ (۲) تغییر می‌کند.

با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۴ داریم :

$$v_f^2 - v_i^2 = 2ad$$

اگر از این رابطه a را به‌دست آوریم و در رابطهٔ ۳ــ۱ قرار دهیم، خواهیم داشت :

$$F = m\frac{v_f^2 - v_i^2}{2d} \qquad (۴ــ۴)$$

با قرار دادن این رابطه در رابطهٔ ۴ــ۱ رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$W = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 \qquad (۵ــ۴)$$

جملهٔ اول طرف راست در این رابطه انرژی جنبشی جسم در نقطهٔ (۲) و جمله دوم، انرژی جنبشی جسم در نقطهٔ (۱) است.

درنتیجه اگر این دو انرژی جنبشی را به‌ترتیب با K_f و K_i نشان دهیم، رابطهٔ (۴ــ ۵) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

$$W = K_f - K_i \qquad (۶ــ۴)$$

در این مثال خاص دیدیم که فقط کار یک نیرو غیرصفر بود. در مثال‌های دیگر اگر کار بیش از یک نیرو غیر صفر باشد، سمت چپ رابطهٔ ۴ــ۶، مجموع آن کارها خواهد بود.

رابطهٔ ۴ــ۶ قضیه کار و انرژی نامیده می‌شود. برطبق این قضیه، مجموع کارهای نیروهای وارد بر هر جسم در یک جابه‌جایی برابر با تغییر انرژی جنبشی جسم در آن جابه‌جایی است.

اگر مجموع کارها مثبت باشد، $K_f > K_i$ است و انرژی جنبشی جسم افزایش می‌یابد و اگرمجموع کارها منفی باشد، $K_f < K_i$ است و انرژی جنبشی جسم کاهش می‌یابد و به همین ترتیب اگر مجموع کارها صفر باشد، $K_f = K_i$ است و انرژی جنبشی جسم تغییر نمی‌کند.

فعالیت ۴ــ۲

با توجه به نکات فوق علّت افزایش و یا کاهش انرژی جنبشی اجسام را در مثال‌هایی که در ابتدای این بخش ذکر شدند توضیح دهید.

مثال ۴ـ۷

چتربازی از ارتفاع ۸۰۰ متری از حال سکون رها می‌شود. جرم چترباز به همراه چترش ۸۰kg است. اگر او با سرعت ۵m/s به زمین برسد، به کمک قضیه کار و انرژی کار نیروی مقاومت هوا در مسیر سقوط را به‌دست آورید. (شتاب گرانش را $۱۰m/s^۲$ فرض کنید).

پاسخ : دراین مثال، بر چترباز دو نیروی وزن و مقاومت هوا وارد می‌شود. با استفاده از قضیهٔ کار و انرژی داریم :

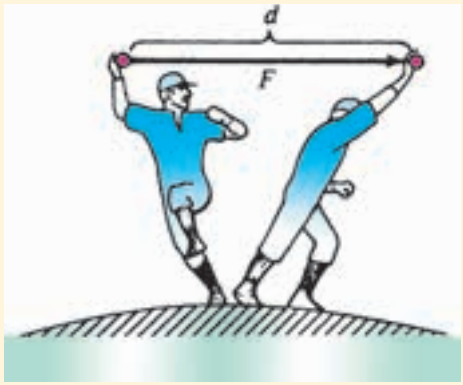
$$W_{\text{وزن}} + W_{\text{مقاومت هوا}} = K_f - K_i$$

$$mgh\cos ۰^\circ + W_{\text{مقاومت هوا}} = \frac{۱}{۲}mv_f^۲ - \frac{۱}{۲}mv_i^۲$$

$$۸۰\times ۱۰\times ۸۰۰\times ۱ + W_{\text{مقاومت هوا}} = \frac{۱}{۲}\times ۸۰\times ۵^۲ - ۰$$

$$۶۴۰۰۰۰ + W_{\text{مقاومت هوا}} = ۱۰۰۰ \Rightarrow W_{\text{مقاومت هوا}} = -۶۳۹۰۰۰\,J$$

تمرین ۴ـ۲



ورزشکاری مطابق شکل، بدن و دست خود را طوری حرکت می‌دهد تا توپ را با بیشترین سرعت پرتاب کند، اگر جرم توپ ۰/۵ kg باشد و ورزشکار نیروی تقریباً ثابت ۲۰۰N را در فاصلهٔ ۲/۵ m جابه‌جایی توپ بر آن وارد کند، توپ با چه سرعتی پرتاب می‌شود؟

مثال ۴ـ۸

خودرویی به جرم ۱۲۰۰kg با سرعت ۷۲km/h در حرکت است. اگر راننده ترمز کند، خودرو پس از طی مسافتی می‌ایستد. کار نیروی اصطکاک را از لحظهٔ ترمز تا توقف کامل خودرو به‌دست آورید.

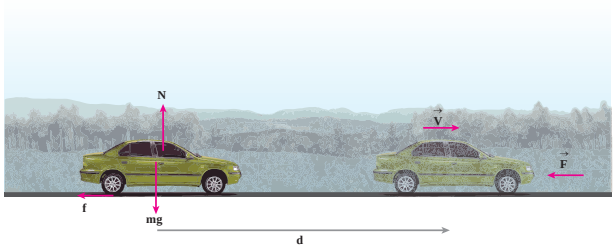
پاسخ : سرعت خودرو قبل از ترمز کردن برابر است با :

$$v_i = \frac{۷۲\times ۱۰۰۰}{۳۶۰۰} = ۲۰\,m/s$$

درنتیجه، انرژی جنبشی آن قبل از ترمزکردن برابر است با :

$$K_i = \frac{۱}{۲}mv_i^۲ = \frac{۱}{۲}\times ۱۲۰۰\times ۲۰^۲ = ۲۴۰۰۰۰J$$

همچنین $K_f = ۰J$ است.



از طرف دیگر، نیروی اصطکاک ، نیروی عمودی سطح و نیروی وزن نیروهایی هستند که بر جسم اثر می کنند. درنتیجه :

$$W_f + W_N + W_{mg} = k_f - k_i$$

ولی کار نیروی عمودی سطح و نیروی وزن برابر صفر است. درنتیجه :

$$W_f + ۰ + ۰ = ۰ - ۲۴۰۰۰۰$$

$$W_f = -۲۴۰۰۰۰J$$

از قضیهٔ کار و انرژی برای محاسبه کمیت‌های مختلف نیز می‌توان استفاده کرد. این موضوع در مثال‌های زیر نشان داده شده است.

مثال ۴ـ۹

کامیونتی به جرم ۳ تن با سرعت ۳۶km/h در حرکت است. راننده ناگهان ترمز محکمی می کند. به‌طوری که هر چهار چرخ آن قفل می‌شود. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین جاده و لاستیک‌ها ۰/۸ باشد، کامیونت چند متر روی جاده سُر می‌خورد تا بایستد؟ ($g = ۱۰m/s^۲$ فرض می‌شود.)

پاسخ : بر کامیونت نیروهای اصطکاک جنبشی، عمودی سطح و وزن وارد می‌شوند. با توجه به قضیهٔ کار و انرژی داریم :

$$W_f + W_N + W_{mg} = K_f - K_i$$

کار نیروی عمودی سطح و وزن در این جابه‌جایی صفر است. سرعت اولیه کامیونت ۱۰m/s و سرعت نهایی آن صفر است.

$$W_f + ۰ + ۰ = ۰ - \frac{۱}{۲}\times ۳۰۰۰\times ۱۰^۲ \Rightarrow W_f = -۱۵۰۰۰۰J$$

$$W_f = f_k d\cos\theta = \mu_k mgd\cos ۱۸۰^\circ$$

$$-۱۵۰۰۰۰ = ۰/۸\times ۳۰۰۰\times ۱۰\times d\times(-۱) \Rightarrow d = ۶/۲۵m$$

آزمایش ۴ـ۱

وسایل لازم : در شیشهٔ ترشی یا مربا، زمان‌سنج، متر فلزی یا نواری

شرح آزمایش

۱ــ روی زمین یک خط افقی بکشید و درِ شیشهٔ مربا را پشت خط روی زمین قرار دهید.

۲ــ با پا، به در شیشه ضربه بزنید و از لحظهٔ به حرکت درآمدن آن، زمان‌سنج را روشن و با توقف آن، زمان‌سنج را خاموش کنید.

(برای آنکه بتوانید در شیشه را روی مسیر مستقیم به حرکت درآورید، لازم است قبلاً چند بار تمرین کنید.)

۳ــ با متر، جابه‌جایی در شیشه را اندازه بگیرید.

۴ــ با استفاده از رابطهٔ $\bar{v} = \frac{v_i + v_f}{۲} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ ، مقدار v_i را به‌دست آورید.

۵ــ به کمک قضیهٔ کار و انرژی، ضریب اصطکاک جنبشی بین دو شیشه و کف اتاق را به‌دست آورید.

۶ــ آزمایش را چند بار تکرار کنید و میانگین ضریب اصطکاک را بیابید.

۴ــ۳ رابطهٔ کار و انرژی پتانسیل

در بخش قبل رابطهٔ میان کار و تغییر انرژی جنبشی را بررسی کردیم. در اینجا می‌خواهیم درمورد رابطهٔ میان کار و تغییر انرژی پتانسیل بحث کنیم. در ابتدا مورد خاص انرژی پتانسیل گرانشی را در نظر می‌گیریم.

فرض کنید توپ کوچکی به جرم m را از ارتفاع h_i در راستای قائم و رو به بالا پرتاب می‌کنیم (شکل ۴ــ۵). سرعت توپ به‌تدریج کاهش می‌یابد تا اینکه سرانجام در ارتفاع h_f برای لحظه‌ای می‌ایستد. کار نیروی وزن در این جابه‌جایی برابر است با :

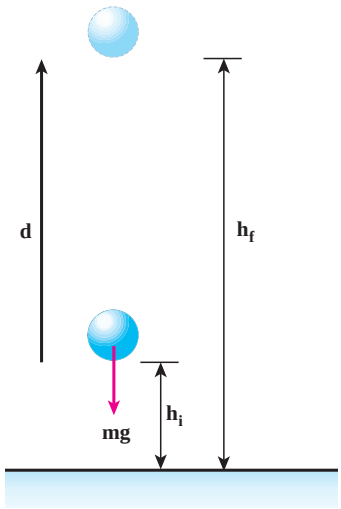
$$W_{\text{وزن}} = mgd\cos ۱۸۰^\circ = mg\,(h_f - h_i)\,(-۱)$$
$$= -(mgh_f - mgh_i)$$

از فیزیک (۱) و آزمایشگاه به یاد داریم که انرژی پتانسیل گرانشی به جرم m در ارتفاع h از سطح زمین از رابطهٔ U=mgh به‌دست می‌آید. بنابراین می‌توان نوشت :

$$W_{\text{وزن}} = -(U_f - U_i) = -\Delta U \qquad (۴ــ۷)$$

به عبارت دیگر، کار نیروی وزن برابر با منفیِ تغییر انرژی پتانسیل گرانشی است.

اگرچه رابطهٔ ۴ــ۷ را برای جسمی که در امتداد قائم و رو به بالا پرتاب می‌شود به دست آوردیم ولی برای هر جابه‌جایی دلخواهی برقرار است.



شکل ۴ــ۵

توپ از ارتفاع h_i پرتاب می‌شود و به ارتفاع h_f می‌رسد.

مثال ۴ـ۱۰

کودکی به جرم ۲۵kg از بالای یک سرسرهٔ آبی مطابق شکل به سمت پایین سر می‌خورد. اگر ارتفاع سرسره ۸ متر باشد :

الف) انرژی پتانسیل گرانشی کودک در بالا و پایین سرسره را به‌دست آورید.

ب) کار نیروی وزن در این جابه‌جایی را محاسبه کنید. ($g=۱۰m/s^۲$ فرض می‌شود).

کار نیروی وزن، همیشه برابر با منفی تغییر انرژی پتانسیل گرانشی است.

الف)

$$U_i = mgh_i = ۲۵\times۱۰\times۸ = ۲۰۰۰J$$

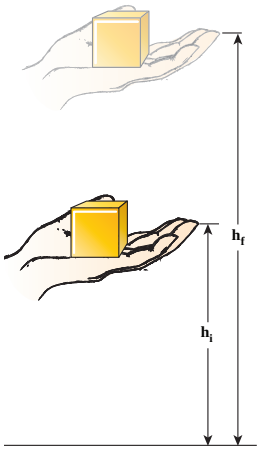
$$U_f = mgh_f = ۲۵\times۱۰\times ۰ = ۰J$$

ب)

$$W_{وزن} = -\Delta U = U_i - U_f = ۲۰۰۰ - ۰ = ۲۰۰۰J$$

مثال ۴ـ۱۱

جسمی به جرم m را مانند شکل با دستمان از ارتفاع h_i به ارتفاع h_f می‌بریم و دوباره به حالت سکون می‌رسانیم. با چشم‌پوشی از مقاومت هوا کار نیروی دست در این جابه‌جایی را بیابید.



پاسخ : با استفاده از قضیهٔ کار و انرژی جنبشی داریم :

$$W_{وزن} + W_{دست} = \Delta K$$

از آنجا که جسم در ابتدا و انتهای مسیر ساکن است، تغییر انرژی جنبشی آن صفر است. ($\Delta K = ۰$)

بنابراین :

$$W_{وزن} + W_{دست} = ۰ \Rightarrow W_{دست} = -W_{وزن}$$

با توجه به رابطهٔ ۴ـ۷ می‌توانیم کار نیروی وزن را با استفاده از تغییرات انرژی پتانسیل گرانشی به‌دست آوریم.

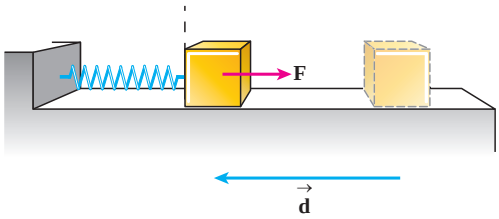
$$W_{وزن} = -\Delta U = -(mgh_f - mgh_i)$$

و آن را در رابطهٔ قبل جایگزین کنیم و کار نیروی دست را پیدا کنیم.

$$W_{دست} = -(-\Delta U) = +(mgh_f - mgh_i)$$

در تجربیات روزمره و همچنین در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه دیده‌ایم که فنر فشرده یا کشیده دارای انرژی پتانسیل کشسانی است. وقتی جسمی را به سوی فنری پرتاب می‌کنیم، پس از برخورد، فنر فشرده می‌شود و انرژی پتانسیل آن افزایش می‌یابد. در مدت تماس جسم با فنر، فنر نیرویی در خلاف جهت جابه‌جایی به جسم وارد می‌کند (شکل ۴ـ۶) یعنی کار نیروی فنر در این جابه‌جایی، منفی و تغییر انرژی پتانسیل کشسانی مثبت است. در مورد تغییر انرژی پتانسیل کشسانی نیز مشابه تغییر انرژی پتانسیل گرانشی می‌توانیم بگوییم :

$$W_{فنر} = -\Delta U_{کشسانی}$$



شکل ۴ـ۶ـ در مدت تماس جسم با فنر، فنر نیرویی در خلاف جهت جابه‌جایی جسم به آن وارد می‌کند.

مثال ۴ـ۱۲

درشکل ۴ـ۶ جسم با انرژی جنبشی ۲۰J با فنر برخورد و آن را فشرده می‌کند. اگر بدانیم در لحظهٔ توقف جسم، انرژی پتانسیل کشسانی ۱۵J است،

الف) کار نیروی کشسانی فنر در این جابه‌جایی چقدر است؟

ب) با استفاده از قضیهٔ کار و انرژی، کار نیروی اصطکاک در این جابه‌جایی را به‌دست آورید.

پاسخ :

الف) $W_{\text{فنر}} = -\Delta U_{\text{کشسانی}} = -(U_f - U_i)$

انرژی پتانسیل اولیهٔ فنر، صفر و در پایان ۱۵J است.

$$W_{\text{فنر}} = -(۱۵ - ۰) = -۱۵\,J$$

ب) بنابر قضیه کار و انرژی :

$$W_{\text{فنر}} + W_{\text{اصطکاک}} + W_{\text{وزن}} + W_{\text{عمودی سطح}} = K_f - K_i$$

$$-۱۵ + W_{\text{اصطکاک}} + ۰ + ۰ = ۰ - ۲۰ \Rightarrow W_{\text{اصطکاک}} = -۵J$$

فعالیت ۴ـ۳

وسیله‌هایی را نام ببرید که با استفاده از انرژی پتانسیل کشسانی فنر کار می‌کنند.

۴ـ۴ پایستگی انرژی مکانیکی

جسمی را در راستای قائم رو به بالا پرتاب می‌کنیم. در قسمتی از مسیر انرژی جنبشی جسم از K_i به K_f و انرژی پتانسیل گرانشی آن از U_i به U_f تغییر می‌کند. با توجه به رابطهٔ کار و انرژی پتانسیل گرانشی می‌توانیم بنویسیم :

$$W_{\text{وزن}} = -\Delta U = -(U_f - U_i)$$

اگر از مقاومت هوا برای این جسم چشم‌پوشی کنیم تنها نیروی وارد بر آن وزن است و بنابر قضیهٔ کار و انرژی داریم :

$$W_{\text{وزن}} = \Delta K = K_f - K_i$$

با مقایسهٔ این دو رابطه می‌توانیم بنویسیم :

$$-(U_f - U_i) = K_f - K_i$$

و یا

$$U_i + K_i = U_f + K_f$$

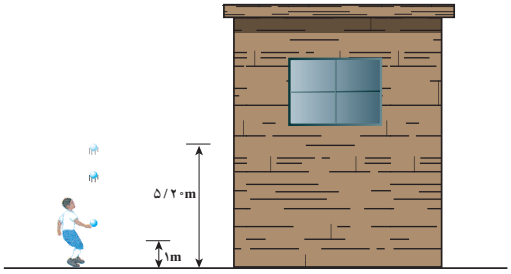
یعنی مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی جسم در نقطه‌های مختلف از مسیر حرکت با هم برابر است.

مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی هر جسم را انرژی مکانیکی آن می‌نامیم و با E نشان می‌دهیم.

$$E_i = E_f$$

به عبارت دیگر، با چشم‌پوشی از نیروی مقاومت هوا انرژی مکانیکی جسم ثابت باقی می‌ماند که به این نتیجه پایستگی انرژی مکانیکی می‌گوییم.

مثال ۴ـ۱۳



مطابق شکل پسربچه‌ای یک سنگ‌ریزه را از ارتفاع یک متری سطح زمین در راستای قایم رو به بالا پرتاب می‌کند. با چشم‌پوشی از مقاومت هوا سرعت عبور سنگ‌ریزه از لبهٔ پنجره‌ای را حساب کنید که تا زمین ۵/۲ متر فاصله دارد. ($g=10\,m/s^2$)

پاسخ : با استفاده از پایستگی انرژی مکانیکی

$$E_f = E_i$$

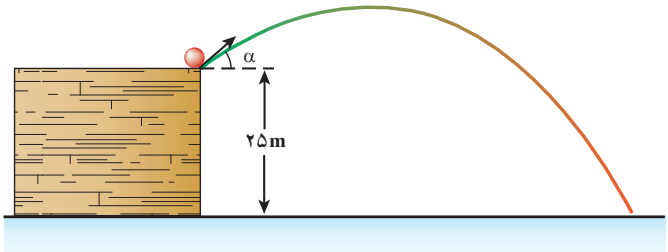
$$mgh_f + \frac{1}{2}mv_f^2 = mgh_i + \frac{1}{2}mv_i^2$$

در طرفین تساوی m را می‌توانیم حذف کنیم و با جایگزینی عددها مقدار v_f به دست می‌آید.

$$10\times 5/2 + \frac{1}{2}v_f^2 = 10\times 1 + \frac{1}{2}(10)^2$$

$$v_f = 4\,m/s$$

مثال ۴ـ۱۴



از بالای یک بلندی به ارتفاع ۲۵ متر جسمی را مطابق شکل با سرعت ۲۰m/s پرتاب می‌کنیم. سرعت جسم هنگام برخورد با زمین چقدر است؟ $g=10\,m/s^2$ و از مقاومت هوا چشم‌پوشی کنید.

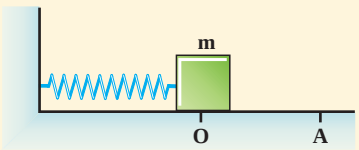
پاسخ : با توجه به اینکه مقاومت هوا نداریم، انرژی مکانیکی جسم پایسته است.

$$E_f = E_i \Rightarrow mgh_f + \frac{1}{2}mv_f^2 = mgh_i + \frac{1}{2}mv_i^2$$

$$\Rightarrow gh_f + \frac{1}{2}v_f^2 = gh_i + \frac{1}{2}v_i^2$$

$$0 + \frac{1}{2}v_f^2 = 10\times 25 + \frac{1}{2}\times 20^2 \quad \Rightarrow \quad v_f = 30\,m/s$$

تمرین ۴ـ۳



مطابق شکل جسمی به جرم m به فنر متصل است و روی یک سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارد. جسم را تا نقطهٔ A می‌کشیم و سپس رها می‌کنیم. با توجه به اینکه به مجموع انرژی جنبشی جسم و انرژی پتانسیل کشسانی فنر انرژی مکانیکی مجموعهٔ جسم ــ فنر می‌گوییم، با استفاده از پایستگی انرژی مکانیکی چگونگی حرکت جسم را توصیف کنید.

اگر نتوانیم از مقاومت هوا چشم‌پوشی کنیم، برای جسمی که در راستای قائم حرکت می‌کند، قضیهٔ کار و انرژی به‌صورت زیر نوشته می‌شود :

$$W_{\text{مقاومت هوا}} + W_{\text{وزن}} = \Delta K = K_f - K_i$$

و این در حالی است که رابطهٔ کار و انرژی پتانسیل گرانشی برای جسم هیچ تغییری نمی‌کند.

$$W_{\text{وزن}} = -\Delta U = -(U_f - U_i)$$

با جایگزینی کار نیروی وزن در رابطهٔ قبلی می‌توان نوشت :

$$W_{\text{مقاومت هوا}} + (-\Delta U) = \Delta K$$

$$W_{\text{مقاومت هوا}} = \Delta K + \Delta U$$

$$W_{\text{مقاومت هوا}} = K_f - K_i + U_f - U_i$$

$$= (K_f + U_f) - (K_i + U_i) = E_f - E_i$$

یعنی با وجود مقاومت هوا، دیگر انرژی مکانیکی پایسته نمی‌ماند و تغییر می‌کند. توجه داریم در مواقعی که از مقاومت هوا چشم‌پوشی نمی‌شود با اینکه انرژی مکانیکی پایسته نمی‌ماند و در طول حرکت کم می‌شود، اما قانون پایستگی انرژی همواره برقرار است. یعنی همان‌قدر که انرژی مکانیکی کاهش می‌یابد، انرژی درونی جسم و هوای پیرامونش زیاد می‌شود و جسم و هوای پیرامونش گرم می‌شود.

مثال ۴ـ ۱۵

از بالگردی که در ارتفاع ۵۰ متری سطح زمین با سرعت $10\,m/s$ در پرواز است، بسته‌ای به جرم $10\,kg$ رها می‌شود و با سرعت $20\,m/s$ به زمین می‌رسد. کار نیروی مقاومت هوا بر روی بسته را از لحظهٔ رهاشدن تا هنگام رسیدن به زمین حساب کنید. ($g = 10\,m/s^2$ است.)

پاسخ :

$$W_{\text{مقاومت هوا}} = E_f - E_i$$

$$= (K_f + U_f) - (K_i + U_i)$$

$$= (\frac{1}{2}mv_f^2 + mgh_f) - (\frac{1}{2}mv_i^2 + mgh_i)$$

بسته در لحظهٔ جداشدن از بالگرد، سرعت $10\,m/s$ دارد.

$$W_{\text{مقاومت هوا}} = (\frac{1}{2}\times 10\times 20^2 + 0) - (\frac{1}{2}\times 10\times 10^2 + 10\times 10\times 50)$$

$$W_{\text{مقاومت هوا}} = -3500\,J$$

۴ـ۵ توان

در بخش ۴ـ۱ در مورد محاسبهٔ کار بحث شد. ولی، در مورد آهنگ انجام کار صحبتی نشد. کار می‌تواند کُند و یا تند انجام شود. مثلاً یک جسم را می‌توان در ۶ ثانیه یا ۱۰ ثانیه به یک ارتفاع معین رساند. در هر دو مورد کار انجام شده توسط بالابر یکسان است. ولی در مورد اول کار سریع‌تر انجام شده است. برای درنظرگرفتن سرعت انجام کار کمیّت مناسبی را به نام توان تعریف می‌کنیم.

فرض کنید نیروی F کار W را در مدت Δt انجام داده است. توان متوسط انجام کار به وسیلهٔ نیروی F ($\bar{P}$) از تقسیم کردن کار به زمان انجام آن به‌دست می‌آید:

$$\bar{P} = \frac{W}{\Delta t} \qquad (۸ــ۴)$$

یکای توان در SI ژول بر ثانیه (J/s) است. این یکا به احترام جیمز وات، که سرعت انجام کار موتورهای بخار را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید. وات (W) نامیده می‌شود.

برطبق این تعریف، هراندازه کار معینی در زمان کمتری انجام شود و یا در زمان معینی کار بیشتری انجام گیرد، توان انجام آن کار بیشتر است.

مثال ۴ـ۱۶

جرم اتاقک بالابری به همراه سرنشینان آن ۵۰۰kg است. اگر این بالابر در مدت ۱۰s از طبقهٔ همکف به طبقهٔ دوم در ارتفاع ۶ متری برود توان متوسط انجام کار به وسیلهٔ موتور بالابر چقدر است؟ ($g = ۱۰m/s^۲$ است.)

پاسخ: با استفاده از قضیهٔ کار و انرژی می‌توانیم بنویسیم:

$$W_{\text{وزن}} + W_{\text{موتور}} = \Delta K$$

$$-mg(h_f - h_i) + W_{\text{موتور}} = ۰$$

$$W_{\text{موتور}} = mg(h_f - h_i)$$

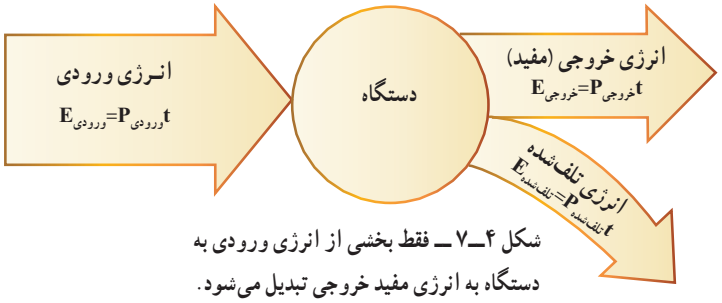
$$W_{\text{موتور}} = ۵۰۰ \times ۱۰ \times ۶ = ۳۰۰۰۰J$$

با توجه به تعریف توان متوسط داریم:

$$\bar{P} = \frac{W_{\text{موتور}}}{\Delta t} = \frac{۳۰۰۰۰}{۱۰} = ۳۰۰۰W$$

هر دستگاه تنها بخشی از انرژی ورودی (انرژی مصرفی دستگاه) را به انرژی مورد نظر ما تبدیل می‌کند. مثلاً هدف از روشن‌کردن پنکه به حرکت درآوردن هواست و برای این منظور پنکه بخشی از انرژی الکتریکی ورودی را به کار مکانیکی (انرژی حرکتی) تبدیل می‌کند و بخش دیگر به‌صورت انرژی‌های ناخواسته‌ای مانند انرژی گرمایی و صدا درمی‌آید. یا با روشن‌کردن لامپ می‌خواهیم نور به ما برسد. لامپ رشته‌ای بخش کمی از انرژی الکتریکی را به نور (حدود ۲۰ درصد) و بقیهٔ آن را به انرژی درونی لامپ و محیط تبدیل می‌کند. شکل ۴ـ۸ طرح‌واره‌ایست که این نوع تبدیل انرژی‌ها در دستگاه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که طرح‌واره نشان می‌دهد همواره فقط بخشی از انرژی ورودی قابل استفاده است که به آن انرژی مفید نیز می‌گویند. نسبت انرژی مفید به انرژی ورودی را **بازده** می‌نامیم.



شکل ۴ــ۷ ــ فقط بخشی از انرژی ورودی به دستگاه به انرژی مفید خروجی تبدیل می‌شود.

$$\text{بازده} = \frac{\text{انرژی مفید یا کار انجام شده به وسیلهٔ دستگاه}}{\text{انرژی یا کار داده شده به دستگاه}} \qquad (۴ــ۸)$$

روشن است که مقدار این کسر همواره کوچک‌تر از ۱ است. معمولاً بازده را به شکل درصد بیان می‌کنیم.

$$\text{بازده برحسب درصد} = \text{بازده}\,\% \times ۱۰۰$$

این کمیت تعیین می‌کند که چه درصدی از انرژی ورودی به‌کار یا انرژی خروجی موردنظر تبدیل شده است.

مثال ۴ـ۱۷

مصرف بنزین خودرویی که با سرعت ۹۰km/h حرکت می‌کند در هر ۱۰۰km، ۶ لیتر است. انرژی شیمیایی موجود در هر لیتر بنزین $۳/۵\times۱۰^{۷}$J است. ۶۵ درصد انرژی ناشی از سوختن بنزین در این خودرو از طریق اگزوز و دستگاه خنک‌کنندهٔ موتور مستقیماً به هوا داده می‌شود و ۱۵ درصد از انرژی در دستگاه تهویه، در دینام و در اثر اصطکاک بین اجزای موتور مصرف می‌شود.

الف) چند درصد از انرژی، صرف راندن خودرو می‌شود؟

ب) توان مفید خودرو چقدر است؟

پ) یکای رایج برای توان خودرو اسب بخار (hp) است و هر اسب بخار، ۷۴۶ وات است. توان مفید این خودرو چند اسب بخار است؟

پاسخ :

$$E_{مفید} = (۶\text{lit})(۳/۵\times۱۰^{۷}\,\text{J/lit})(\frac{۲۰}{۱۰۰}) = ۴/۲\times۱۰^{۷}\,\text{J}$$

$$t = \frac{۱۰۰}{۹۰}\text{h} = \frac{۱۰۰}{۹۰}\times۳۶۰۰\text{s} = ۴۰۰۰\text{s}$$

$$P_{مفید} = \frac{۶\times۳/۵\times۱۰^{۷}\times۰/۲}{۴\times۱۰^{۳}} = ۱/۰۵\times۱۰^{۴}\,\text{W}$$

$$= \frac{۱/۰۵\times۱۰^{۴}}{۷۴۶} = ۱۴\,\text{hp}$$

تمرین ۴ـ۳

در ساختمانی برای بالا بردن مصالح از یک بالابر الکتریکی استفاده می‌شود که با توان متوسط یک کیلووات، الکتریسیته مصرف می‌کند. اگر زمان مصرف انرژی الکتریکی در بالابر با زمان بالا بردن مصالح تا ارتفاع مورد نظر یکسان و بازده ۶۰٪ باشد، تعیین کنید که بالابر در چه مدت زمانی می‌تواند باری به جرم ۱۰۰kg را ۱۰ متر بالا ببرد.

غیاث الدین جمشید کاشانی

غیاث‌الدین کاشانی، در حدود سال ۷۳۰ هجری شمسی در کاشان، به دنیا آمد. از دوران کودکی و نوجوانی غیاث‌الدین، اطلاعات بسیار کمی وجود دارد. در بیشتر کتاب‌ها از او به نام جمشیدبن مسعودبن محمود طبیب کاشانی یاد کرده اند. آن طور که از لقب جد پدری‌اش برمی‌آید، طبابت در خانواده ایشان رواج داشته است و آنها مهارت‌های فراوانی در این کار از خود نشان داده‌اند، اما غیاث‌الدین کوچک به پزشکی علاقه نشان نمی‌داد.

غیاث‌الدین در زمان تیموریان زندگی می‌کرد که با یورش‌های مغول به ایران همراه بود. در آن زمان شرایط فراگیری علم و دانش سخت بود اما پدر غیاث الدین باعث شد تا پسرش در مسیر استعداد واقعی‌اش پرورش پیدا کند. او چون به نجوم و حرکات سیارات و ستارگان علاقه فراوانی داشت از همان کودکی، با پشتکار به رصد شبانه می‌پرداخت. غیاث‌الدین جوان، پس از انجام تحقیق‌ها و مطالعاتش توانست ابزار نجومی مختلفی برای محاسبات دقیق حرکت و وضعیت ستارگان اختراع کند. همچنین کتاب‌های ارزشمند و نفیس زیادی را طی سال‌های ۷۸۶ هجری شمسی تا ۷۹۵ هجری شمسی در زمینهٔ نجوم تألیف کرد که از آن جمله‌اند:

ـ کتاب «سلّم السماء»، (نردبان آسمان): این کتاب دربارهٔ مسائل نجومی، ابعاد سیارات، قطرها و اندازهٔ اجرام آنهاست.

ـ کتاب «مختصری در علم هیأت»: در این کتاب به حل بعضی سؤال‌های مطرح شده در محاسبات نجومی پرداخته شده است و پانزده بخش دارد.

ـ کتاب «نزهة‌الحدائق»: این کتاب که به زبان عربی تألیف شده است، معرف چگونگی استفاده از وسیله‌ای نجومی به نام «طبق المناطق» است که خود کاشانی آن را اختراع کرده بود و با آن تقویم ستارگان هفتگانه و عرض و ابعاد آنها را در زمین محاسبه می‌کرد و خسوف و کسوف را به آسان‌ترین راه تشخیص می‌داد. او همچنین رسالهٔ «آلات رصد» را تألیف نمود که در آن به توضیح طرز کار ابزار مورد استفاده در نجوم پرداخته است که بعضی از آنها اختراع خود غیاث‌الدین بوده است.

از دیگر کارهای او درآن دوران می‌توان به اتمام کار تحقیقی زیج خودش، با نام «زیج خاقانی» اشاره کرد که در آن زمان، زیج نو و جدیدی بوده است.

در سال ۸۰۱ هجری شمسی به دعوت اُلُغ بیگ، حاکم سمرقند، کاشان را به قصد سمرقند ترک کرد. در سمرقند با دانشمندان زیادی از جمله دانشمندان تاشکندی رقابت داشت و به دلیل نبوغ بالای او، دانشمندان به او حسادت می‌کردند. رساله «محیطیه» و کتاب «مفتاح الحساب» را در سمرقند به زبان عربی تألیف کرد، «مفتاح الحساب» را بعدها سه دانشمند روسی، به زبان روسی منتشر کردند.

از مهم‌ترین اقدامات او، ساختن ساختمان رصدخانه در سمرقند بود، با ساخت ابزار نجومی‌ای که خودش آنها را طراحی کرده بود، تحقیقات و رصدهای شبانه در این رصدخانه آغاز شد. او قصد تهیه زیج دقیق‌تری را داشت، اما قبل از آنکه به پایان برسد، در سال ۸۰۹ هجری شمسی، هنگام رصد شبانه، از دنیا رفت.

پرسش‌های فصل چهارم

۱ دو جسم هم جرم A و B را به بالای برج بلندی می بریم. جسم A را با جرثقیل به‌طور مستقیم بالا می‌بریم و جسم B را خیلی آرام از پله هایی که برج را دور می‌زنند بالا می‌بریم. اگر دو جسم را در بالای برج کنار هم قرار دهیم کدام گزاره ها درست هستند؟

الف) انرژی پتانسیل گرانشی جسم B از A کمتر است، زیرا آرام تر به بالا برده شده است.

ب) انرژی پتانسیل گرانشی جسم A از Bکمتر است، زیرا برای رسیدن به بالای برج مسافت کمتری پیموده است.

پ) کار نیروی وزن برای هر دو جسم یکسان است.

ت) انرژی پتانسیل گرانشی هر دو جسم در بالای برج یکسان است.

۲ آیا انرژی جنبشی می‌تواند منفی باشد؟ انرژی پتانسیل گرانشی چطور؟ توضیح دهید.

۳ کتابی را از روی سطح زمین بر می‌داریم و آن را روی میز می‌گذاریم. در این فعالیت کار انجام می‌دهیم اما انرژی جنبشی کتاب تغییر نمی‌کند. آیا قضیه کار و انرژی در این مورد نقض شده است؟ توضیح دهید.

۴ وقتی می‌گوییم «توان مفید خروجی دستگاه A از توان مفید خروجی دستگاه B بیشتراست» منظورمان چیست؟

مسائل فصل چهارم

۱ شخصی به جرم ۵۰ کیلوگرم داخل آسانسوری قرار دارد. آسانسور ۵ متر بالا می‌رود. در هر یک از موارد زیر کار هر یک از نیروهای وارد بر شخص را حساب کنید.

الف) آسانسور با سرعت ثابت بالا می‌رود.

ب) آسانسور شتاب رو به بالای $۲m/s^۲$ دارد.

۲ در مسئلهٔ ۱ حاصل جمع کار نیروها را با استفاده از قضیه کار و انرژی بدست آورید.

۳ هواپیمایی به جرم ۱۰ تن در مدت یک دقیقه می‌تواند به سرعت ۳۰۰m/s برسد و تا ارتفاع ۵۰۰ متری اوج بگیرد.

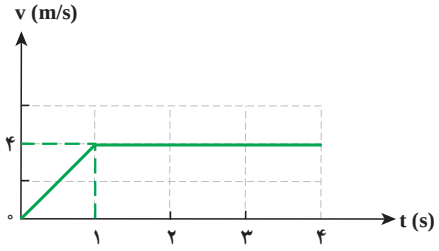
الف) کار نیروی وزن در این مدت چقدر است؟

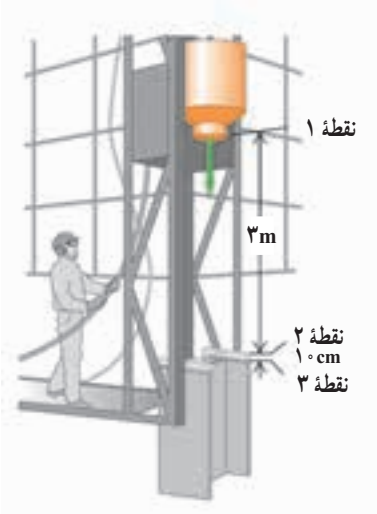
ب) چه نیروهایی غیر از وزن بر هواپیما اثر می‌کند؟ کار کدام یک از این نیروها مثبت است؟

پ) جمع کار نیروهای وارد بر هواپیما چقدر است؟

ت) توان انجام کار نیروهای غیر از وزن را بیابید.

۴ نمودار سرعت ــ زمان متحرکی به جرم ۵kg در شکل روبه‌رو داده شده است. جمع کار نیروهای وارد بر جسم را الف) به طور مستقیم ب) با استفاده از قضیه کار و انرژی برای این متحرک حساب کنید.





۵ در یک دستگاه پایه‌کوبی، مطابق شکل روبه‌رو، پتکی به جرم ۲۰۰kg را به ارتفاع ۳m بالای پایهٔ آهنی می‌برند و آن را رها می‌کنند. پایه در اثر برخورد پتک، ۱۰cm در زمین فرو می‌رود. ریل‌های قائمی که پتک را هدایت می‌کنند، نیروی اصطکاک ثابت ۶۰N بر آن وارد می‌کنند. با استفاده از قضیهٔ کار و انرژی الف) سرعت پتک در لحظهٔ قبل از برخورد به پایه را بدست آورید.

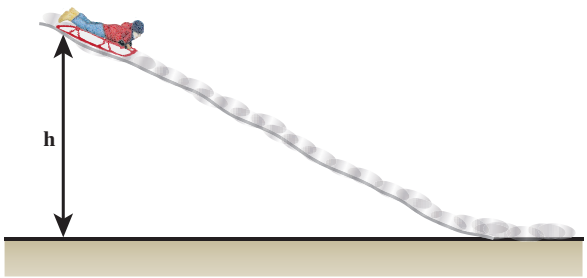
ب) کار نیرویی که پتک به پایه وارد می‌کند، چقدر است؟

۶ گلوله ای به جرم ۲۴ گرم با سرعت ۵۰۰m/s به‌طور افقی وارد تنهٔ درختی می‌شود. اگر گلوله به اندازهٔ ۱۲cm در تنه درخت فرو رود و متوقف شود، کارنیرویی که تنه به آن وارد می‌کند چقدر است؟

۷ خودرویی به جرم یک تن با سرعت ۷۲km/h درحرکت است. رانندهٔ خودرو ناگهان مانعی را در ۳۰ متری خود می‌بیند و ترمز می‌کند. چهار چرخ خودرو قفل می‌شود و پس از مدتی خودرو متوقف می‌شود. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین لاستیک خودرو و جاده ۰/۵ باشد، آیا خودرو به مانع برخورد می‌کند؟

این تمرین را یک بار با استفاده از قضیه کار و انرژی و بار دیگر با استفاده از معادله‌های فصل حرکت شناسی و دینامیک حل کنید.

۸ گلوله‌ای به جرم ۵۰g از دهانهٔ تفنگی با سرعت افقی ۱km/s خارج می‌شود و با سرعت ۰/۴km/s به زمین برخورد می‌کند. درمدت حرکت گلوله کار نیروی مقاومت هوا چقدراست؟ (ارتفاع شلیک گلوله را ۱/۵ m از سطح زمین درنظر بگیرید.)



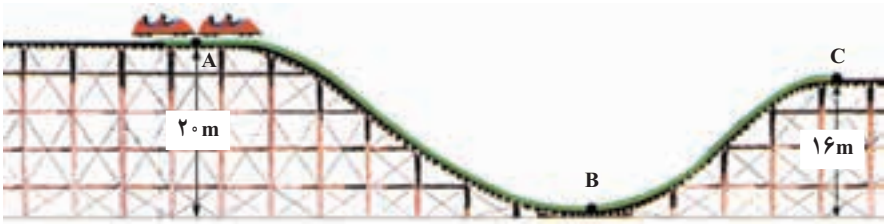
۹ سورتمه‌ای که جرم آن به همراه سرنشین‌اش ۵۰kg است، از بالای تپه‌ای، از حال سکون شروع به حرکت می‌کند.

الف) اگر ارتفاع تپه ۱۰۰ متر و اصطکاک قابل چشم‌پوشی باشد، سرعت سورتمه در پایین تپه چقدر خواهد بود؟

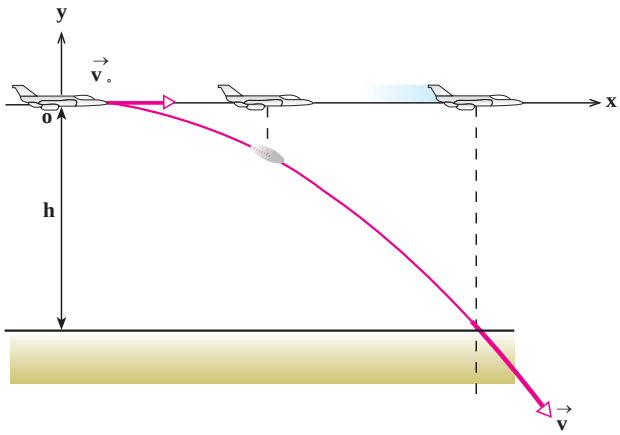
ب) فرض کنید مسیر تپه اصطکاک داشته باشد و سرعت سورتمه در پایین مسیر ۳۰m/s شود. چه مقدار انرژی بر اثر اصطکاک به انرژی درونی تبدیل می‌شود؟

۱۰ یک ورزشکار پرتاب وزنه، با پیش گذاشتن پا سعی می‌کند بیشترین سرعت ممکن را به وزنه بدهد. اگر پرتابگر به طور متوسط نیروی ۲۰۰N را در جابه‌جایی ۱/۰ m روی وزنه‌ای به جرم ۷kg اعمال کند، سرعت وزنه هنگام جدا شدن از دست ورزشکار چقدراست؟

۱۱ پسر بچه‌ای گلولهٔ برفی به جرم ۲۰۰g را از زمین برمی‌دارد و تا ارتفاع ۱/۵ m بالا می‌برد و آن را با سرعت ۱۰m/s پرتاب می‌کند. پسربچه چند ژول کار روی گلوله انجام می‌دهد؟

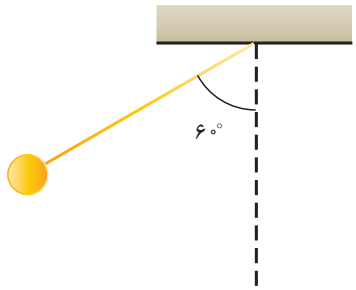


۱۲ در شکل روبه‌رو یک واگن تفریحی نشان داده شده است. اگر واگن در A از حال سکون شروع به حرکت کند، سرعت آن در B و C چقدر است؟ از اصطکاک قطار با ریل صرف نظر کنید.



۱۳ در شکل روبه‌رو هواپیما که در ارتفاع ۲۰۰ متری با سرعت ۹۰۰km/h به طور افقی پرواز می‌کند، بسته‌ای را رها می‌کند. سرعت بسته هنگام برخورد به زمین چقدر است؟ (از مقاومت هوا چشم‌پوشی کنید.)

۱۴ شخصی به جرم ۷۰ کیلوگرم، ۵۰ پله را در زمان یک دقیقه بالا می‌رود. توان متوسط مفید او چند وات است؟ ارتفاع هرپله را ۳۰ سانتی‌متر فرض کنید.



۱۵ آونگی به جرم m و طول l را مطابق شکل روبه‌روبه اندازه °۶۰ از وضعیت قائم منحرف و از حال سکون رها می‌کنیم.

الف) سرعت آونگ هنگامی که از وضعیت قائم می‌گذرد، چقدر است؟

ب) آونگ از طرف دیگر تا چه ارتفاعی بالا می‌رود؟(از مقاومت هوا صرف نظر کنید.)

۱۶ ارتفاع یک سد ۱۰۰متر است. توان الکتریکی مولدی که در پایین این سد قرار دارد، تقریباً برابر با ۲۰۰MW است.اگر ۸۰ درصد کار نیروی گرانش به انرژی الکتریکی تبدیل شود، درهر ثانیه چند متر مکعب آب باید روی پره‌های توربین بریزد؟ (جرم هر متر مکعب آب را ۱۰۰۰kg بگیرید.)

۱۷ یک موتور آب الکتریکی حجمی از آب را با آهنگ $۰/۸\ m^3/s$ تا ارتفاع H = ۱۵m بالا می برد. اگر بازدهٔ موتور ۰/۸ باشد، توان الکتریکی مصرفی موتور چقدراست؟ انرژی جنبشی آب هنگام خروج از دهانهٔ موتور، در مقایسه با انرژی پتانسیل آن قابل چشم‌پوشی است و هر متر مکعب آب، ۱۰۰۰kg جرم دارد.

۱۸ بازدهٔ بدن انسان در تبدیل انرژی غذایی به کار تا حدودی به نوع فعالیت بستگی دارد. بازده بدن برای بالا رفتن از پله ۲۰٪ است. فرض کنید شخصی ۶۰ کیلوگرمی در مدت ۸s از پلکانی به ارتفاع ۲m بالا می رود. آهنگ مصرف انرژی شخص دراین فعالیت چقدر است؟

۱۹ آسانسوری با سرعت ثابت، ۱۰ نفر مسافر را در ۳ دقیقه تا ارتفاع ۸۰m بالامی برد. اگر جرم متوسط هر مسافر ۸۰kg و جرم آسانسور ۱۰۰۰Kg باشد، توان متوسط موتور آن چند وات است؟

۵ ویژگی‌های ماده

قلم‌زنی در ایران

شُل و سفت شدن قیر به صنعتگران قلم زن کمک می‌کند تا بدون سوراخ‌شدن فلز بر روی آن نقش و نگارهای متنوعی ایجاد کنند.

شکل ۵ــ۱ قطره‌های آب روی برگ نیلوفر آبی

چرا تغییر شکل جامدها مشکل است؟ چرا مایع‌ها شکل ظرف را به خود می‌گیرند؟ چرا قطرهٔ آبی که از شیر جدا می‌شود هنگام سقوط نیز به شکل قطره باقی می‌ماند؟ چرا گازها را می‌توان متراکم کرد ولی مایع‌ها به آسانی متراکم نمی‌شوند؟ چگونه برخی از حشرات روی آب می‌ایستند؟ چرا آب روی برگ نیلوفر آبی به‌صورت قطره درمی‌آید (شکل ۵ــ۱)؟ چگونه آب از آوندهای درختان بلند بالا می‌رود؟ چگونه فشار وارد بر پدال ترمز می‌تواند سبب توقف خودرو شود؟

با توجه به نیروهای بین مولکولی و چگونگی حرکت مولکول‌های درون ماده می‌توانیم به این پرسش‌ها پاسخ دهیم و یا بسیاری از پدیده‌هایی را توجیه کنیم که با برخی از آنها در این فصل آشنا خواهیم شد.

۵ــ۱ حالت‌های مختلف ماده

مواد از اتم‌ها و مولکول‌ها ساخته شده‌اند. اندازهٔ اتم‌ها از مرتبهٔ یک آنگستروم ($1\,Å = 10^{-10}\,m$) است. اندازهٔ مولکول به این بستگی دارد که از چند اتم ساخته شده باشد و از حدود ۱Å برای مولکول‌های کوچک تا ۱۰۰۰Å برای مولکول های خیلی بزرگ است. با انجام فعالیت ۵ــ۱ می‌توانید به تخمینی از مرتبهٔ بزرگی فاصلهٔ بین مولکول‌های روغن مایع برسید.

فعالیت ۵ــ۱

در ظرف آبی کم‌عمق با سطحی بزرگ (مانند سینی) آب بریزید و روی سطح آب مقداری پودر بچه یا پودر فلفل بپاشید. انتهای یک سوزن ته‌گرد یا یک تار مو را در روغن مایع (یا روغن زیتون) بزنید و درآورید. قطرهٔ بسیار کوچکی از روغن در نوک سوزن یا تار مو ایجاد می شود. حجم این قطره را با برآورد کردن قطر آن یا به هر روش دیگری تعیین کنید. قطره را وسط ظرف آب بیندازید. قطره با پس‌راندن پودر، روی سطح آب پخش می‌شود و یک لکهٔ روغن روی آب تشکیل می‌شود. صبر کنید تا مساحت لکه به بیشترین مقدار خودش برسد. اکنون مساحت لکه را اندازه بگیرید. با معلوم بودن حجم قطره و مساحت لکه، ضخامت لایهٔ روغن به‌دست می‌آید. این ضخامت برآوردی از مرتبهٔ بزرگی فاصلهٔ بین مولکول‌های روغن است [۱].

مثال ۵ــ۱

در فعالیت ۵ــ۱ اگر حجم قطره $5\times10^{-5}\,cm^3$ و قطر لکه $10\,cm$ باشد،

الف) ضخامت لکه چقدر است؟

ب) اگر فاصلهٔ متوسط مولکول‌های روغن کنار هم $10\,Å$ باشد، لکهٔ روغن از چند لایه مولکول روی هم درست شده است؟

۱ــ این روش برای تخمین ابعاد مولکول روغن را «لردریلی» (Lord Rayleigh)، برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک ۱۹۰۴ پیشنهاد کرده است. گفته می‌شود، در حالت آرمانی قطرهٔ روغن آنقدر روی سطح آب پخش می‌شود تا لایه‌ای با ضخامت یک مولکول ایجاد شود.

پاسخ :

الف) قطر لکه = ۱۰cm ⇒ مساحت لکه = $A = \pi r^2 = ۳/۱۴ \times ۲۵ \simeq ۷۹cm^2$

حجم قطره برابر با حجم لکه است و از طرفی حجم لکه از حاصلضرب مساحت لکه (A) در ضخامت آن (h) به‌دست می‌آید. بنابراین داریم :

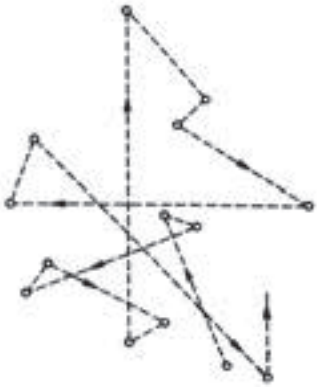
حجم قطره = حجم لکه = $Ah \Rightarrow ۵ \times ۱۰^{-۵} = ۷۹h \Rightarrow h = ۶/۳ \times ۱۰^{-۷}cm = ۶۳Å$

ب) تعداد لایه‌ها برابر است با

$(۶۳Å) \div (۱۰Å) \simeq ۶$ لایه

معمولاً ماده به حالت (فاز) گاز، مایع و جامد یافت می‌شود که به بررسی آنها می‌پردازیم.

الف) گاز : در حالت گاز، مولکول‌ها آزادانه به اطراف حرکت و با یکدیگر و با دیواره‌های ظرفی که در آن قرار دارند برخورد می‌کنند. فاصلهٔ میانگین مولکول‌های کنار هم در حالت گاز خیلی بیشتر از این فاصله در حالت مایع و جامد است. مثلاً فاصلهٔ میانگین مولکول‌های هوا در شرایط معمولی در حدود ۳۵Å است.



شکل ۵ــ۲ــ طرح‌واره‌ای از مسیر یک مولکول عطر در هوا (بزرگ شده به اندازهٔ $۱۰^۶$ مرتبه)

فعالیت ۵ـ۲

درِ یک ظرف نوشابهٔ پلاستیکی خالی را ببندید. در این حالت ظرف پر از هوا است. سعی کنید ظرف را متراکم کنید. همین کار را وقتی ظرف پر از آب است نیز انجام دهید. از این آزمایش چه نتیجه‌ای در مورد تراکم‌پذیری مایع‌ها و گازها می‌گیرید؟

وقتی گُلی خوشبو را با خود به اتاق می‌آورید یا در شیشهٔ عطری را در اتاق باز می‌کنید، بوی خوش در همه‌جای اتاق حس می‌شود. برای توجیه این پدیده می‌توان گفت وقتی مولکول‌های عطر با یکدیگر یا با مولکول‌های هوا برخورد می‌کنند تغییر مسیر می‌دهند. هر مولکول عطر در فاصلهٔ دو برخورد پی‌درپی روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند و هر برخورد مسیر آن را تغییر می‌دهد. در نتیجه مولکول‌های عطر خطی شکسته را می‌پیمایند (شکل ۵ــ۲) و به این ترتیب به همه‌جای اتاق می‌روند. این پدیده را پخش مولکول‌های عطر در اتاق می‌نامیم. با مشاهدهٔ پخش شدن بو در اتاق می‌توان دریافت که مولکول‌ها در هوا آزادانه و در جهت‌های مختلف حرکت و به یکدیگر برخورد می‌کنند.

ب) جامد : در جامدها فاصلهٔ مولکول‌ها از هم بسیار کمتر از این فاصله در گازها و در حدود $۱Å(۱۰^{-۱۰}m)$ است. مولکول های جامد نمی‌توانند آزادانه به اطراف حرکت کنند، بلکه در مکان‌های خاصی قرار می‌گیرند و فقط نوسان‌های بسیار کوچکی در همین مکان‌ها انجام می‌دهند.

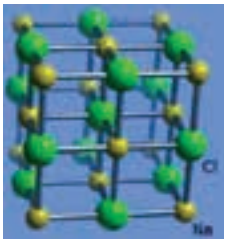
مولکول‌های برخی از جامدها در طرح‌های منظمی مانند شکل‌های ۵ــ۳ــ الف و ب کنار هم قرار می‌گیرند. جسم جامدی را که از تکرار این طرح‌های منظم ساخته می‌شود **جامد بلورین** می‌نامیم. فلزها، نمک‌ها، اغلب مواد معدنی و الماس (شکل ۵ــ۴) جامدهای بلورین هستند. جامدهای بلورین معمولاً هنگامی تشکیل می‌شوند که مایع را به آهستگی سرد کنیم. در این فرایند مولکول‌ها فرصت کافی دارند که در طرح‌های منظم خود را مرتب کنند.

در **جامدهای بی‌شکل** مانند شیشه، برخلاف جامدهای بلورین، مولکول‌ها مانند شکل ۵ــ۳ــپ در طرح منظمی کنار هم قرار ندارند. برخی از این جامدها از سرد کردن سریع مایع به‌دست می‌آیند. در این شرایط مولکول‌ها فرصت کافی ندارند تا در طرحی منظم مرتب شوند و به این ترتیب تاحد زیادی در وضعیت نامنظمی که در حالت مایع داشتند باقی می‌مانند[۱].

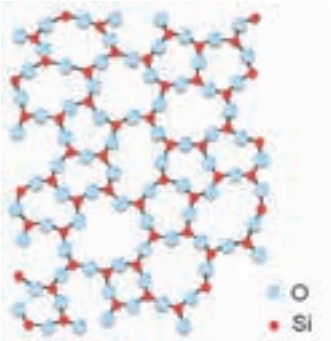
پ) مایع : این حالت از ماده حالتی بین گاز و جامد بلورین است. در مایع فاصلهٔ مولکول‌ها مانند فاصلهٔ آنها در جامد یعنی در حدود $۱Å(۱۰^{-۱۰}m)$ است. مولکول‌های مایع نظم اتمی و تقارن بلوری جامدات را ندارند. با این حال به اندازهٔ گازها هم بی‌نظم نیستند.

مایع به‌راحتی جاری می‌شود، به شکل ظرف خودش درمی‌آید و تقریباً تراکم‌ناپذیر است. پدیدهٔ پخش در مایع‌ها نیز مانند گازها رخ می‌دهد ولی با سرعت کمتر. اگر چند قطره جوهر را به آرامی درون لیوان آب بیندازید، شاید مدتی در حدود بیست دقیقه طول بکشد تا به طور کامل در لیوان پخش شود (شکل ۵ــ۵).

(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵ــ۳ــ جامدهای بلورین و جامدهای بی شکل

۵ــ۲ چگالی

آهن سنگین‌تر است یا چوب؟ این پرسشی مبهم و گنگ است. تا وقتی ندانیم ابعاد جسم آهنی و جسم چوبی چقدر است نمی‌توانیم به این پرسش پاسخ دهیم. قطعاً یک قطعه تختهٔ بزرگ چوبی از یک میخ کوچک آهنی سنگین‌تر است.

شکل ۵ــ۴ــ الماس کوه نور

شکل ۵ــ۵ــ جوهر به‌کندی در آب پخش می‌شود.

۱ــ درست‌تر آن است که بگوییم موادی مانند شیشه یا قیر که ساختار بلورین ندارند و در فیزیک به آنها **آمورف** می‌گویند به هنگام انجماد یا ذوب تغییر حالت (فاز) نمی‌دهند؛ بلکه فقط سفت یا شُل می‌شوند، یعنی ساختار مولکولی آنها (برخلاف جامدهای بلورین) تغییر نمی‌کند. به همین دلیل در مباحث فیزیکی پیشرفته‌تر، جامد بی‌شکل را مایعی سفت نیز می‌نامند.

فعالیت ۵ـ۳

الف) وزنه‌هایی فلزی، هم‌جنس و با جرم‌های متفاوت تهیه کنید. جرم و حجم هرکدام را اندازه بگیرید؛ سپس نسبت جرم به حجم را برای هر وزنه حساب کنید. نتیجه‌ای که به دست می‌آورید را به کلاس گزارش دهید.

ب) همین فعالیت را برای مادهٔ دیگری مانند چوب (با بریدن یک قطعه چوب به مکعب‌هایی با ابعاد مختلف) تکرار و نتیجه‌های به‌دست آمده از قسمت‌های الف و ب را باهم مقایسه کنید.

همان‌گونه که با انجام فعالیت ۵ــ۳ دریافتید نسبت جرم به حجم برای نمونه‌های هم‌جنس یکسان است. به نسبت جرم به حجم هر جسم چگالی آن جسم می‌گوییم.

$$\text{چگالی جسم} = \frac{\text{جرم جسم}}{\text{حجم جسم}}$$

جرم جسم را با m، حجم جسم را با V و چگالی آن را با ρ نشان می‌دهیم. بنابراین

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (۱ــ۵)$$

در دستگاه SI یکای جرم کیلوگرم (kg)، یکای حجم متر مکعب ($m^۳$) و بنابراین یکای چگالی کیلوگرم بر متر مکعب ($kg/m^۳$) است. از یکاهای دیگر و پرکاربرد چگالی $g/cm^۳$، kg/liter و g/liter است[۱].

مثال ۵ـ۲

چگالی خون $۱/۰۵۰\ g/cm^۳$ است. جرم یک لیتر خون چند کیلوگرم است؟ هر لیتر معادل $۱۰۰۰\ cm^۳$ است.

پاسخ:

$$\rho = \frac{m}{V} = \Rightarrow ۱/۰۵۰ = \frac{m}{۱۰۰۰} \Rightarrow m = ۱۰۵۰\ g = ۱/۰۵۰\ kg$$

تمرین ۵ـ۱

نشان دهید $۱\ g/liter = ۱\ kg/m^۳$ و $۱\ kg/liter = ۱\ g/cm^۳$.

۱ــ در برخی کتاب‌های فیزیک، لیتر را با نماد L و $cm^۳$ را با نماد cc نشان می‌دهند.

چگالی هر ماده یکی از ویژگی‌های مهم آن به شمار می‌رود که کاربردهای گوناگونی دارد. مثلاً ضدیخ خودرو، محلول گِلیکول است که به آن کمی مواد ضدخوردگی اضافه می‌شود. میزان غلظت گلیکول در محلول ضدیخ، که دمای انجماد محلول را تعیین می‌کند، با اندازه‌گیری چگالی این محلول به‌دست می‌آید. در پزشکی با آزمایش چگالی خون که در حالت عادی بین $1/04\ g/cm^3$ و $1/06\ g/cm^3$ است می‌توان به افزایش یا کاهش گلبول‌های سرخ خون پی‌برد. زیرا افزایش گلبول‌های سرخ خون باعث افزایش چگالی آن می‌شود. با اندازه‌گیری چگالی آلیاژی از طلا و مس می‌توان درصد جرم طلا و مس به‌کار رفته در آن را تعیین کرد. جدول ۵ــ۱ چگالی برخی مواد را نشان می‌دهد.

جدول ۵ــ۱ــ چگالی برخی مواد

جامدها	چگالی (kg/m^3)	مایع‌ها	چگالی (kg/m^3)	گازها*	چگالی (kg/m^3)
ایریدیم	۲۲۶۵۰	جیوه	۱۳۵۹۰	کلر (Cl_2)	۲/۹۹۴
طلا	۱۹۳۲۰	گلیسیرین	۱۲۶۰	بوتان (C_4H_{10})	۲/۴۸۹
سرب	۱۱۳۴۰	خون	۱۰۵۰	گوگرد دی‌اکسید (SO_2)	۲/۲۷۹
نقره	۱۰۴۹۰	آب دریا	۱۰۳۰	کربن دی‌اکسید (CO_2)	۱/۸۴۲
مس	۸۹۳۰	آب (۴°C)	۱۰۰۰	آرگون (Ar)	۱/۶۶
برنج	۸۴۰۰ــ۸۷۰۰	هوای مایع (−۱۹۴°C)	۹۲۰	کربن مونواکسید (CO)	۱/۴۶۵
آهن	۷۸۵۰	روغن زیتون	۸۰۰ــ۹۲۰	نیتروژن (N_2)	۱/۱۶۵
قلع	۷۲۸۰	ازت مایع (−۱۹۶°C)	۸۱۰	اکسیژن (O_2)	۱/۳۳۱
روی	۷۱۳۰	اتانول (C_2H_5OH)	۷۹۰	هوا	۱/۲۰۵
آلومینیم	۲۷۱۰	بنزین	۶۸۰	متان (CH_4)	۰/۶۶۸
سیمان	۲۳۰۰	هلیم مایع (−۲۶۹°C)	۱۲۵	هلیم (He)	۰/۱۶۶
یخ	۹۲۰			هیدروژن (H_2)	۰/۰۸۴
لیتیم	۵۳۰				
چوب	۲۵۰ــ۱۰۰۰				

* گازها در دمای ۲۰°C و فشار ۱atm

فعالیت ۵ـ۴

الف) با استفاده از سرنگ مدرج بزرگ و ترازوی دقیق، چگالی برخی از مایع‌های در دسترس مانند شیر، روغن، مایع ظرفشویی و ... را اندازه بگیرید. می‌توانید قبل و بعد از پرکردن سرنگ جرم آن را اندازه بگیرید و به این روش جرم مایع را تعیین کنید.

ب) چگالی چند جسم جامد در دسترس مانند قاشق، تیله، وزنه‌های فلزی و ... را اندازه بگیرید. برای اندازه‌گیری حجم شکل‌های نامنظم می‌توانید از استوانهٔ مدرج یا ظرف سرریز استفاده کنید.

چگالی‌های به‌دست آمده را با مقادیر آنها در جدول ۵ــ۱ مقایسه کنید.

مثال ۵ـ۳

جرم مجسمه‌ای برنزی (آلیاژی از مس، قلع، روی و ...) ۴۰ kg و حجم آن $۰/۰۵۰ m^۳$ است. اگر چگالی برنز $۸۰۰۰ kg/m^۳$ باشد، حجم فضای خالی درون مجسمه چقدر است؟

پاسخ :

حجم مقدار برنز استفاده شده برابر است با

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{۴۰}{۸۰۰۰} = ۰/۰۰۵\ m^۳$$

در نتیجه، حجم فضای خالی چنین می‌شود :

حجم فضای خالی = حجم مجسمه ـ حجم برنز = $۰/۰۵۰ - ۰/۰۰۵ = ۰/۰۴۵ m^۳$

فعالیت ۵ـ۵

الف) با استفاده از جدول ۵ــ۱ تعیین کنید چگالی هوا در حالت مایع چند برابر چگالی هوا در فشار ۱atm و دمای $۲۰^\circ C$ است.

ب) با توجه به پاسخ قسمت الف فاصلهٔ مولکول‌های هوا در حالت گاز چند برابر آن در حالت مایع است؟

پ) قسمت‌های الف و ب را برای هلیم نیز انجام دهید.

فعالیت ۵ـ۶

الف) اگر برای اندازه‌گیری جرم جسمی ترازو در اختیار نداشته باشید، چگونه می‌توانید جرم آن را تعیین کنید؟

ب) حجم داخل یک بطری را با روش‌های مختلف اندازه بگیرید و نتیجه‌ها را با یکدیگر مقایسه کنید.

۵ــ۳ نیروهای بین مولکولی

در فعالیت ۵ــ۲ دیدیم که متراکم کردن بطری پلاستیکی پر از آب و دربسته امکان‌پذیر نیست. به کمک نیروهای بین مولکولی می‌توان این پدیده را توجیه کرد. وقتی سعی می‌کنیم فاصلهٔ بین مولکول‌های مایع را کم کنیم نیروی دافعهٔ شدیدی بین آنها ظاهر می‌شود که از تراکم‌پذیری مایع جلوگیری می‌کند. وقتی باران می‌بارد لایه‌ای از آب روی شاخه و برگ درختان می‌نشیند و با بزرگ‌شدن این لایه، قطره شدن آب مانند شکل ۵ــ۶ــ الف آغاز می‌شود. با افزایش مقدار آب و با سنگین‌تر شدن قطرهٔ آب شکل آن به‌صورت ۵ــ۶ــ ب در می‌آید و در آستانهٔ سقوط قرار می‌گیرد. مولکول‌های آب روی سطح قطره از بقیهٔ مولکول‌های آب روی شاخه کمی دور می‌شوند. در این حالت نیروی بین مولکولی به صورت جاذبه ظاهر می‌شود و در برابر نیروی وزن مقاومت می‌کند. این نیروی جاذبهٔ بین مولکولی را نیروی هم‌چسبی می‌نامیم. با بزرگ‌تر شدن جرم قطره بالاخره نیروی وزن از نیروی هم‌چسبی مولکول‌ها بیشتر می‌شود و قطره به شکل کره سقوط می‌کند (شکل ۵ــ۶ــ پ).

(الف)

(ب)

(پ)

شکل ۵ــ۶ــ با سنگین‌تر شدن لایهٔ آب، نیروی وزن بر نیروی هم‌چسبی غلبه می‌کند و آب شروع به چکیدن می‌کند.

از این دو مثال نتیجه می‌گیریم که مولکول‌های آب در شرایط عادی در وضعیت تعادل قرار دارند و وقتی آنها را کمی به هم نزدیک یا کمی از هم دور کنیم نیروهای دافعه یا جاذبه بین مولکول‌ها ظاهر می‌شود. این نیرو در جهتی است که مولکول‌ها را به وضعیت اولیهٔ خود بازگرداند. نیروهای بین مولکولی کوتاه‌بُرد هستند، یعنی وقتی فاصلهٔ بین مولکول‌ها چند برابر فاصلهٔ بین مولکولی شود، نیروهای بین مولکولی بسیار کوچک و عملاً صفر خواهند شد. تراکم ناپذیری و خاصیت کشسانی اجسام جامد را نیز می‌توان به روش مشابهی با نیروهای بین مولکولی توجیه کرد.

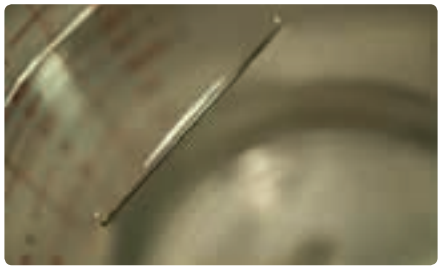
فعالیت ۵ـ۷

وقتی شیشه می‌شکند با نزدیک کردن قطعه‌های آن به هم نمی‌توان اجزای شیشه را دوباره به هم چسباند؛ ولی اگر قطعه‌های شیشه را آنقدر گرم کنیم که نرم شوند می‌توان آنها را به هم چسباند. این پدیده‌ها را با توجه به کوتاه بُرد بودن نیروهای بین مولکولی توجیه کنید.

با توجه به نیروهای بین‌مولکولی بسیاری از پدیده‌ها از جمله کشش سطحی، ترشوندگی و موئینگی را می‌توان بررسی کرد :

کشش سطحی : پدیده‌های طبیعی فراوانی نشان می‌دهد که مولکول‌های سطح مایع‌ها تحت کشش قرار دارند. این موضوع سبب می‌شود که سطح مایع مانند پوسته‌ای کشیده شده عمل کند. برخی از حشره‌ها می‌توانند روی سطح برکه‌ها راه بروند (شکل ۵ــ۷ــ الف). سوزنی که به‌دقت بر سطح آب قرار داده شود، روی آب شناور می‌ماند(شکل ۵ــ۷ــ ب). قطره‌های کوچک آب و حباب‌های صابون کروی‌شکل هستند (شکل ۵ــ۷ــ پ). همهٔ این پدیده‌ها نشانه‌ای از وجود کشش سطحی هستند. کشش سطحی ناشی از هم‌چسبی مولکول‌های سطح مایع است و آن را می‌توان با نیروهای بین مولکولی توضیح داد. در سطح مایع به دلیل تغییر از وضعیت مایع به بخار، فاصلهٔ مولکول‌ها از یکدیگر به‌طور متوسط بیشتر از فاصلهٔ مولکول‌های درون مایع است. بنابراین همان‌طور که پیشتر دیدیم با افزایش فاصلهٔ بین مولکول‌ها نیروهای بین مولکولی به‌صورت جاذبه ظاهر می‌شود و این باعث می‌شود که رفتار مولکول‌ها در سطح مایع چنان باشد که گویی سطح مایع تحت کشش قرار گرفته است.

(الف)



(ب)

(پ)

شکل ۵ــ۷ــ الف) ایستادن حشره‌ها روی آب، ب) قرار گرفتن سوزن روی آب و پ) تشکیل حباب‌های صابون جلوه‌هایی از کشش سطحی هستند.

فعالیت ۵ـ۸

الف) سعی کنید سوزن ته‌گرد یا گیرهٔ کاغذ را روی سطح آب شناور کنید. برای این منظور می‌توانید از دستمال کاغذی استفاده کنید.

ب) پس از شناور شدن سوزن یا گیره روی سطح آب، سطح آب را به‌دقت مشاهده کنید و مشاهدات خود را به کلاس گزارش دهید.

پ) اکنون یک قطره صابون مایع را به آرامی به آب درون ظرف بیافزایید. مشاهدات خود را به کلاس گزارش کنید و دلیلی برای آن بیابید.

ترشوندگی : دیدیم که نیروی هم‌چسبی بین مولکول‌های یک ماده سبب بروز پدیده‌های جالبی می‌شود. هنگامی که دو مادهٔ مختلف در تماس با یکدیگر قرار گیرند نیز جاذبهٔ مولکولی مشابهی بین مولکول‌های آنها ظاهر می‌شود که به آن نیروی دگرچسبی یا چسبندگی می‌گوییم. هم‌چسبی و دگرچسبی هردو نیروهایی بین‌مولکولی هستند. تفاوت آنها در این است که جاذبه، بین مولکول‌های مشابه باشد یا نامشابه.

هرگاه مایعی در تماس با جامدی قرار گیرد دو حالت می‌تواند رخ دهد. یکی اینکه دگرچسبی بین مولکول‌های مایع و جامد از هم‌چسبی بین مولکول‌های مایع بیشتر باشد. در این صورت می‌گوییم مایع، جامد را تر می‌کند. مثلاً در شکل ۵ــ۸ــ الف می‌بینیم که آب سطح شیشهٔ تمیز را تر کرده و روی آن پهن شده است. اما اگر نیروی هم‌چسبی بین مولکول‌های مایع از نیروی دگرچسبی بین مولکول‌های مایع و جامد بیشتر باشد می‌گوییم مایع جامد را تر نمی‌کند. در شکل ۵ــ۸ــ ب می‌بینیم که سطح شیشه با جیوه تر نشده و جیوه به شکل قطره روی سطح شیشه باقی مانده است.

الف) پخش آب روی سطح شیشه

ب) قطره‌های جیوه روی شیشه

شکل ۵ــ۸ــ شکل‌های پخش‌شدن آب روی شیشهٔ تمیز و قطره‌ای شدن جیوه روی شیشه

فعالیت ۵ـ۹

سطح یک شیشه را با روغن چرب کنید و سپس روی آن چند قطره آب بریزید چه چیزی مشاهده می‌کنید؟ مشاهدهٔ خود را توجیه کنید و به کلاس گزارش دهید.

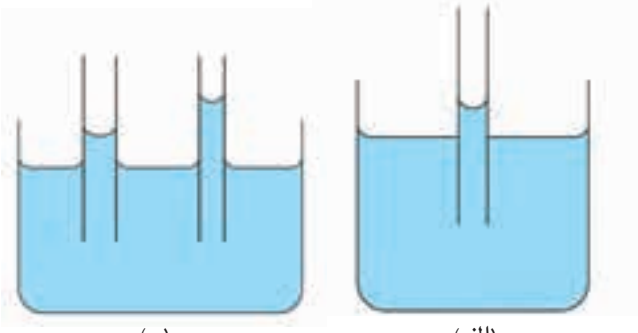
پخش آب روی سطح شیشهٔ چرب

مویینگی : اگر چند لولهٔ مویین شیشه‌ای و تمیز با قطرهای متفاوت را درون یک ظرف آب قرار دهیم مشاهده می‌کنیم که :

۱ــ آب در لوله‌های مویین بالا می‌رود و سطح آن بالاتر از سطح آب ظرف قرار می‌گیرد. (شکل ۵ــ۹ــ الف)

۲ــ هرچه قطر لولهٔ مویین کوچک‌تر باشد ارتفاع ستون آب در آن بیشتر است. (شکل ۵ــ۹ــ ب)

(پ)



(ب) (الف)

شکل ۵ــ ۹ــ شکل آب در لوله‌های مویین

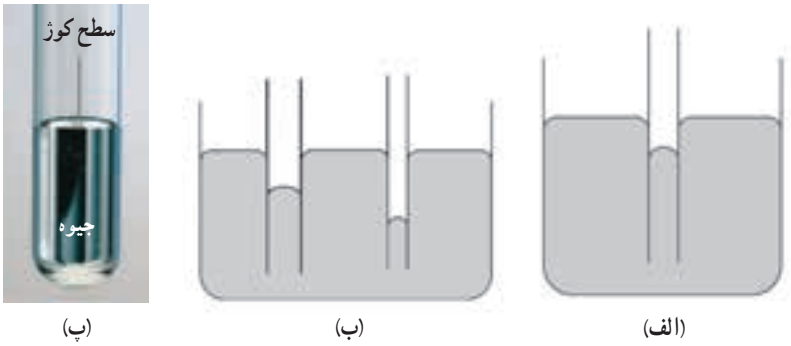
۳ــ سطح آب در بالای لولهٔ مویین فرورفته است. (شکل‌های ۵ ــ ۹)

اکنون همین آزمایش‌ها را با جیوه انجام می‌دهیم و مشاهده می‌کنیم که :

۱ــ جیوه در لوله‌های مویین مقداری بالا می‌رود ولی سطح آن پایین‌تر از سطح جیوهٔ ظرف قرار می‌گیرد. (شکل ۵ ــ ۱۰ــ الف)

۲ــ هرچه قطر لولهٔ مویین کوچک‌تر باشد ارتفاع ستون جیوه در آن کمتر است. (شکل ۵ــ ۱۰ــ ب)

۳ــ سطح جیوه در لولهٔ مویین برآمده است (شکل‌های ۵ ــ ۱۰)



شکل ۵ــ ۱۰ــ شکل جیوه در لوله‌های مویین

در مورد آب نیروی دگرچسبی بین مولکول‌های آب و مولکول‌های شیشه بیشتر از نیروی هم‌چسبی بین مولکول‌های آب است. در نتیجه آب سطح شیشه را تر می‌کند و مانند شکل ۵ــ۹ در لوله بالا می‌رود. در مورد جیوه نیروی دگرچسبی بین مولکول‌های جیوه و مولکول‌های شیشه کمتر از نیروی هم‌چسبی بین خود مولکول‌های جیوه است. در نتیجه جیوه سطح شیشه را تر نمی‌کند و مانند شکل ۵ــ۱۰ سطح جیوه در لولهٔ مویین پایین‌تر از سطح جیوه درون ظرف قرار می‌گیرد.

فعالیت ۵ـ۱۰

آزمایشی طراحی کنید که در آن سطح آب در لوله مویین دارای برآمدگی باشد و سطح آن نسبت به سطح آب در ظرف پایین‌تر باشد.

فعالیت ۵ـ۱۱

مصالح ساختمانی از قبیل خاک و آجر و سیمان به سبب مویینگی آب را به درون خود می‌کشند. برای جلوگیری از این عمل، از قیر که آب در آن نفوذ نمی‌کند، استفاده می‌کنند و قبل از ساختن ساختمان زمین را قیراندود می‌کنند تا از نفوذ رطوبت به داخل ساختمان جلوگیری شود. تحقیق کنید در گذشته در ایران به جای قیراندودکردن چگونه از نفوذ آب باران به داخل ساختمان جلوگیری می‌کردند؟

مطالعهٔ آزاد

بالارفتن آب از شاخ و برگ درختی بلند

چگونه آب و شیرهٔ گیاهی از ریشهٔ یک درخت بزرگ به شاخ و برگ آن می‌رسد؟ پاسخ این پرسش ساده به نظر می‌رسد و با نگاهی ابتدایی می‌توان گفت بالا رفتن شیرهٔ گیاهی ناشی از اثر همزمان فشار اسمزی در ریشه و پدیدهٔ مویینگی در آوندهای درختان است. اما این پاسخ مدت‌ها است که به چالش کشیده شده است. در واقع پژوهشگران بر این باورند که آوند درختان آنقدر باریک نیست که بتواند براثر مویینگی آب و شیرهٔ گیاهی را تا چنان ارتفاع بلندی بالا بکشد. مدل دیگری که بیشتر مورد قبول پژوهشگران قرار گرفته است مدلی موسوم به کشش ــ هم‌چسبی است. بر مبنای این مدل، تبخیر آب از سطح برگ باعث کاهش فشار در ستون شاره‌ای می‌شود که از ریشه تا ساق و برگ گیاهان امتداد دارد. در واقع شیرهٔ گیاهی به‌صورت زنجیری بلند که ناشی از هم‌چسبی متقابل مولکول‌های شاره است، بر اثر این فشارِ منفی به بالا کشیده می‌شود. امّا بر این مدل هم ایرادهایی وارد است و از جمله برخی پژوهشگران بر این باورند که هم‌چسبی مولکول‌های شاره به حدّی نیست که بتواند این فشار بالا را تاب بیاورد و این زنجیره در جایی گسسته خواهد شد. برخی دیگر از پژوهشگران این احتمال را مطرح کرده‌اند که آب یا شیرهٔ گیاهی در چند مرحله به بالا کشیده می‌شود. در هر حال تاکنون این امکان به‌وجود نیامده است که این امر به‌طور دقیق از لحاظ آزمایشگاهی بازسازی و این پدیده از لحاظ نظری کاملاً درک شود.

۵ــ۴ فشار در شاره‌ها

شاید به هنگام شنا کردن در عمق یک استخر، فشار آب روی پردهٔ گوش خود را حس کرده باشید. یا ممکن است هنگامی که سر شیر باز آبی را با انگشت خود گرفته‌اید متوجه فشاری شده باشید که آب بر انگشتتان وارد می‌آورد.

وقتی شاره (مایع یا گاز) ساکن باشد هر بخشی از شاره به بخش مجاور خود و نیز به هر سطحی که با آن در تماس است، مانند دیوارهٔ ظرف یا سطح جسم غوطه‌ور در شاره، نیرویی عمودی وارد می‌کند. با اینکه شاره در کل ساکن است می‌دانیم که مولکول‌های آن در حرکت‌اند. در واقع نیرویی که شاره وارد می‌کند ناشی از برخورد همین مولکول‌ها با اطراف خود است.

فشار متوسط، $\overline{P}$ ، که به یک سطح فرضی درون شاره وارد می‌شود. به صورت نسبت اندازهٔ نیروی عمودی وارد بر این سطح به مساحت آن سطح تعریف می‌شود :

$$\overline{P} = \frac{F}{A} \qquad (۵ــ۲)$$

که در آن F نیروی عمودی از طرف شاره (برحسب N) و A مساحت سطح فرضی (برحسب $m^۲$) است.

در SI یکای فشار پاسکال (Pa) است، به‌طوری که

$$۱\ Pa = \frac{۱N}{۱m^۲}$$

مثال ۵ـ۴

یک زیر دریایی در عمق ۹۰۰ متری اقیانوس ساکن است. این زیردریایی پنجره‌ای به شکل دایره و به قطر ۰/۵ m دارد. اگر فشار متوسط آب در محل پنجره 9×10^{6} Pa باشد نیرویی که آب بر سطح خارجی این پنجره وارد می‌کند چقدر است؟

پاسخ : مساحت پنجره برابر است با

$$A=\pi r^{2}=3/14\times0/25^{2}=0/2\,m^{2}$$

و در نتیجه

$$F=A\bar{P}=0/2\times9\times10^{6}=1/8\times10^{6}\,N$$

۵ـ۵ محاسبهٔ فشار در مایع‌ها

پیش از آنکه به محاسبهٔ فشار در مایع‌ها بپردازیم، خوب است تجربه‌های زیر را درنظر بگیریم. در تجربهٔ نخست، روی بدنهٔ یک ظرف استوانه‌ای پلاستیکی دو سوراخ هم‌ارتفاع و هم‌اندازه ایجاد می‌کنیم (شکل ۵ـ۱۱). درحالی که سوراخ‌ها را بسته‌ایم، ظرف را پر از آب می‌کنیم. اکنون یکی از سوراخ‌ها را باز می‌کنیم و سرعت خروج آب از آن را اندازه می‌گیریم. بار دیگر ظرف را پر از آب می‌کنیم و این اندازه‌گیری را برای سوراخ دیگر انجام می‌دهیم. از این تجربه درمی‌یابیم سرعت خروج آب از سوراخ‌های هم‌ارتفاع یکسان است.

شکل ۵ـ۱۱ـ استوانهٔ آبی با دو سوراخ همتراز

در تجربه‌ای دیگر، روی بدنهٔ همان ظرف سه سوراخ هم‌اندازه در ارتفاع‌های متفاوت ایجاد می‌کنیم (شکل ۵ـ۱۲). سوراخ‌ها را می‌بندیم و ظرف را پر از آب می‌کنم. سپس یکی از سوراخ‌ها را باز می‌کنیم و سرعت خروج آب از آن را اندازه می‌گیریم. با تکرار این تجربه در مورد سوراخ‌های دیگر درمی‌یابیم که سرعت خروج آب از سوراخ‌های پایین‌تر بیشتر است.

شکل ۵ـ۱۲ـ استوانهٔ آبی با سه سوراخ غیر همتراز

از این تجربه‌ها درمی‌یابیم که اولاً مایع بر دیوارهٔ ظرف خود فشار وارد می‌آورد، دوم آنکه این فشار در نقاط همتراز، یکسان است. ولی در نقاط با ارتفاع متفاوت، یکسان نیست و با افزایش عمق (نسبت به سطح آزاد) فشار بیشتر می‌شود. و سوم اینکه مایع عمود بر دیوارهٔ ظرف خارج می‌شود. یکسان بودن فشار در نقاط همتراز شارهٔ ساکن را می‌توان از قوانین نیوتون نیز نتیجه گرفت. در اینجا می‌خواهیم با به‌کار بردن قوانین نیوتون بستگی فشار مایع به عمق آن را به‌دست آوریم. به این منظور، شکل ۵ـ۱۲ را ببینید. در شکل، بخشی از مایع ساکن را که بین دو سطح هاشور خورده قرار دارد را درنظر بگیرید. برایند نیروهای قائم وارد بر این بخش از مایع صفر است و بنابراین از قانون دوم نیوتون در راستای قائم داریم :

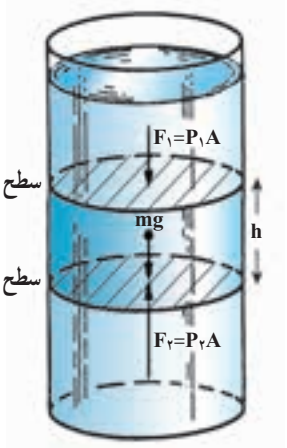
$$F_{2}=F_{1}+mg$$

یا

$$P_{2}A=P_{1}A+mg$$

که در آن P_{1} و P_{2} به ترتیب فشار در سطح‌های ۱ و ۲، A مساحت این دو سطح، و m جرم مایعی است که بین دو سطح موردنظر قرار دارد. بدیهی است که حجم این مایع برابر است با

$$V=Ah$$



شکل ۵ــ۱۲ــ نیروی فشار وارد بر قاعدهٔ بالایی و نیروی فشار وارد بر قاعدهٔ پایینی با نیروی گرانی وارد بر حجم محصور موازنه می‌شود.

با توجه به رابطهٔ $\rho=\frac{m}{V}$ که در آن ρ چگالی مایع است، داریم

$$m=\rho V=\rho Ah$$

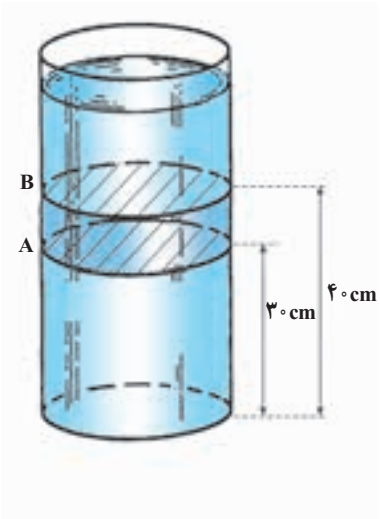
بنابراین می‌توان نوشت :

$$P_2A=P_1A+(\rho Ah)g$$

و از آنجا

$$P_2=P_1+\rho gh \qquad (۵ــ۳)$$

مثال ۵ـ۵



الف) در یک ظرف استوانه‌ای بلند، مطابق شکل مقداری آب می‌ریزیم. اختلاف فشار بین دو سطحی که با A و B مشخص شده‌اند را به‌دست آورید.

ب) اگر در ظرف به جای آب، روغن مایعی با چگالی $\rho=۹۰۰kg/m^3$ بریزیم اختلاف فشار این دو سطح چقدر می‌شود؟ $(g=۱۰m/s^2)$

پاسخ :

الف) با توجه به رابطهٔ ۵ــ۳ و با مراجعه به جدول ۵ــ۱ اختلاف فشار دو سطح را محاسبه می‌کنیم :

$$P_2=P_1+\rho gh \Rightarrow \Delta P=\rho gh=۱۰۰۰\times۱۰\times۰/۱=۱۰۰۰Pa$$

ب) اختلاف فشار بین دو سطح برابر است با

$$\Delta P=\rho gh=۹۰۰\times۱۰\times۰/۱=۹۰۰Pa$$

فشار هوا : اگر در رابطهٔ ۵ــ۳ سطح ۱ را سطح آزاد مایع درنظر بگیریم فشار در آن سطح برابر با فشار هوا است که معمولاً آن را با P_0 نمایش می‌دهیم. اگر فشار در عمق h را به‌جای P_2 با P نمایش دهیم می‌توانیم رابطه ۵ــ۳ را به‌صورت زیر بنویسیم :

$$P=P_0+\rho gh \qquad (۵ــ۴)$$

فشاری که هوا بر سطح آزاد مایع وارد می‌کند، ناشی از برخورد مولکول‌های هوا با سطح آزاد مایع است. همان‌طور که خواهیم دید مقدار متوسط این فشار در سطح دریای آزاد، حدود $۱/۰۱\times۱۰^{۵}$ Pa است و به آن ۱ اتمسفر (۱atm) نیز می‌گویند. با افزایش ارتفاع از سطح زمین فشار و چگالی هوا کاهش می‌یابد. برای درک بهتر فشار هوا فعالیت زیر را انجام دهید.

فعالیت ۵ـ۱۲

داخل یک بطری پلاستیکی مقدار کمی آب‌جوش بریزید و در آن را محکم ببندید. سپس آب سرد روی آن بریزید. مشاهده خود را به کلاس گزارش کنید و علت را در کلاس به بحث بگذارید.

مثال ۵ـ۶

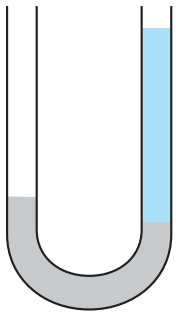
در عمق ۱۰ متری یک دریاچه فشار چقدر است؟ فشار هوا در سطح دریاچه را ۱/۰atm بگیرید.

پاسخ :

با توجه به رابطه ۵ـ۴ و مراجعه به جدول ۵ـ۱ فشار در عمق h را محاسبه می‌کنیم.

$$P=P_{۰}+\rho gh=۱/۰۱\times۱۰^{۵}+۱۰۰۰\times۹/۸\times۱۰=۱/۹۹\times۱۰^{۵}Pa=۱/۹۷atm$$

مثال ۵ـ۷



در یک لولهٔ U شکل، مقداری جیوه قرار دارد. در شاخهٔ سمت راست آنقدر آب می‌ریزیم تا ارتفاع آب به ۵۴/۴cm برسد (شکل روبه‌رو). اختلاف ارتفاع جیوه در دو شاخه چند سانتی‌متر است؟

پاسخ : نقاط A و B هر دو در جیوه هستند، هم‌ترازند و شاره نیز ساکن است. بنابراین

$$P_A=P_B$$

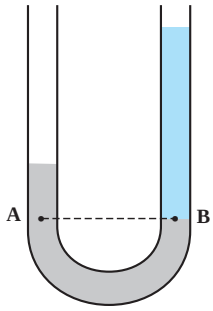
در نتیجه

$$P_{۰}+\rho_{جیوه}gh_{جیوه}=P_{۰}+\rho_{آب}gh_{آب}$$

$$\rho_{جیوه}h_{جیوه}=\rho_{آب}h_{آب}$$

$$۱۳/۶\times h_{جیوه}=۱\times۵۴/۴$$

$$h_{جیوه}=۴cm$$



که در آن از چگالی‌های جیوه و آب که در جدول ۵ـ۱ داده شده است استفاده کردیم.

رابطهٔ ۵ـ۳ را می‌توان برای گازها نیز به‌کار برد. مثلاً می‌توان اختلاف بین فشار هوای بالا و پایین یک ساختمان را با استفاده از این رابطه حساب کرد. با توجه به اینکه چگالی گازها خیلی کم است در محفظه‌های کوچک گاز که ارتفاع آنها کم است، اختلاف فشار در نقاط مختلف داخل محفظه ناچیز است و در نتیجه می‌توان فشار را در این موارد در تمام نقاط گاز یکسان گرفت.

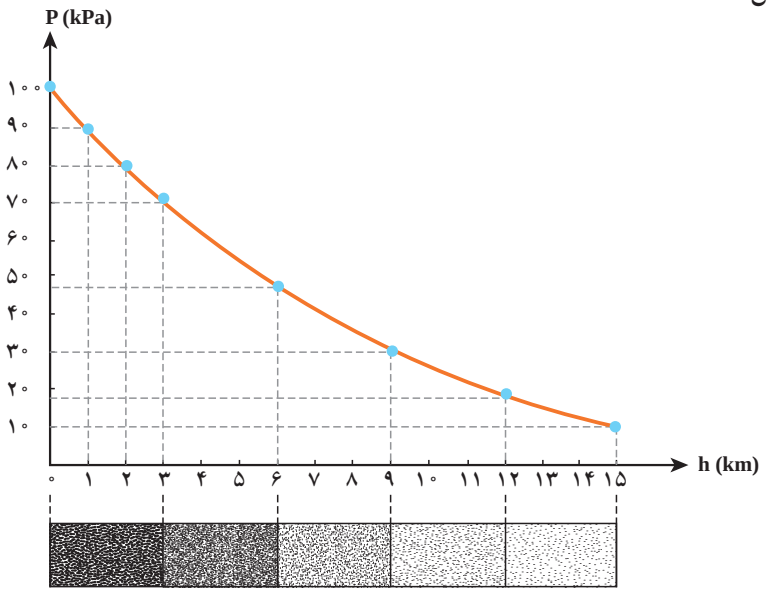
مثال ۵ـ۸

چگالی هوای تهران در دمای $۲۰^\circ C$ تقریباً $۱/۰ kg/m^۳$ است. اختلاف بین فشار هوای بالا و پایین برج آزادی، با ارتفاع ۴۵m، چقدر است؟

پاسخ :

$$P_۲=P_۱+\rho gh \Rightarrow P_۲-P_۱=\rho gh=۱/۰\times ۹/۸\times ۴۵ \simeq ۴۴۰ Pa$$

توجه کنید برای محاسبهٔ اختلاف فشار بین دو نقطه از هوا که اختلاف ارتفاع قابل توجهی دارند، نمی‌توان از رابطهٔ ۵ــ۳ استفاده کرد. زیرا با افزایش زیاد ارتفاع از سطح زمین، چگالی هوا به‌شدت کاهش می‌یابد. محاسبهٔ دقیق نشان می‌دهد تغییر فشار برحسب ارتفاع از سطح زمین مطابق نمودار شکل ۵ــ۱۳ است.



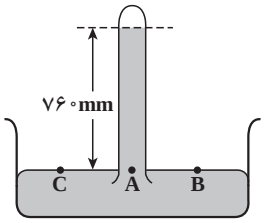
شکل ۵ــ۱۳ نمودار فشار هوا برحسب ارتفاع از سطح دریای آزاد. نوار زیر محور افقی تغییر چگالی هوا برحسب ارتفاع را نشان می‌دهد. لایه‌های با هوای فشرده‌تر که چگالی بیشتری دارند تیره‌تر نشان داده شده‌اند.

آزمایش توریچلّی : آزمایش زیر را توریچلّی[۱] (۱۶۴۷ــ۱۶۰۸م) فیزیکدان ایتالیایی در سال ۱۶۴۳ میلادی پیشنهاد کرد. در این آزمایش لولهٔ آزمایشی شیشه‌ای به طول حدود ۱m را با جیوه پر می‌کنند و آنگاه انتهای باز لوله را با انگشت می‌بندند و سپس آن را در تشت پر از جیوه به‌طور قائم وارونه می‌کنند[۲]. با برداشتن انگشت ستون جیوه در لوله مقداری پایین می‌آید. اگر آزمایش در سطح دریای آزاد انجام شود ارتفاع ستون جیوه از سطح جیوه در شرایط طبیعی در حدود ۷۶۰ mm می‌شود

۱ــ Evangelista Torricelli

۲ــ چون جیوه و بخار آن بسیار سمی است، ممکن است جذب پوست یا مخاط تنفسی شود. لذا از انجام این آزمایش توسط دانش‌آموزان خودداری شود.

(شکل ۵ــ۱۴). اگر آزمایش در محلی بالاتر از سطح دریای آزاد انجام شود، ارتفاع ستون جیوه کمتر خواهد بود. اکنون می‌توانیم فشار هوا در محل انجام آزمایش را تعیین کنیم.



شکل ۵ــ۱۴ــ طرحی از آزمایش توریچلّی

قبلاً دیدیم فشار در نقاط هم‌تراز شارهٔ ساکن، یکسان است. بنابراین

$$P_A=P_B=P_C$$

از طرفی می‌دانیم، فشار نقطه‌های B و C همان فشار جو است :

$$P_B=P_C=P_\circ=\text{فشار هوا}$$

و فشار در نقطه A برابر است با

$$P_A=\rho gh+\text{فشار فضای بالای لوله}$$

فشار فضای بالای لوله، که اصطلاحاً به آن *خلأ توریچلّی* گفته می‌شود، تقریباً صفر است (در این فضا، بخار جیوه با فشاری بسیار کم وجود دارد که قابل چشم‌پوشی است). بنابراین می‌توانیم بنویسیم :

$$P_A=\rho gh$$

و یا

$$P_\circ=\rho gh$$

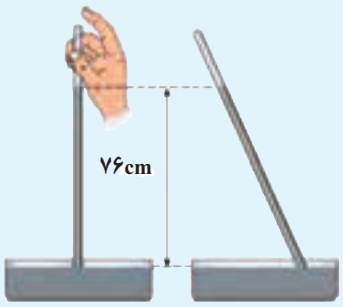
یعنی فشار هوا در محل انجام آزمایش برابر است با ρgh که در آن h ارتفاع ستون جیوه درون لولهٔ آزمایش توریچلّی است. بنابراین می‌توان از آزمایش توریچلّی برای اندازه‌گیری فشار جو استفاده کرد. براساس این آزمایش دستگاه‌های اندازه‌گیری فشار جو طراحی و ساخته شده‌اند که به آنها جوسنج یا بارومتر[1] گفته می‌شود.

با استفاده از جدول ۵ــ۱ فشار هوا در سطح دریای آزاد چنین می‌شود :

$$P_\circ=\rho gh=۱۳۶۰۰\times ۹/۸۱\times\frac{۷۶۰}{۱۰۰۰}\simeq ۱/۰۱\times ۱۰^{۵}\text{Pa}$$

همان‌طور که قبلاً دیدید به این مقدار فشار، ۱ atm می‌گویند. در نتیجه، فشار هوا در سطح دریای آزاد برابر با $۱/۰۱\times ۱۰^{۵}$Pa یا ۱ atm است. متداول است که به جای محاسبهٔ ρgh فشار را بر حسب ارتفاع ستون جیوه (معمولاً برحسب میلی‌متر) بیان می‌کنند. بنابراین فشار هوا در سطح دریای آزاد برابر با ۷۶۰ میلی‌متر جیوه (mmHg) است. به ۱ mmHg، به افتخار توریچلّی ۱ torr نیز گفته می‌شود.

فعالیت ۵ـ۱۳



الف) اگر در آزمایش توریچلّی لوله را از وضعیت قائم اندکی کج کنید، سطح جیوه در لوله بالا می‌رود ولی ارتفاع قائم جیوه در لوله تغییر نمی‌کند. علت را توضیح دهید.

ب) برای لولهٔ غیرموییین، اگر سطح مقطع لوله تغییر کند، ارتفاع ستون جیوه تغییر نمی‌کند. علت را توضیح دهید.

پ) چرا توریچلّی در آزمایش خود ترجیح داد به جای آب از جیوه استفاده کند؟

۱ــ barometer

شکل ۵ــ۱۵ــ دستگاه فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار خون

فشار پیمانه‌ای (سنجه‌ای)[1] : در زندگی روزمره آنچه اغلب به عنوان فشار یک شاره بیان می‌شود، در واقع اختلاف فشار شارهٔ مورد نظر با فشار هوای محیط است. مثلاً وقتی فشار خون یک بیمار ۱۲ (یعنی ۱۲۰ mmHg) بیان می‌شود (شکل ۵ــ۱۵) در واقع به این معنی است که فشار خون بیمار ۱۲۰ mmHg بیشتر از فشار هوا است یا وقتی می‌گویند فشار هوای درون لاستیک یک خودرو ۲/۲ atm است، یعنی فشار هوای داخل لاستیک، ۲/۲ atm از فشار هوای بیرون بیشتر است. به این اختلاف فشار، فشار پیمانه‌ای (سنجه‌ای) می‌گوییم و آن را با فشارسنج یا مانومتر[2] اندازه می‌گیریم :

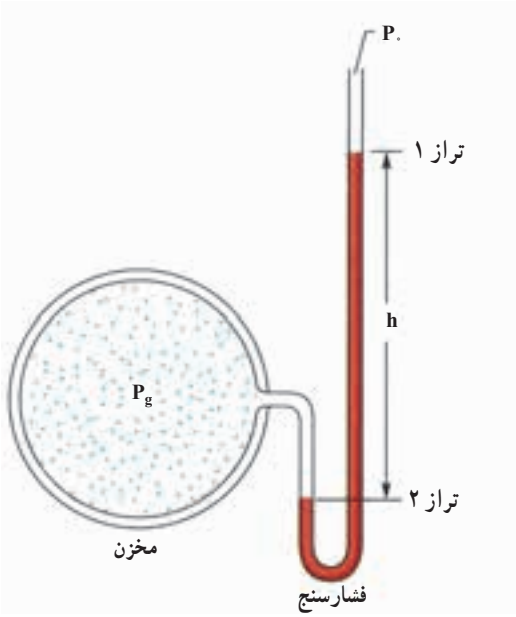
$P_g = P - P_0$ فشار پیمانه‌ای

که در آن، P فشار شاره و P_0 فشار هوای محیط است.

یکی از انواع متداول فشارسنج‌ها، فشارسنج U شکل است (شکل ۵ــ۱۶). لولهٔ فشارسنج U شکل، حاوی مایعی مانند جیوه، آب یا مایع دیگری با چگالی مشخص ρ است. برای اندازه‌گیری فشار گاز درون یک محفظه، آن را از یک طرف به دهانهٔ لوله وصل می‌کنند. اختلاف فشار گاز درون محفظه و فشار هوا سبب می‌شود که سطح مایع در دو شاخه یکسان نباشد. از این اختلاف سطح می‌توان برای اندازه‌گیری اختلاف فشار گاز درون محفظه (P) و فشار هوای محیط (P_0) استفاده کرد.

$$P - P_0 = \rho g h$$

$$P_g = \rho g h \qquad (۵ــ۵)$$



شکل ۵ــ۱۶ــ برای اندازه‌گیری فشار پیمانه‌ای گاز در مخزن، لوله U شکل حاوی مایع قرمز که به جو راه دارد به مخزن متصل شده است.

با دانستن چگالی مایع (ρ)، شتاب جاذبه (g) و اندازه‌گیری ارتفاع h، P_g که همان فشار پیمانه‌ای گاز درون محفظه است، تعیین می‌شود.

توجه کنید که هرچند در اغلب موارد P_g کمیتی مثبت است ولی می‌توان حالت‌هایی را یافت که برای آنها P_g مقداری منفی است. درواقع فشار پیمانه‌ای بسته به اینکه $P > P_0$ یا $P < P_0$ باشد، می‌تواند مثبت یا منفی باشد.

فعالیت ۵ـ۱۴

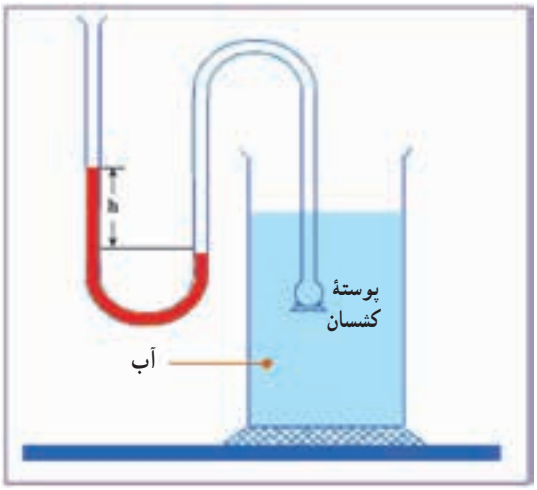
با استفاده از یک شیلنگ پلاستیکی شفاف و نرم، خط‌کش و مقداری آب رنگی فشارسنج U شکلی بسازید. پیستون سرنگ ۵۰ cc را تا نیمه بیرون بکشید و سر آن را به لولهٔ فشارسنج وصل کنید. با جابه‌جا کردن پیستون، هر بار فشار پیمانه‌ای هوای درون سرنگ را اندازه بگیرید. در مورد مثبت یا منفی بودن فشار پیمانه‌ای هوای درون سرنگ بحث کنید.

۱ــ gauge pressure
۲ــ manometer

آزمایش ۵ـ۱

وسایل لازم :

قیف، پوستهٔ کشسان، سطل پر از آب، لولهٔ Uشکل شیلنگ شفاف



شرح آزمایش :

۱ــ انتهای قیف را مطابق شکل به کمک شیلنگ به یک شاخهٔ لولهٔ Uشکل وصل کنید.

۲ــ در لولهٔ Uشکل مقداری آب رنگی بریزید.

۳ــ به دهانهٔ قیف، پوسته‌ای کشسان مانند بادکنک را وصل کنید.

۴ــ با وارد کردن قیف در سطل آب موارد زیر را تحقیق کنید.

الف) چگونگی بستگی فشار به عمق

ب) یکسان بودن فشار در نقاط هم‌عمق

پ) عدم بستگی فشار در هر نقطه از مایع به جهت‌گیری پوسته در آن نقطه.

از این آزمایش می‌توان نتیجه گرفت که فشار وارد بر پوسته به جهت‌گیری پوسته بستگی ندارد و فقط به مکانی وابسته است که پوسته در آن قرار دارد. یعنی در یک عمق معین فشار وارد بر پوسته در وضعیت افقی و قائم پوسته یکسان است.

مثال ۵ـ۹

فرض کنید در شکل ۵ــ۱۶ مایع درون لوله جیوه و اختلاف ارتفاع جیوه در دو شاخه ۱۲ cm است.

الف) فشار پیمانه‌ای گاز درون محفظه چند میلی‌متر جیوه است؟

ب) اگر فشار هوا ۷۵۰ mmHg باشد، فشار گاز درون محفظه چند میلی‌متر جیوه است؟

پاسخ :

الف)

$$P_g = P - P_0 = \rho gh$$

همان‌طور که پیشتر گفتیم معمولاً به جای محاسبهٔ ρgh، فشار برحسب ارتفاع ستون جیوه بیان می‌شود. بنابراین

$$P_g = ۱۲\,cmHg = ۱۲۰\,mmHg$$

ب)

$$P_g = P - P_0 \Rightarrow ۱۲۰ = P - ۷۵۰ \Rightarrow P = ۸۷۰\,mmHg$$

فعالیت ۵ـ۱۵

در مورد انواع دیگر فشارسنج‌ها تحقیق کنید و چگونگی کارکرد آنها را به کلاس گزارش دهید.

شکل ۵ــ۱۷ وقتی لولهٔ خمیر دندان را فشار می‌دهید، اصل پاسکال را مشاهده می کنید.

اصل پاسکال : معمولاً برای استفاده از خمیردندان، لولهٔ پر خمیردندان را فشار می‌دهیم تا خمیر از دهانهٔ لوله خارج شود (شکل ۵ــ۱۷). هرگاه پیستون سرنگ پر از مایع را فشار دهیم، مایع از نوک سوزن با فشار خارج می‌شود و هرچه فشار وارد بر پیستون را بیشتر کنیم، مایع از نوک سوزن با فشار بیشتری خارج می‌شود.

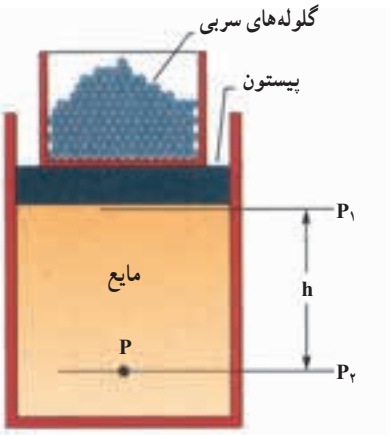
مطابق شکل ۵ــ۱۸ ظرفی استوانه‌ای و پر از مایع به چگالی ρ را درنظر بگیرید که با پیستونی مسدود شده است. روی پیستون گلوله‌هایی سربی قرار می‌دهیم. فشار ناشی از جو، وزن پیستون و وزن گلوله‌ها را در نقطهٔ (۱) با P_1 نشان می‌دهیم. می‌دانیم که فشار در عمق دلخواه h از این ظرف به اندازهٔ ρgh بیشتر از نقطهٔ (۱) است :

$$P_2=P_1+\rho gh$$

حال اگر مقدار گلوله‌های روی پیستون را تغییر دهیم مقدار P_1 نیز تغییر می‌کند. با توجه به تراکم‌ناپذیری مایع و ثابت ماندن مقدار ρgh، P_2 نیز به اندازهٔ P_1 تغییر خواهد کرد. یعنی تغییر فشار این دو نقطه یکسان است و به ارتفاع h بستگی ندارد.

بلیز پاسکال[1]، دانشمند فرانسوی، این موضوع را برای اولین بار بررسی کرد و نتیجهٔ تحقیقات خود را در سال ۱۶۵۲ میلادی به چاپ رساند. این نتیجه امروزه به عنوان اصل پاسکال معروف است و چنین بیان می‌شود :

هر تغییری در فشار وارد بر هر شارهٔ تراکم ناپذیر و محبوس، بدون هیچ کم و زیاد به تمام بخش‌های شاره و دیواره‌های ظرف منتقل می‌شود.



شکل ۵ــ۱۸ــ با تغییر فشار خارجی P_1، با توجه به تراکم‌ناپذیری مایع، فشار در همهٔ نقاط داخل مایع نیز به همان اندازه تغییر می‌کند.

فعالیت ۵ـ۱۶

یک سرنگ کوچک (مثل سرنگ انسولین)، لولهٔ لاستیکی سرم یا آکواریوم به‌طول حدود ۵۰ cm، یک سرنگ بزرگ‌تر ۵۰ cc (و یا با حجم بیشتر) و مقداری آب رنگی آماده کنید. در سرنگ بزرگ تا حدود ۲۰ cc آب بکشید و سرنگ انسولین را پر از آب کنید. لولهٔ لاستیکی پر از آب را از یک سر به سرنگ بزرگ و از سر دیگر به سرنگ انسولین وصل کنید. توجه داشته باشید که در سرنگ‌ها یا لوله نباید حباب هوا باشد. با هر دست خود بر یکی از پیستون‌ها نیرو وارد و تفاوت بزرگی نیروها را تجربه کنید.

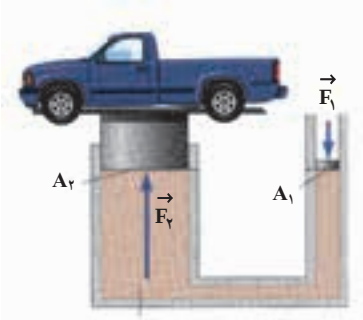
۱ــ Blaise Pascal

بالا برهیدرولیکی : بالابرهای هیدرولیکی براساس اصل پاسکال طراحی می‌شوند. از این دستگاه برای بالا بردن اجسام سنگین مانند خودرو (برای تعویض چرخ‌ها یا تعمیر آنها) استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این بالابر در شکل ۵ــ ۱۹ نشان داده شده است.

به‌طور معمول و بدون آنکه وسیله‌ای روی بالابر قرار گیرد، فشار در محل پیستون‌های کوچک و بزرگ به ترتیب P_1 و P_2 است. با قرار گرفتن هر چیز سنگینی مانند خودرو روی پیستون بزرگ، فشار این پیستون به اندازهٔ $\frac{F_2}{A_2}$ افزایش می‌یابد (F_2 در این حالت برابر با وزن خودرو است). اگر مایع در تعادل باشد، طبق اصل پاسکال، در محل پیستون کوچک هم به همان اندازه افزایش فشار خواهیم داشت. برای آنکه پیستون کوچک در تعادل بماند، باید نیروی وارد بر آن به اندازهٔ F_1 افزایش یابد، طوری‌که تغییر فشار در محل پیستون‌ها با هم برابر باشد، در نتیجه :

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \qquad (۶ــ۵)$$

از این دستگاه علاوه‌بر بالابردن اجسام، برای پرس یا خرد کردن نیز استفاده می‌شود.



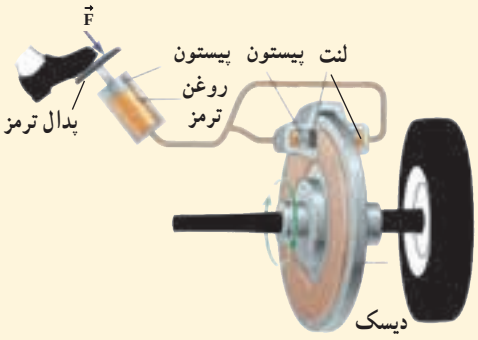
شکل ۵ــ۱۹ــ طرح ساده شده‌ای از یک بالابر هیدرولیکی

بلیز پاسکال

ریاضیدان، فیزیکدان، مخترع و فیلسوف فرانسوی در ۱۹ ژوئن ۱۶۲۳م. (۱۰۰۲هـ.ش) در فرانسه به دنیا آمد. او کودکی نابغه بود که تمام تحصیلات خود را زیر نظر پدرش به انجام رسانید و در هیچ دانشگاهی به‌طور آکادمیک تحصیل نکرد. او در سال ۱۶۴۵ در حالی که فقط ۲۲ سال داشت نخستین ماشین حساب مکانیکی را پس از ۳ سال تلاش شبانه‌روزی اختراع کرد. این ماشین‌ها به *حسابگرهای پاسکال* مشهور شد. پاسکال یکی از مهم‌ترین ریاضی‌دانان تاریخ بود که در دو شاخهٔ تحقیقاتی جدید در ریاضیات، هندسهٔ تصویری و نظریهٔ احتمالات نقشی اساسی بازی کرد. او همچنین در علوم طبیعی و کاربردی نیز یکی از سرآمدان دوران خود بود و با تعمیم کار توریچلی نقشی مهم در تبیین مفاهیم علم شاره‌ها از جمله در تبیین مفاهیم فشار شاره و خلأ داشت. او در پایان عمر، مطالعات خود را بر روی فلسفه متمرکز کرد و در حالی که فقط ۳۹ سال داشت در ۱۹ آگوست ۱۶۶۲م. (۱۰۴۱ هـ.ش) در پاریس درگذشت.

تمرین ۵ـ۲

شکل زیر طرح‌وارهٔ ساده‌ای از دستگاه ترمز خودرویی را نشان می‌دهد. با استفاده از اصل پاسکال توضیح دهید که این دستگاه چگونه کار می‌کند.



پرسش‌های فصل پنجم

۱ در هنگام پاک کردن تخته سیاه ذرات گچ به‌طور نامنظم به‌اطراف حرکت می‌کنند. حرکت نامنظم آنها را چگونه می‌توان توجیه کرد؟

۲ قطعه‌ای فلزی به شما داده شده است و ادعا می‌شود که از طلای خالص ساخته شده است. چگونه می‌توانید درستی این ادعا را بررسی کنید؟

۳ چرا موهای خیس به هم فشرده می‌شوند؟

۴ وزن $1m^3$ شن تقریباً سه برابر وزن $1m^3$ آب است. چرا بادهای نسبتاً ضعیف توده‌های شن را در صحرا به حرکت درمی‌آورند، حال آنکه براثر یک توفان حتی شدید فقط یک مقدار مختصر آب دریا به سمت بالا پاشیده می‌شود؟

۵ رابطهٔ فشار هوا با ارتفاع از سطح زمین پیچیده است، امّا می‌توان نشان داد که تا ارتفاع ۲۰۰۰ متری از سطح زمین فشار هوا تقریباً به‌ازای هر ۱۰m، یک میلی‌متر جیوه کاهش می‌یابد. با این اطلاعات فشار هوا را در محل زندگی خود برآورد کنید.

۶ چرا تنفس یک شناگر با لوله‌ای بلند که تا سطح آب ادامه دارد می‌تواند به‌شدت خطر آفرین باشد؟

مسائل فصل پنجم

۱ تخمین بزنید که هوای داخل کلاس شما چند کیلوگرم است؟ اگر تمام آن را مایع کنیم چه حجمی را اشغال می‌کند؟ (از جدول ۵ــ۱ استفاده کنید.)

۲ در چه عمقی از دریا فشار ۱۰ برابر فشار جو در سطح دریا است؟ (چگالی آب دریا را $1150 kg/m^3$ فرض کنید.)

۳ اختلاف فشار ناشی از اختلاف ارتفاع بین مغز و پای شخصی به بلندی 1/83m چقدر است؟ چگالی خون $1/06\times10^3 kg/m^3$ است.

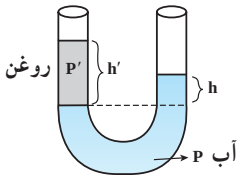
۴ برای نوشیدن آب به چگالی $1000 kg/m^3$ با استفاده از نی، تا ارتفاع بیشینهٔ 10cm، اختلاف فشار هوای درون دهان با فشار هوای بیرون که باید ایجاد کنیم چقدر است؟

۵ طول و عرض و ارتفاع یک اتاق 3/5 m، 4/2 m و 2/4 m است.

الف) وزن هوای درون اتاق در فشار 1atm و دمای $0^\circ C$ چقدر است؟

ب) نیروی وارد از هوای داخل اتاق بر کف آن چقدر است؟

۶ در یک ظرف لوله Uشکلِ حاوی آب، مطابق شکل مقابل مقداری روغن ریخته‌ایم.

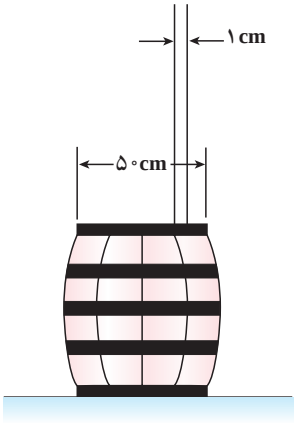


الف) نشان دهید :

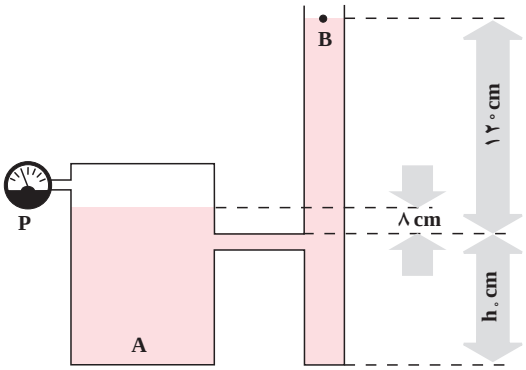
$$\frac{h'}{h}=\frac{\rho}{\rho'}$$

که در آن ρ' چگالی روغن و ρ چگالی آب و h' ارتفاع ستون روغن است.

ب) چگونه می‌توان با این روش چگالی یک مایع نامعلوم را تعیین کرد؟ این آزمایش را انجام دهید و درستی رابطهٔ بالا را تحقیق کنید.



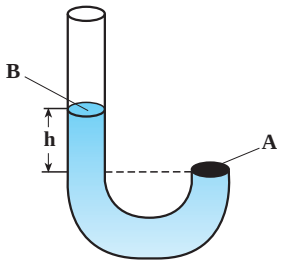
۷ آزمایش شکل روبه‌رو را پاسکال برای اولین بار انجام داد. لوله باریک و بلندی را به بشکه‌ای وصل کرد و در داخل لوله آب ریخت. هنگامی که ارتفاع آب در لوله به ۱۵/۳ متر رسید درپوش بشکه رها شد. اگر قطر درپوش ۵۰cm باشد، در این لحظه چه نیرویی از طرف آب به درپوش وارد شده است؟ قطر داخلی لوله ۱cm است.



۸ اگر در مخزن شکل روبه‌رو آب بریزیم، وقتی سطح مایع از h_0 بالاتر می‌رود، هوا در داخل ظرف A به دام می‌افتد. اگر سطح مایع در ظرف A، ۸cm بالاتر از h_0 و در B، ۱۲۰cm بالاتر از h_0 باشد:

الف) فشارسنج چه عددی را نشان می‌دهد؟ (این فشارسنج فشار پیمانه‌ای را اندازه‌گیری می‌کند.)

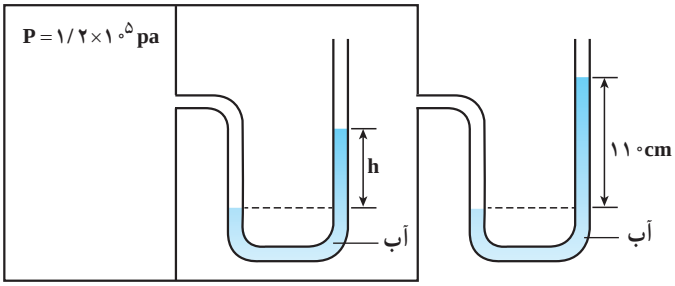
ب) فشار کل گاز محبوس چقدر است؟



۹ در شکل روبه‌رو مایعی به چگالی ρ در داخل لولهٔ U شکل ریخته شده و انتهای سمت راست آن با درپوشی بسته شده است. مایع تمام بخش سمت راست لوله را اشغال کرده است. اختلاف ارتفاع در نقاط A و B برابر h است.

الف) فشار مایع در A چقدر است؟

ب) اگر شعاع لوله r باشد، چه نیرویی از طرف مایع به درپوش A وارد می‌شود؟



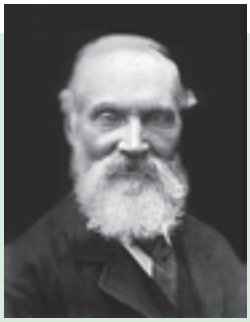
۱۰ در شکل روبه‌رو مقدار h چند سانتی‌متر است؟ فشار هوا را $۱\times۱۰^۵ Pa$ و چگالی آب را $۱ g/cm^۳$ بگیرید.

۶ گرما و قانون گازها

کویر لوت با دمای بیشینه‌ای در حدود $۷۰^{\circ}C$ در روزهای آفتابی یکی از گرم‌ترین نقاط جهان است.

چرا پارچهٔ خیسی که روی بندی پهن شده است، ساعتی بعد خشک می‌شود؟ چگونه بادهای ساحلی به‌وجود می‌آیند؟ چگونه شیشه‌های دوجداره مانع از اتلاف گرما می‌شوند؟ چگونه با اسپری کردن باغ‌های میوه می‌توان از یخ‌زدن آنها در شب‌های سرد جلوگیری کرد؟ چرا بیشتر پل‌ها به‌صورت بخش‌هایی مجزا ساخته می‌شوند که فاصلهٔ کمی بین آنها وجود دارد؟ پالتوها چگونه ما را از سرما محافظت می‌کنند؟ چگونه موهای خرس‌های قطبی می‌تواند آنها را از سرمای کشندهٔ قطب در امان نگه دارد؟ چگونه قندیل‌های یخی گسترش می‌یابند؟

پاسخ این پرسش‌ها و بسیاری از پرسش‌های مشابه را می‌توان با بررسی گرما و اثرهای آن به‌دست آورد. شما در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با مفهوم‌های فیزیکی دما و گرما آشنا شدید. در این فصل ضمن یادآوری آن مفهوم‌ها به بررسی روش گرماسنجی و اندازه‌گیری گرمای ویژه، تغییر حالت مواد و گرمای ذوب و تبخیر می‌پردازیم. علاوه بر این، اثر تغییر دما بر طول یا حجم جامدها، مایع‌ها و گازها را بررسی می‌کنیم و راه‌های انتقال گرما را مورد بحث قرار می‌دهیم و سرانجام قانون گازها را به‌طور مختصر بررسی می‌کنیم.



ویلیام تامسون کلوین[1]
ریاضیدان، فیزیکدان و مهندس بریتانیایی در ۲۸ ژوئن ۱۸۲۴م. (۱۲۰۳ هـ.ش) در شهر بلفاست ایرلند به دنیا آمد. او تحصیلات دانشگاهی خود را در دانشگاه گلاسکو به انجام رسانید و در این دوران، غیر از اختراعات مختلف، کارهای مهمی در تحلیل ریاضی‌وار الکتریسیته و نیز فرمول‌بندی قوانین اول و دوم ترمودینامیک انجام داد و نقشی مهم در احیای رشتهٔ فیزیک در عصر مدرن ایفا کرد. با این حال، عمدهٔ شهرت کلوین به‌خاطر تعیین دقیق صفر مطلق برابر با $-273/15^{\circ}C$ است و این در حالی است که پیش از او *سَدی کارنوی* فرانسوی در سال ۱۸۲۴، یعنی همان سالی که کلوین زاده شد، مقدار ۲۶۷- را برای دمای صفر مطلق پیشنهاد داده بود. با این وصف، یکای دما در SI به افتخار این کار کلوین، به اسم او نامگذاری شده است. او همچنین به خاطر دستاوردهای علمی خود از سال ۱۸۹۲ به لُرد کلوین ملقب شد و اولین دانشمند بریتانیایی نام گرفت که به مجلس لُردها راه یافت. کلوین در ۱۷ دسامبر ۱۹۰۷ م. (۱۲۸۶ هـ.ش) در سن ۸۳ سالگی در اسکاتلند دیده از جهان فرو بست.

۶ـ۱ دما، انرژی درونی و گرما

دما از دیدگاه میکروسکوپی به انرژی جنبشی مولکول‌های ماده بستگی دارد ولی این ارتباط بسیار پیچیده است و از این‌رو شاید شروع خوبی برای تعریف دما نباشد. در این کتاب، دما را از دیدگاه ماکروسکوپی بررسی می‌کنیم. از این دیدگاه، دما کمیتی است که میزان سردی و گرمی اجسام را مشخص می‌کند. به این منظور لازم است یک مقیاس دمایی به‌وجود آوریم و برای این کار می‌توان از هر مشخصهٔ قابل اندازه‌گیری‌ای بهره بگیریم که با گرمی وسردی جسم تغییر می‌کند که به آن کمیت دماسنجی می‌گوییم.

فعالیت ۶ـ۱

در فصل ۱ گفتیم برای آنکه تعریف یک کمیت فیزیکی کامل شود، باید یکای آن و نیز روش و ابزار اندازه‌گیری آن مشخص شود. دما را به عنوان یک کمیت فیزیکی تعریف کنید، یعنی در مورد ابزار و روش اندازه‌گیری آن توضیح دهید و یکای آن‌را مشخص کنید. (برای این کار می‌توانید از کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه و یا هر کتاب فیزیک مناسب دیگری استفاده کنید.)

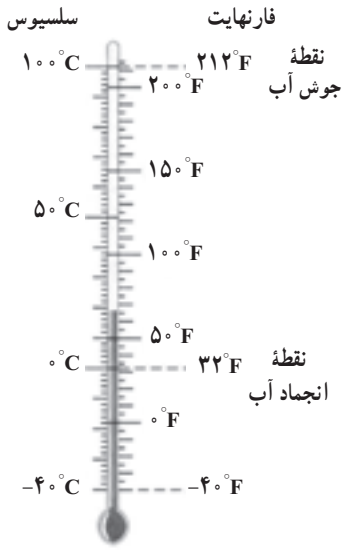
مقیاس‌های دما : یکای متداول دما درجهٔ سلسیوس است که با نماد $^{\circ}C$ نمایش داده می‌شود. دما بر حسب درجهٔ سلسیوس را معمولاً با θ نشان می‌دهند.

۱ـ William Thomson Baron Kelvin

در SI به جای سلسیوس، یکای دیگری به نام کلوین را به‌کار می‌برند که با نماد K نمایش داده می‌شود. دما بر حسب کلوین را معمولاً با T نشان می‌دهند. رابطهٔ میان دما در مقیاس‌های سلسیوس و کلوین به‌صورت زیر است :

$$T = \theta + ۲۷۳ \qquad (۱\text{ــ}۶)$$

بنا به رابطهٔ ۶ــ۱، صفرِ کلوین برابر $-۲۷۳^\circ C$ است[1]. یکای رایج دیگر دما، فارنهایت است که امروزه در صنعت کاربرد فراوانی دارد (شکل ۶ــ۱).



شکل ۶ــ۱ــ مقایسهٔ یکاهای سلیسوس و فارنهایت

$$\text{دما در مقیاس فارنهایت} = \frac{۹}{۵}\theta + ۳۲$$

تمرین ۶ــ۱

دمای ذوب یخ، $۰^\circ C$، دمای جوش آب، $۱۰۰^\circ C$ و دمای بدن انسان سالم، $۳۷^\circ C$ است.
هر یک از این دماها برابر چند کلوین و چند درجهٔ فارنهایت است؟

مثال ۶ــ۱

نشان دهید که اختلاف بین دو دما در مقیاس‌های سلسیوس و کلوین با هم برابر است.

پاسخ :

$$\Delta T = T_۲ - T_۱$$
$$= (\theta_۲ + ۲۷۳) - (\theta_۱ + ۲۷۳)$$
$$= \theta_۲ - \theta_۱$$

در نتیجه :

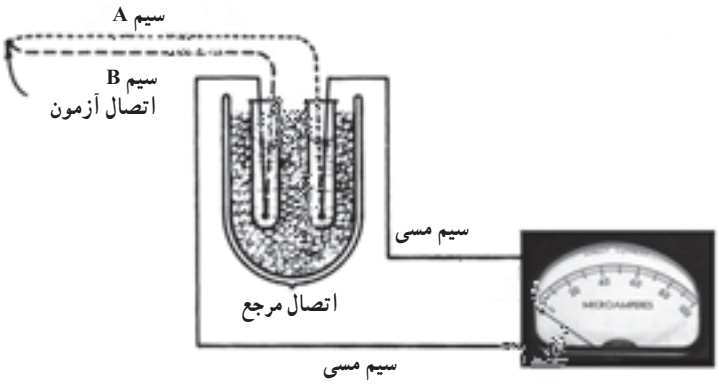
$$\Delta T = \Delta\theta$$

دماسنجی : همان‌طور که پیش‌تر گفتیم برای دماسنجی از هر خاصیت قابل اندازه‌گیری استفاده می‌کنیم که با گرمی و سردی جسم تغییر می‌کند. مثلاً در دماسنج‌های جیوه‌ای یا الکلی که در کتاب فیزیک ۱ و آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت، کمیت دماسنجی ارتفاع مایع درون لولهٔ دماسنج است. دماسنج ترموکوپل (شکل ۶ــ۲) نمونهٔ دیگری از دماسنج‌هاست که کمیت دماسنجی در آن جریان الکتریکی است.

مطابق شکل ۶ــ۲ دو سیم فلزی غیرهمجنس A و B از طرفی در دمای ذوب یخ نگه داشته شده‌اند و از طرف دیگر در مکانی به هم متصل‌اند که می‌خواهیم دمای مجهول آن را به‌دست آوریم. این مجموعه شامل دو اتصال با سیم‌های مسی رابط است که به یک آمپرسنج یا گالوانومتر بسته می‌شود. با افزایش دمای مورد اندازه‌گیری، شدت جریان در مدار بیشتر می‌شود. اگر آزمایش را چندین بار و برای دماهای

۱ــ صفر کلوین به‌طور دقیق برابر $-۲۷۳/۱۵^\circ C$ است ولی برای محاسبه‌های این کتاب همان مقدار تقریبی $-۲۷۳^\circ C$ مناسب است.

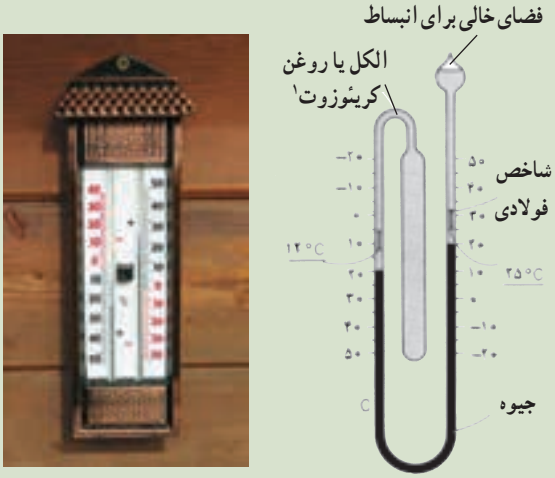
متفاوت تکرار کنیم می‌توانیم شدت جریان مربوط به هر دمایی را مشخص کنیم. گسترهٔ دماسنجی یک ترموکوپل می‌تواند از صفر تا حدود $1600^{\circ}C$ باشد. مزیت ترموکوپل در این است که به خاطر جرم کوچک، خیلی سریع با دستگاهی که دمای آن اندازه‌گیری می‌شود به حال تعادل گرمایی می‌رسد.



شکل ۶ــ۲ــ طرحی از یک دماسنج ترموکوپل

دماسنج بیشینه ـ کمینه : این دماسنج نوع ویژه‌ای از دماسنج‌های مایعی است که بیشینه و کمینهٔ دما را در یک مدت زمان معین نشان می‌دهد. از این دماسنج معمولاً در مراکز پرورش گل وگیاه، باغداری، هواشناسی و ... استفاده می‌کنند. شکل زیر طرح‌واره‌ای از این نوع دماسنج را نشان می‌دهد.

هنگامی که دما بالا می‌رود، به سبب انبساط الکل (در لولهٔ سمت چپ شکل)، جیوه در لولهٔ سمت راست به بالا رانده می‌شود و شاخص فولادی لولهٔ سمت راست را با خود بالا می‌برد.



شکل ۶ــ۳ــ طرح‌واره‌ای از یک دماسنج بیشینه ــ کمینه و شکلی واقعی از یکی از انواع آن

اگر سطح جیوه در لولهٔ سمت راست پایین بیاید، شاخص فولادی، که به آن فنرهای ریزی متصل است، همراه با آن حرکت نمی‌کند و در همان محل قبلی خود در مقابل دمای بیشینه می‌ایستد.

هنگامی که الکل به علت کاهش دما منقبض می‌شود، جیوه از طرف چپ لولهٔ U شکل بالا می‌رود و شاخص فولادی دیگر را در این طرف لوله بالا می‌راند. اگر سطح جیوه در لوله سمت چپ پایین بیاید شاخص فولادی سمت چپ نیز که به آن فنرهای ریزی متصل است، همراه با آن حرکت نمی‌کند و در همان محل قبلی خود در مقابل دمای کمینه می‌ایستد.

با استفاده از آهنربا، این دو شاخص در پایان مدت زمان مورد نظر به سطح جیوه برگردانده می‌شوند.

در طراحی جدید این نوع دماسنج‌ها به علت سمی‌بودن جیوه از مایع ترکیبی جدیدی به‌عنوان جایگزین استفاده می‌شود.

۱ــ Creosote

گرما و تعادل گرمایی : در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه دیدیم که گرما مقدار انرژی‌ای است که به دلیل اختلاف دما، بین دو جسم مبادله می‌شود. با توجه به قانون پایستگی انرژی، انرژی‌ای که جسم با دمای بالاتر از دست می‌دهد، برابر انرژی‌ای است که جسم با دمای پایین‌تر می‌گیرد. این مبادلهٔ گرما تا زمانی ادامه می‌یابد که دمای دو جسم یکسان شود، و از آن پس دیگر گرمایی بین دو جسم مبادله نمی‌شود. در این حالت می‌گوییم دو جسم با هم در تعادل گرمایی‌اند و دمای مشترک آنها را دمای تعادل می‌نامیم.

برای مثال اگر یک قطعه فلز داغ را در یک ظرف آب سرد بیندازیم، گرما از قطعه فلز با دمای بالاتر به آب با دمای پایین‌تر، شارش می‌کند. این شارش گرما تا زمانی ادامه می‌یابد که قطعهٔ فلز و آب هم‌دما شوند و به دمای تعادل برسند.

تغییر دما ــ گرمای ویژه : در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه مقدار گرمای لازم برای ایجاد یک تغییر دمای معین را محاسبه کردیم. دیدیم که برای ایجاد یک تغییر معین در دمای جسم‌های مختلف به مقدارهای متفاوت گرما نیاز است. گرمای ویژه هر جسم را که با نماد c نمایش داده می‌شود به صورت زیر تعریف کردیم :

گرمای ویژهٔ هر جسم، مقدار گرمایی است که باید به یک کیلوگرم از آن جسم داده شود تا دمای آن یک درجهٔ سلسیوس (یا یک کلوین) افزایش یابد.

به این ترتیب گرمای Q برای ایجاد تغییر دمای ΔT یا $\Delta\theta$ برای m کیلوگرم از یک جسم برابر است با

$$Q = mc\Delta\theta = mc\,(\theta_2 - \theta_1) = mc(T_2 - T_1) \qquad (۶ــ۲)$$

در این رابطه‌ها Q (گرما) بر حسب ژول، m (جرم) بر حسب کیلوگرم، $\Delta\theta$ (تغییر دما) برحسب درجهٔ سلسیوس و ΔT بر حسب کلوین است. یکای c با استفاده از رابطه ۶ــ۲، $J/kg.^\circ C$ یا $J/kg.K$ است. گرمای ویژهٔ برخی از مواد در جدول ۶ــ۱ داده شده است.

جدول ۶ــ۱ــ گرمای ویژه برحسب ژول بر کیلوگرم کلوین

ماده	گرمای ویژه	ماده	گرمای ویژه
سرب	۱۳۰	بتون	۸۰۰
جیوه	۱۴۰	گرانیت	۸۰۰
نقره	۲۴۰	سنگ مرمر	۸۸۰
برنج	۳۸۰	آلومینیم	۹۰۰
مس	۳۹۰	یخ ($0^\circ C$)	۲۱۰۰
فولاد[1]	۴۵۰	اتانول	۲۴۳۰
استیل ضد زنگ	۴۹۰	آب دریا	۳۹۰۰
شیشه	۵۰۰ــ۸۵۰	آب	۴۲۰۰

۱ــ آلیاژ آهن با ۲٪ کربن

اگر دمای جسم در اثر مبادلهٔ گرما بالا رود $\theta_2 > \theta_1$ و $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 > 0$ و رابطهٔ ۶ــ۲ مقدار مثبتی برای Q به‌دست می‌دهد ($Q > 0$) در حالی که اگر دمای جسم با مبادلهٔ گرما کاهش یابد، $\theta_2 < \theta_1$ و $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 < 0$، و مقداری که برای Q به‌دست می‌آید منفی خواهد بود ($Q < 0$).

پس می‌توان گفت که علامت Q در رابطهٔ ۶ــ۲ مشخص می‌کند که جسم گرما گرفته است ($Q > 0$) یا گرما داده است ($Q < 0$). از این پس در این کتاب همواره گرما برای جسمی که گرما را می‌گیرد مثبت و برای جسمی که گرما را از دست می‌دهد منفی در نظر گرفته می‌شود.

مثال ۶ـ۲

یک قطعهٔ ۱۰۰ گرمی از مس را که دمای آن $90^\circ C$ است در یک ظرف آب سرد می‌اندازیم، دمای تعادل به $24^\circ C$ می‌رسد. گرمای Q را برای مس حساب کنید.

پاسخ : $m = 100g = 0/1kg$ ، $\theta_1 = 90^\circ C$ ، $\theta_2 = 24^\circ C$ و گرمای ویژه مس با استفاده از جدول ۶ــ۱ برابر با $c = 390 J/kg.^\circ C$ است.

از رابطهٔ ۶ــ۲ برای مس، به‌دست می‌آوریم :

$$Q = mc\Delta\theta = 0/1 \times 390 \times (24-90)$$
$$= 39 \times (-66) = -2574J \simeq -2/6kJ$$

علامت منفی که در محاسبهٔ Q به‌دست آمده، نشان می‌دهد که مس گرما از دست داده است.

مثال ۶ـ۳

فرستنده‌ها و گیرنده‌های الکترونیکی درون ماهواره‌ها نیز مانند فرستنده‌ها و گیرنده‌های زمینی دارای یک بازده مشخص هستند و تنها بخشی از انرژی دریافتی را به انرژی مورد نظر تبدیل می‌کنند. فرض کنید انرژی‌ای که چنین دستگاهی از سلول‌های خورشیدی متصل به ماهواره در هر ثانیه دریافت می‌کند ۱۰J و انرژی‌ای که فرستندهٔ امواج به سمت زمین گسیل می‌کنند ۳J باشد. همچنین فرض کنید جنس این دستگاه از سیلیکون با گرمای ویژهٔ $700 J/kg.^\circ C$ و جرم آن ۰/۵ کیلوگرم است. در مدت ۱۰۰ ثانیه :

الف) دستگاه چقدر انرژی دریافت و چقدر انرژی گسیل کرده است؟

ب) با توجه به پایستگی انرژی، افزایش انرژی درونی دستگاه چقدر است؟

پ) افزایش انرژی درونی، معادل گرمایی است که سبب افزایش دمای دستگاه می‌شود. افزایش دمای دستگاه چقدر است؟

پاسخ :

الف) اگر انرژی را با E و توان را با P نشان دهیم، $E = Pt$ است و درنتیجه،

$$E_{\text{دریافت}} = P_{\text{دریافت}}\, t = 10 \times 100 = 1000J$$
$$E_{\text{گسیل}} = P_{\text{گسیل}}\, t = 3 \times 100 = 300J$$

ب) اگر تغییر انرژی درونی دستگاه را با ΔU نمایش دهیم، با استفاده از قانون پایستگی انرژی داریم :

$$\Delta U = E_{\text{دریافت}} - E_{\text{گسیل}} = 1000 - 300 = 700J$$

پ)

$$\Delta U = Q = mc\Delta\theta$$

$$۷۰۰ = ۰/۵ \times ۷۰۰ \times \Delta\theta \Rightarrow \Delta\theta = ۲^\circ C$$

این افزایش دما دائمی نیست و پس از مدتی دمای دستگاه ثابت می‌ماند. پس از آنکه دمای دستگاه به مقدار معینی رسید، سازوکارهایی وجود دارد که مانع از افزایش بیشتر دمای دستگاه می‌شود.

دمای تعادل : اگر دو یا چند جسم با دماهای مختلف در تماس با یکدیگر قرار گیرند و پس از مدتی همدما شوند، دمای تعادل را می‌توان با استفاده از قانون پایستگی انرژی محاسبه کرد. در این حالت بعضی از اجسام گرما از دست می‌دهند؛ برای این اجسام $Q<۰$ است. بقیهٔ اجسام گرما می‌گیرند؛ برای این اجسام $Q>۰$ است. بنا به قانون پایستگی انرژی همان‌قدر که اجسام گرم انرژی از دست می‌دهند، اجسام سرد انرژی می‌گیرند. یعنی حاصل جمع این Qها صفر است :

$$Q_۱+Q_۲+Q_۳+\ldots=۰ \qquad (۶\text{ـ}۳)$$

مثال ۶ـ۴

یک قطعهٔ ۱۴۰ گرمی آلومینیم را که دمای آن $۸۰^\circ C$ است در ظرف عایقی که حاوی ۲۵۰g آب در دمای $۲۲^\circ C$ است می‌اندازیم، دمای تعادل را محاسبه کنید. از تبادل گرما بین ظرف و آب چشم‌پوشی کنید.

پاسخ : در این مثال دو جسم داریم که تغییر دما داده‌اند، برای سادگی مشخصه‌های آنها را با زیرنویس‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهیم، یعنی :

جرم آلومینیم $= m_۱ = ۱۴۰g = ۰/۱۴kg$

دمای اولیهٔ آلومینیم $= \theta_۱ = ۸۰^\circ C$

و از جدول ۶ـ۱

گرمای ویژهٔ آلومینیم $= c_۱ = ۹۰۰ J/kg.^\circ C$

و همین‌طور برای آب داریم :

جرم آب $= m_۲ = ۲۵۰g = ۰/۲۵kg$

دمای اولیهٔ آب $= \theta_۲ = ۲۲^\circ C$

و از جدول ۶ـ۱

گرمای ویژهٔ آب $= c_۲ = ۴۲۰۰ J/kg.^\circ C$

دمای تعادل که دمای نهایی مشترک آب و آلومینیم است را با θ نمایش می‌دهیم. آنگاه بنا به رابطهٔ ۶ـ۳ داریم :

$$Q_۱ + Q_۲ = ۰$$

$$m_۱c_۱(\theta - \theta_۱) + m_۲c_۲(\theta - \theta_۲) = ۰$$

$$۰/۱۴ \times ۹۰۰ \times (\theta - ۸۰) + ۰/۲۵ \times ۴۲۰۰ \times (\theta - ۲۲) = ۰$$

درنتیجه :

$$\theta \simeq ۲۸^\circ C$$

هرگاه چند جسم متفاوت با گرماهای ویژهٔ c_1، c_2، c_3 و... به جرم‌های m_1، m_2، m_3 و ... با دماهای اولیهٔ θ_1، θ_2، θ_3 و ... را در تماس با یکدیگر قرار دهیم با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۳ معادله‌ای به‌دست می‌آوریم که می‌توان دمای تعادل را از آن محاسبه کرد :

$$m_1c_1(\theta-\theta_1)+m_2c_2(\theta-\theta_2)+m_3c_3(\theta-\theta_3)+\ldots=0 \qquad (۶ــ۴)$$

از معادلهٔ ۶ــ۴ می‌توانیم برای یافتن کمیت‌های دیگری مانند گرمای ویژه یک جسم نیز استفاده کنیم.

مثال ۶ـ۵

در ظرف عایقی حاوی ۵۰۰g آب ۲۰°C، یک قطعه مس ۱۰۰ گرمی به دمای ۵۰°C و یک قطعه فلز دیگر به جرم ۱۵۰g و به دمای ۶۰°C و گرمای ویژهٔ نامعلوم می‌اندازیم و دمای تعادل را اندازه می‌گیریم. دمای تعادل ۲۲°C شده است. با چشم‌پوشی از تبادل گرما بین ظرف و سایر اجسام، گرمای ویژهٔ فلز را محاسبه کنید.

پاسخ : با استفاده از داده‌های این مثال و جدول ۶ــ۱ داریم :

آب : $m_1=500g=0/5kg$, $\theta_1=20^\circ C$, $c_1=4200 J/kg.^\circ C$

مس : $m_2=100g=0/1kg$, $\theta_2=50^\circ C$, $c_2=390 J/kg.^\circ C$

فلز : $m_3=150g=0/15kg$, $\theta_3=60^\circ C$, $c_3=?$

دمای تعادل : $\theta=22^\circ C$

با استفاده از رابطهٔ ۶ــ۴ داریم :

$$m_1c_1(\theta-\theta_1)+m_2c_2(\theta-\theta_2)+m_3c_3(\theta-\theta_3)=0$$

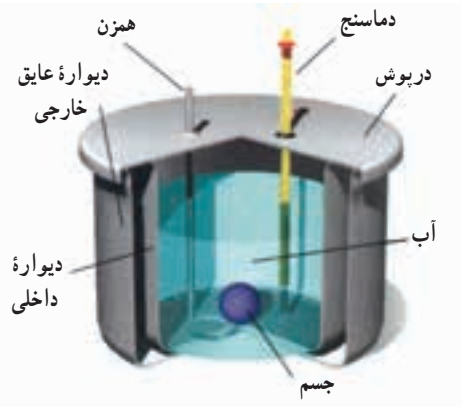
$$0/5\times4200\times(22-20)+0/1\times390(22-50)+0/15\times c_3\times(22-60)=0$$

درنتیجه

$$c_3\simeq545\ J/kg.^\circ C$$

تمرین ۶ـ۲

جسمی به جرم ۲۵۰g و دمای ۳°C را درون ظرف عایقی حاوی ۵۰۰g آب ۲۵°C می‌اندازیم. پس از چند دقیقه دمای تعادل را اندازه می‌گیریم. دمای تعادل ۲۱°C می‌شود، گرمای ویژهٔ جسم را محاسبه کنید. از تبادل گرما بین ظرف و سایر اجسام چشم‌پوشی کنید.



شکل ۶ــ۴ــ طرحی از نمای داخلی و اجزای یک گرماسنج

گرماسنج و گرماسنجی : گرماسنج که به آن کالری‌متر نیز می‌گویند و در شکل ۶ــ۴ نشان داده شده است، ظرفی فلزی و درپوش‌دار است که به‌خوبی عایق‌بندی گرمایی شده است. این ظرف در آزمایش‌های گرماسنجی مانند تعیین گرمای ویژهٔ اجسام به‌کار می‌رود. در گرماسنج مقداری آب با جرم معلوم می‌ریزیم و پس از همدما شدن آب و گرماسنج، دمای آب را اندازه می‌گیریم. سپس جسمی که می‌خواهیم گرمای ویژه‌اش را پیدا کنیم و جرم و دمای اولیهٔ آن را اندازه گرفته‌ایم، درون گرماسنج قرار می‌دهیم و به کمک همزن آب را به هم می‌زنیم تا مجموعه سریع‌تر به دمای تعادل برسد. پس از برقراری تعادل گرمایی، دمای تعادل را اندازه می‌گیریم. با استفاده از رابطه‌های ۶ــ۳ و ۶ــ۴ و با چشم‌پوشی از اثر ناچیز دماسنج و همزن در مبادلهٔ گرما داریم :

$$Q_{آب} + Q_{جسم} + Q_{ظرف} = ۰$$

$$m_{آب} c_{آب} (\theta - \theta_{۱آب}) + m_{جسم} c_{جسم} (\theta - \theta_{۱جسم}) + m_{ظرف} c_{ظرف} (\theta - \theta_{۱ظرف}) = ۰$$

به کمک این رابطه می‌توانیم گرمای ویژهٔ جسم را به‌دست آوریم. حاصل‌ضرب جرم در گرمای ویژهٔ یک جسم را ظرفیت گرمایی آن جسم می‌نامند و آن را با C نشان می‌دهند. یکای این کمیت، J/K یا $J/^{\circ}C$ است. معمولاً در مورد گرماسنج به جای آنکه جرم و گرمای ویژهٔ ظرف گرماسنج را جداگانه معلوم کنند، ظرفیت گرمایی ظرف گرماسنج را مشخص می‌کنند.

مثال ۶ــ۶

قطعه‌ای فلزی به جرم ۵۵۰g و دمای $۷۵^{\circ}C$ که گرمای ویژه‌اش نامعلوم است را درون گرماسنجی حاوی ۵۰۰g آب $۱۵/۵^{\circ}C$ می‌اندازیم. ظرف گرماسنج آلومینیومی و جرم آن ۱۰۰g است. دمای تعادل مجموعه $۱۸/۸^{\circ}C$ می‌شود.

الف) گرمای ویژهٔ قطعه فلز چقدر است؟ با مراجعه به جدول ۶ــ۱ تعیین کنید این قطعه فلز از چه جنسی می‌تواند باشد؟

ب) با چشم‌پوشی از مبادلهٔ گرما با ظرف گرماسنج، گرمای ویژهٔ قطعه فلز را دوباره بیابید.

پاسخ :

الف)

$$Q_{آب} + Q_{جسم} + Q_{ظرف} = ۰$$

$$m_{آب} c_{آب} (\theta - \theta_{۱آب}) + m_{جسم} c_{جسم} (\theta - \theta_{۱جسم}) + m_{ظرف} c_{ظرف} (\theta - \theta_{۱ظرف}) = ۰$$

$$۰/۵۰۰ \times ۴۲۰۰ \times (۱۸/۸ - ۱۵/۵) + ۰/۵۵۰ \times c_{جسم} (۱۸/۸ - ۷۵) + ۰/۱۰۰ \times ۹۰۰ (۱۸/۸ - ۱۵/۵) = ۰$$

$$۶۹۳۰ - ۳۰/۹۱ c_{جسم} + ۲۹۷ = ۰ \Rightarrow c_{جسم} \simeq ۲۳۴ \frac{J}{kg.^{\circ}C}$$

با مراجعه به جدول ۶ــ۱ درمی‌یابیم که این فلز می‌تواند نقره باشد.

ب) با چشم‌پوشی از مبادلهٔ گرما با ظرف گرماسنج داریم :

$$Q_{آب} + Q_{جسم} = ۰$$

$$m_{آب} c_{آب} (\theta - \theta_{۱آب}) + m_{جسم} c_{جسم} (\theta - \theta_{۱جسم}) = ۰$$

$$۰/۵۰۰ \times ۴۲۰۰ (۱۸/۸ - ۱۵/۵) + ۰/۵۵۰ \times c_{جسم} (۱۸/۸ - ۷۵) = ۰$$

$$۶۹۳۰ - ۳۰/۹۱ c_{جسم} = ۰ \Rightarrow C_{جسم} \simeq ۲۲۴ \frac{J}{kg.^{\circ}C}$$

با مقایسهٔ پاسخ‌های الف و ب معلوم می‌شود که اثر ظرف گرماسنج در مبادلهٔ گرما ناچیز است.

آزمایش ۶ـ۱

وسیله‌های آزمایش : گرماسنج با ظرفیت گرمایی معین، یک جسم کوچک فلزی (مثل یک وزنهٔ فلزی قلاب‌دار)، دماسنج، ترازو، بِشر شیشه‌ای، چراغ گازی، سه‌پایه و شعله‌پخش‌کن، انبر.

شرح آزمایش :

۱ــ مقداری آب با جرم معلوم را درون گرماسنج بریزید و صبر کنید تا دمای گرماسنج و آب، یکسان شود. این دما را اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۲ــ جرم جسم فلزی را به کمک ترازو اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۳ــ جسم فلزی را درون بشر قرار دهید، مقداری آب روی آن بریزید و سپس مجموعه را روی چراغ گازی روشن بگذارید.

۴ــ صبر کنید تا آب چند دقیقه بجوشد. دمای آب را در این حالت اندازه بگیرید. این دما، همان دمای جسم فلزی نیز هست.

۵ــ جسم داغ‌شده را توسط انبر به‌سرعت درون گرماسنج بیندازید.

۶ــ آب درون گرماسنج را با همزن آن به هم بزنید و دمای تعادل را اندازه گرفته و یادداشت کنید.

۷ــ با استفاده از معادلهٔ زیر که از رابطهٔ ۶ــ۴ به‌دست آمده است،

$$m_{\text{آب}}\, c_{\text{آب}}\, (\theta-\theta_{1\text{آب}})+m_{\text{جسم}}\, c_{\text{جسم}}\, (\theta-\theta_{1\text{جسم}})+C_{\text{گرماسنج}}\, (\theta-\theta_{1\text{گرماسنج}})=0$$

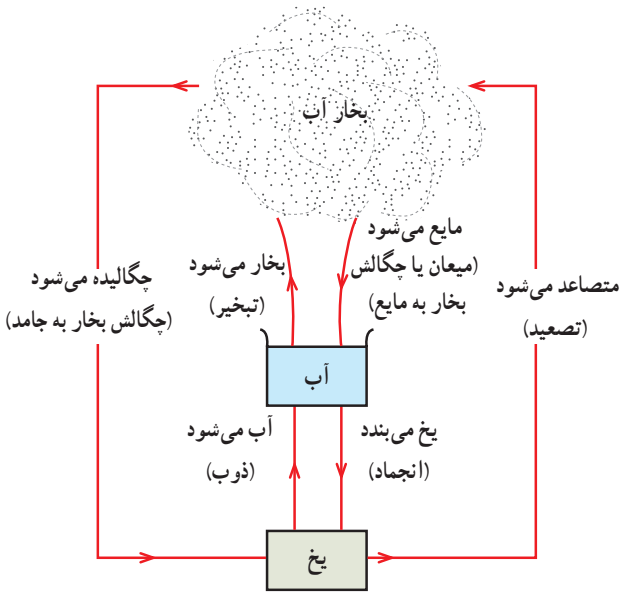
گرمای ویژهٔ جسم فلزی را به‌دست آورید.

۶ــ۲ حالت‌های ماده

همان‌طورکه در فصل ۵ دیدیم موادی که در اطراف ما وجود دارند در سه حالت (فاز) جامد، مایع و گاز یافت می‌شوند. برای مثال H_2O هم به حالت جامد (یخ) و هم به حالت مایع (آب) و هم به حالت گاز (بخار آب) یافت می‌شود. گذار از یک حالت (فاز) به یک حالت (فاز) دیگر را یک تغییر حالت (گذار فاز) می‌نامند. برای مثال در شکل ۶ــ۵ انواع تغییر حالت‌هایی که برای آب امکان‌پذیر است نشان داده شده است. تغییر حالت‌ها معمولاً با گرفتن و یا از دست دادن گرما همراه‌اند.

تبدیل جامد به مایع را ذوب، تبدیل مایع به بخار را تبخیر و تبدیل مایع به جامد را انجماد و تبدیل بخار به مایع را میعان یا چگالش بخار به مایع می‌نامیم.

امکان دارد که تغییر حالت از جامد به بخار و وارون آن از بخار به جامد نیز به‌طور مستقیم و بدون گذر از حالت مایع صورت گیرد. تغییر حالت از جامد به بخار، تصعید و تغییر حالت وارون آن یعنی از بخار به جامد چگالش بخار به جامد گفته می‌شود. برای مثال نفتالین در دمای اتاق به‌طور مستقیم از جامد به بخار تبدیل می‌شود و یا در صبح‌های بسیار سرد



شکل ۶ــ۵ــ انواع تغییر حالت‌های آب

زمستان برفکی که روی گیاهان و یا روی شیشهٔ پنجره می‌نشیند، بخار آبی است که به‌طور مستقیم به بلورهای یخ تبدیل شده است.

در ادامه تغییر حالت‌های جامد به مایع ومایع به بخار یا گاز را به‌طور جداگانه بررسی می‌کنیم.

ذوب : پیش از این دیدیم که اگر به جسم جامدی گرما دهیم، دمای آن افزایش می‌یابد. اگر عمل گرمادادن را برای جامدهای خالص و بلورین ادامه دهیم، وقتی دمای جسم به مقدار مشخصی برسد، افزایش دما متوقف می‌شود و دما ثابت باقی می‌ماند. در این حالت جسم شروع به ذوب‌شدن می‌کند و به مایع تبدیل می‌شود. این دمای ثابت را که به جنس جسم و فشار وارد بر آن بستگی دارد دمای ذوب یا نقطهٔ ذوب و به عبارتی دمای گذار جامد به مایع می‌نامند. معمولاً حجم جامدهای بلوری هنگام ذوب‌شدن افزایش می‌یابد، زیرا حجمی که بلور با آرایش منظم مولکول‌ها در حالت جامد اشغال می‌کند نسبت به این حجم در حالت مایع که آرایش مولکولی نامنظمی دارد، کمتر است.

برخلاف جامدهای خالص و بلورین، جامدهای بی‌شکل مانند شیشه و قیر نقطهٔ ذوب کاملاً مشخصی ندارند. در واقع، وقتی این مواد را گرم می‌کنیم پیش از ذوب‌شدن خمیری شکل می‌شوند. این مواد در گستره‌ای از دما به‌تدریج ذوب می‌شوند[1].

معمولاً افزایش فشار وارد بر جسم سبب بالارفتن نقطهٔ ذوب جسم می‌شود. در برخی اجسام مانند یخ، افزایش فشار به کاهش نقطهٔ ذوب می‌انجامد. نقطهٔ ذوب یخ در فشار یک اتمسفر برابر صفر درجهٔ سلسیوس است.

فعالیت ۶ـ۲

دربارهٔ علت دیرتر آب شدن برف روی قلهٔ کوه‌ها تحقیق کنید. نتیجهٔ تحقیق خود را به کلاس گزارش دهید.

عمل ذوب، فرایندی گرماگیر است. یعنی به جسم جامدی که به دمای ذوب خود رسیده باشد باید گرما بدهیم تا به مایع تبدیل شود. این گرما دمای جسم را تغییر نمی‌دهد بلکه سبب تغییر حالت آن می‌شود.

گرمای لازم برای تغییر حالت جسم از جامد به مایع، در دمای ذوب، با جرم آن نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم جسم را گرمای ذوب (یا گرمای نهان ذوب) می‌نامیم و آن را با L_F نشان می‌دهیم[2] :

$$L_F = \frac{Q}{m}$$

۱ــ درست‌تر آن است که بگوییم موادی مانند شیشه یا قیر که ساختار بلورین ندارند و در فیزیک به آنها **آمورف** گفته می‌شود، هنگام ذوب یا انجماد، تغییر حالت (فاز) نمی‌دهند. قیر یا شیشه هنگام ذوب یا انجماد فقط شل یا سفت می‌شوند و ساختار مولکولی آنها (برخلاف جامدهای بلورین) تغییر نمی‌کند. به همین دلیل برخی کتاب‌ها، شیشه را مایع سِفت نیز می‌گویند.

۲ــ زیرنویس F حرف اول واژهٔ انگلیسی Fusion به معنای ذوب است.

گرمای ذوب به جنس جسم بستگی دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. بنابراین گرمای لازم برای ذوب جسم جامدی به جرم m و گرمای ذوب L_F از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید[1].

$$Q = mL_F \qquad (۶ــ۵)$$

گرمای ذوب و نقطهٔ ذوب مواد مختلف، متفاوت است. این مقدارها برای برخی از مواد در جدول ۶ــ۲ داده شده است.

جدول ۶ــ۲ــ نقطهٔ ذوب و گرمای ذوب برخی مواد در فشار یک اتمسفر

ماده	نقطهٔ جوش (°C)	گرمای ذوب (kJ/kg)
هیدروژن	−۲۵۹	۵۸/۶
اکسیژن	−۲۱۸	۱۳/۸
ازت	−۲۱۰	۲۵/۵
جیوه	−۳۹	۱۱/۸
یخ	۰	۳۳۳/۷
گوگرد	۱۱۹	۳۸/۱
سرب	۳۲۷	۲۴/۵
قلع	۶۳۰	۱۶۵
نقره	۹۶۰	۸۸/۳
طلا	۱۰۶۳	۶۴/۵
مس	۱۰۸۳	۱۳۴

مثال ۶ـ۷

فلز گالیم (Ga) عنصر سی‌ویکم جدول تناوبی عناصر است. دمای ذوب این فلز ۲۹/۸°C و گرمای ذوب آن ۸۰/۴kJ/kg است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود هرگاه این فلز را در دست بگیریم شروع به ذوب‌شدن می‌کند. حساب کنید که یک قطعهٔ ۱۰ گرمی از این فلز چقدر گرما از دست ما می‌گیرد تا در نقطهٔ ذوب خود به‌طور کامل ذوب شود.

پاسخ :

$$Q = mL_F = (۱۰ \times ۱۰^{-۳})(۸۰/۴ \times ۱۰^{۳}) = ۸۰۴J$$

۱ــ پیش از این در کتاب‌های درسی گرمای لازم برای ذوب هر جسم جامد، یعنی Q، را گرمای نهان ذوب و L_F را گرمای نهان ویژهٔ ذوب می‌نامیدند که این نام‌گذاری امروزه چندان مرسوم نیست.

انجماد : وقتی از مایع خالصی گرما می‌گیریم، سرد می‌شود تا به نقطهٔ انجماد خود برسد. اگر گرماگرفتن از مایع را در این دما ادامه دهیم مایع شروع به جامدشدن می‌کند، بی‌آنکه دمای آن کاهش یابد. دمای نقطهٔ ذوب هر ماده با دمای انجماد آن در فشار یکسان برابر است. یعنی برای مثال اگر در فشار یک اتمسفر به یخ صفر درجهٔ سلسیوس گرما دهیم شروع به ذوب می‌کند و نیز اگر در همان فشار از آب صفر درجهٔ سلسیوس گرما بگیریم شروع به انجماد می‌کند.

هر جسم به هنگام انجماد همان‌قدر گرما از دست می‌دهد که به هنگام ذوب می‌گیرد. همان‌طورکه قبلاً دیدیم وقتی جسم گرما از دست می‌دهد $Q<0$ است، پس برای محاسبهٔ گرما به هنگام انجماد مایعی به جرم m داریم،

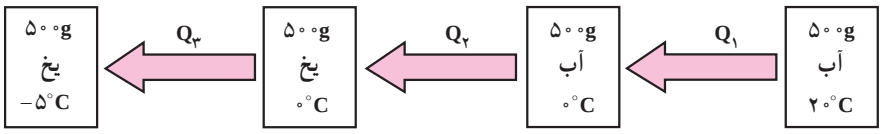
$$Q=-mL_F \qquad (۶-۶)$$

در اینجا نیز مانند فرایند ذوب که برای جامدهای غیربلورین نقطهٔ انجماد مشخصی وجود ندارد، وجود ناخالصی موجب می شود که مایع، نقطهٔ انجماد مشخصی نداشته باشد بلکه انجماد در گستره‌ای از دماها رخ دهد. مثلاً هنگام یخ‌زدن آب نمک، اولین بلورها در دمای کمتر از $0^\circ C$ تشکیل می‌شود و انجماد کامل در دماهای کمتر، تا $-18^\circ C$ روی می‌دهد.

مثال ۷-۸

از $500g$ آب با دمای $20^\circ C$ چند کیلوژول گرما بگیریم تا به یخ با دمای $-5^\circ C$ تبدیل شود؟

پاسخ : مرحله‌های این فرایند به‌طور طرح‌وار در شکل زیر رسم شده است.



که در آن :

$$Q_1=mc\Delta\theta=0/5\times4200(0-20)=-42000J=-42kJ$$

$$Q_2=-mL_F=-0/5\times334000=-167000J=-167kJ$$

$$Q_3=mc\Delta\theta=0/5\times2100(-5-0)=-5250J=-5/25kJ$$

بنابراین کل گرما برابر است با

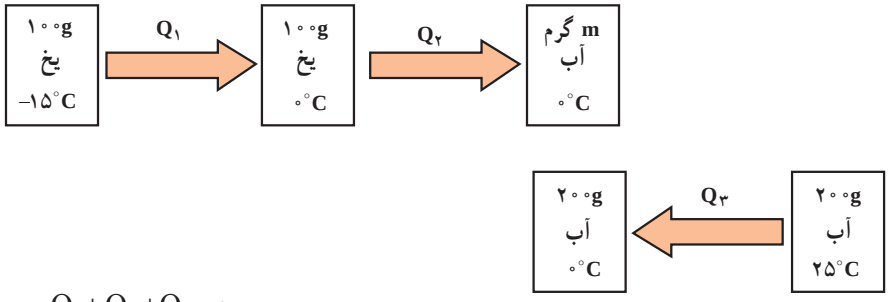
$$Q=Q_1+Q_2+Q_3=-214/25kJ$$

یعنی باید $214/25kJ$ گرما از آب بگیریم.

مثال ۶ـ۹

در گرماسنجی با ظرفیت گرمایی ناچیز ۲۰۰g آب با دمای ۲۵°C وجود دارد. قطعه یخی به جرم ۱۰۰g و دمای ۱۵°C− درون آن می‌اندازیم. پس از مبادلهٔ گرما و برقراری تعادل گرمایی، مخلوطی از آب و یخ به جا می‌ماند. جرم یخ باقی‌مانده چند گرم است؟

پاسخ : می‌دانیم دمای تعادل آب خالص و یخ خالص در فشار ۱atm برابر ۰°C است. مرحله‌های طرح‌وار این فرایند در شکل زیر رسم شده است.



$$Q_1+Q_2+Q_3=0$$

$$m_{\text{یخ}}c_{\text{یخ}}\Delta\theta_{\text{یخ}}+m_{\text{یخ ذوب شده}}L_f+m_{\text{آب}}c_{\text{آب}}\Delta\theta_{\text{آب}}=0$$

$$0/1\times2100\big(0-(-15)\big)+m\times334000+0/2\times4200(0-25)=0$$

$$3150+334000m-21000=0$$

$$334000m=17850\Rightarrow m=0/053kg=53g$$ (جرم یخ ذوب‌شده)

بنابراین ۴۷g از یخ *ذوب‌نشده* باقی می‌ماند.

تمرین ۶ـ۳

اگر در مثال ۶ــ ۹ جرم قطعه یخ اولیه ۵۰g باشد، دمای تعادل چقدر می‌شود؟

آزمایش ۶ـ۲

وسیله‌های آزمایش : بشر شیشه‌ای با حجم ۴۰۰cc، چراغ‌گازی، سه‌پایه، توری نسوز، ترازو، مقداری مخلوط آب و یخ، گرماسنج با ظرفیت گرمایی معلوم و دماسنج.

شرح آزمایش :

۱ــ ۲۰۰cc آب در بشر بریزید و آن را روی سه‌پایه قرار دهید. چراغ‌گاز را روشن کنید تا دمای آب دست‌کم به ۶۰°C برسد.

۲ــ آب گرم را درون گرماسنج بریزید و پس ازمدتی دمای تعادل آب و گرماسنج را با دماسنج اندازه بگیرید و یادداشت کنید.

۳ــ قطعه یخی به جرم تقریبی ۵۰g را از درون مخلوط آب و یخ (با دمای ۰°C) بیرون آورده و جرم آن را اندازه گرفته و یادداشت کنید.

۴ــ یخ را درون گرماسنج بیندازید و صبر کنید تا کاملاً ذوب شود. اینک دمای تعادل را اندازه بگیرید.

۵ــ با استفاده از اعداد به‌دست‌آمده، گرمای ذوب یخ (L_F) را حساب کنید.

تبخیر و جوشیدن : وقتی لباس خیسی را روی بند رخت می‌اندازیم آب موجود در آن پس از مدتی بخار و لباس خشک می‌شود. آبی که در هوای گرم تابستان روی زمین می‌پاشیم نیز به‌سرعت بخار و زمین خشک می‌شود. در پدیده‌هایی از این دست می‌بینیم که مایع در هر دمایی تبخیر می‌شود. بعضی از مولکول‌های مایع که به سرعت‌های به اندازهٔ کافی زیاد برسند از سطح مایع فرار می‌کنند. به این فرایند تبخیر سطحی می‌گوییم. تجربه نشان می‌دهد که آهنگ تبخیر سطحی به عامل‌های مختلفی از جمله دمای مایع و مساحت سطح آن بستگی دارد.

فعالیت ۷ـ۳

الف) بررسی کنید که افزایش دما و افزایش مساحت سطح مایع هریک تبخیر سطحی مایع را تندتر یا کندتر می‌کند.

ب) با بررسی تبخیر سطحی در شرایط مختلف سعی کنید از راه تجربه، عامل یا عامل‌های دیگری را پیدا کنید که بر آهنگ تبخیر سطحی مؤثر باشند.

پ) تحقیق کنید که چگونه عرق‌کردن به خنک‌نگه‌داشتن بدن کمک می‌کند.

با گرم‌کردن تدریجی مایع، آهنگ تبخیر سطحی آن افزایش می‌یابد. بخشی از گرمای داده‌شده به مایع موجب افزایش دما و بخش دیگر موجب تبخیر سطحی مایع می‌شود. تاکنون در حل مسئله‌های گرماسنجی، گرمایی را که هنگام افزایش دمای مایع صرف تبخیر سطحی آن می‌شود، نادیده گرفتیم. وقتی مایعی را گرم می‌کنیم دمای آن بالا می‌رود تا اینکه در دمای خاصی حباب‌های گاز درون مایع شکل می‌گیرند و به سطح مایع می‌آیند و از آن خارج می‌شوند. به این پدیده جوشیدن مایع و به این دما، دمای جوش یا نقطهٔ جوش می‌گوییم.

در نقطهٔ جوش هرچه به مایع گرما بدهیم دمای آن افزایش نمی‌یابد و همهٔ گرما صرف تبخیر مایع می‌شود. آهنگ تبخیر هر مایع در نقطهٔ جوش آن به بیشترین مقدار خود می‌رسد. تجربه نشان می‌دهد که گرمای لازم برای تبخیر هر مایع با جرم آن نسبت مستقیم دارد. نسبت این گرما به جرم مایع بخارشده را گرمای تبخیر مایع (یا گرمای نهان تبخیر مایع) می‌نامیم و آن را با L_V [1] نشان می‌دهیم.

$$L_V = \frac{Q}{m}$$

گرمای تبخیر هر مایع به جنس و دمای آن بستگی دارد و یکای آن در SI ژول بر کیلوگرم (J/kg) است. گرمای لازم برای تبخیر مایعی به جرم m که گرمای تبخیر آن L_V است از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید[2] :

$$Q = mL_V \qquad (۷ــ۶)$$

۱ــ زیرنویس v حرف اول واژهٔ انگلیسی Vaporization به معنی تبخیر است.

۲ــ پیش از این در کتاب‌های درسی گرمای لازم برای تبخیر مایع (Q) را گرمای نهان تبخیر و L_V را گرمای نهان ویژهٔ تبخیر می‌نامیدند. این نام‌گذاری امروزه چندان مرسوم نیست.

جدول ۶ــ۳ برخی از مقدارهای L_V را نشان می‌دهد که به‌طور تجربی برای آب در دماهای مختلف به‌دست آمده است.

جدول ۶ــ۳ــ مقادیر L_V برای آب در دماهای مختلف

دما ($^\circ C$)	L_V(kJ/kg)
۰	۲۴۹۰
۱۵	۲۴۵۴
۵۰	۲۳۷۴
۱۰۰	۲۲۵۶
۱۵۰	۲۱۱۵

فعالیت ۶ـ۴

تحقیق کنید چرا در جدول ۶ ــ ۳ گرمای نهان تبخیر آب با افزایش‌دمای آن کاهش می‌یابد.

مثال ۶ـ۱۰

معمولاً وقتی هوا را با بخاری‌های شعله‌ای گرم می‌کنند، برای حفظ رطوبت محیط، ظرف آبی را روی بخاری می‌گذارند. اگر دمای آب در یکی از این ظرف‌ها روی $50^\circ C$ ثابت مانده باشد، تعیین کنید برای تبخیر ۲۰۰g از آب در این شرایط چقدر گرما لازم است؟

پاسخ : با توجه به رابطهٔ ۶ــ۷ و استفاده از جدول ۶ــ۳ داریم :

$$Q = mL_V = (0/2)(2374 \times 10^3) \simeq 4/75 \times 10^5 J$$

در مسئله‌های عملی بیشتر با گرمای تبخیر مایع در نقطهٔ جوش آن سر و کار داریم و البته نقطهٔ جوش هر مایع به جنس و فشار وارد بر آن بستگی دارد. افزایش فشار وارد بر مایع سبب بالا رفتن نقطهٔ جوش آن می‌شود. جدول ۶ــ۳ نقطهٔ جوش و گرمای تبخیر برخی از مواد را در فشار یک اتمسفر نشان می‌دهد.

جدول ۶ــ۴ــ نقطهٔ جوش و گرمای تبخیر برخی مواد در فشار یک اتمسفر

ماده	نقطهٔ جوش (°C)	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
هلیم	-۲۶۹	۲۱
هیدروژن	-۲۵۳	۴۶۰
ازت	-۱۹۶	۲۰۰
اکسیژن	-۱۸۳	۲۱۴
آمونیاک	-۳۵	۱۳۶۹
اتر	۳۵	۳۷۷
برم	۵۹	۱۹۳
کلروفرم	۶۲	۲۴۷
الکل (اتانول)	۷۹	۸۴۶
بنزن	۸۰	۳۹۰
آب	۱۰۰	۲۲۵۶
ید	۱۸۴	۱۶۴
گلیسیرین	۲۹۰	۹۷۴
جیوه	۳۵۷	۲۹۵
گوگرد	۴۴۵	۱۵۱۰

فعالیت ۶-۵

علت سریع‌تر پخته‌شدن غذا در دیگ زودپز را با افراد گروه خود مورد بحث قرار دهید و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

مثال ۶-۱۱

۲ لیتر آب را درون یک کتری برقی با توان الکتریکی ۱/۵ kW می‌ریزیم و آن را روشن می‌کنیم.

الف) از لحظهٔ آغاز جوشیدن تا تبخیر همهٔ آب درون کتری چقدر گرما به آب داده می‌شود؟

ب) چه مدت طول می‌کشد تا این فرایند انجام شود؟ فرض کنید تمام گرمای تولید شدهٔ کتری به آب می‌رسد.

پاسخ :

الف) با توجه به رابطهٔ ۶ــ۷ داریم :

$$Q = mL_V = (۲\times۱۰^{۶})(۲۲۵۶) \simeq ۴/۵\times۱۰^{۶}\,J$$

ب)

$$Q = Pt \Rightarrow t = \frac{۴/۵\times۱۰^{۶}}{۱/۵\times۱۰^{۳}} = ۳۰۰۰\,s = ۵۰\,min$$

برای اندازه‌گیری گرمای تبخیر در نقطهٔ جوش هر مایع روش‌های عملی گوناگونی وجود دارد که آزمایش کنید ۶ــ۳ براساس یکی از این روش‌ها طراحی شده است.

آزمایش ۷ـ۳

وسایل لازم : بشر ۲۰۰cc، دماسنج، سه‌پایه، توری، پایه و گیره، چراغ گاز، زمان‌سنج، آب و ترازو

شرح آزمایش :

۱ــ جرم بشر خالی را اندازه‌گیری کنید و مقدار معینی آب (مثلاً ۲۰۰g) در آن بریزید.

۲ــ توری را روی سه‌پایه بگذارید. چراغ را زیر آن روشن کنید و ارلن را روی توری قراردهید.

۳ــ دماسنج را به کمک پایه وگیره طوری درون بشر قرار دهید تا مخزن آن کمی پایین‌تر از سطح آب باشد.

۴ــ در لحظه‌ای که دمای آب به ۷۰°C می‌رسد زمان‌سنج را روشن کنید. $(t_1=0, \theta_1=70^\circ C)$

۵ــ صبر کنید تا آب به جوش آید. زمان (t_2) و دما (θ_2) را ثبت کنید.

۶ــ با استفاده از رابطهٔ $P(t_2-t_1)=mc(\theta_2-\theta_1)$ و جاگذاری مقادیر معلوم، توان گرمادهی چراغ به آب (P) را به دست آورید.

۷ــ گرمادادن را آنقدر ادامه دهید تا مقدار قابل ملاحظه‌ای از آب بخار شود (تذکر : در طول گرمادادن باید شرایط چراغ و بشر ثابت بماند تا توان گرمادهی چراغ به آب تغییر نکند).

۸ــ زمان (t_3) را ثبت کنید. بشر را از روی چراغ بردارید و با وزن‌کردن آن جرم آب بخارشده (m') را به‌دست آورید.

۹ــ گرمای تبخیر را با استفاده از رابطهٔ $P(t_3-t_2)=m'L_V$ به‌دست آورید.

تمرین ۷ـ۴

قطعه یخی به جرم ۰/۵ کیلوگرم و دمای اولیهٔ $-20^\circ C$ را آنقدر گرم می‌کنیم تا تمام آن تبدیل به بخار $100^\circ C$ شود. کلّ گرمایی که برای این منظور صرف کرده‌ایم چند کیلوژول است؟

میعان : میعان، وارونِ فرایند تبخیر است. بخار هنگام تبدیل‌شدن به مایع گرما از دست می‌دهد. این گرما برابر گرمایی است که مایع هنگام تبخیر می‌گیرد. میعان نیز مانند تبخیر، در هر دمایی رخ می‌دهد. گرمای مربوط به میعانِ مقداری بخار به جرم m و گرمای تبخیر L_V از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود :

$$Q=-mL_V \qquad (۸ــ۶)$$

علامت منفی نشان‌دهندهٔ آن است که بخار هنگام میعان گرما از دست می‌دهد و باعث گرم‌شدن اجسام پیرامون خود می‌شود. مثلاً اتاق حمامی را پس از دوش‌گرفتن یک شخص در نظر بگیرید.

وقتی شما وارد حمام شوید پس از چند لحظه احساس می‌کنید که گرمتان شده است. زیرا در اثر باز بودن دوش (حتی اگر آب سرد باشد) مقداری بخار آب در فضای حمام ایجاد شده است و با ورود شما به حمام، میعان این بخار روی بدنتان به شما گرما می‌دهد.

مثال ۶ـ۱۲

در یک روز زمستانی، بخار آب موجود در اتاقی بر روی شیشهٔ پنجره به شکل مایع درمی‌آید و قطره قطره می‌چکد. اگر دمای شیشه حدود $0^{\circ}C$ باشد برای آنکه حدود ۵۰ گرم آب روی شیشه تقطیر شود چقدر گرما به شیشه داده می‌شود؟

پاسخ :

با استفاده از جدول ۶ـ۴ و رابطهٔ ۶ـ۸ داریم :

$$Q=-mL_V=-(50\times10^{-3})(2490\times10^{3})=-124500\,J$$

در این عمل ۱۲۴/۵ کیلوژول گرما به شیشه داده می‌شود.

فعالیت ۶ـ۶

در مورد ایجاد شبنم صبحگاهی روی گیاهان تحقیق و به کلاس گزارش کنید.

۶ـ۳ انبساط گرمایی

معمولاً برای آنکه درِ فلزی محکم یک ظرف شیشه‌ای را باز کنیم روی آن آب داغ می‌ریزیم. وقتی دو لیوان شیشه‌ای در هم گیر کرده باشند می‌توانیم با ریختن آب سرد در لیوان داخلی و گذاشتن لیوان بیرونی در آب گرم، دو لیوان را از هم جدا کنیم. وقتی دندانپزشک سوراخ دندانی را پُر می‌کند باید مادهٔ پُرکننده همان مشخصه‌های انبساط گرمایی دندان را داشته باشد، چرا که در غیر این صورت خوردن یک بستنی سرد و در پی آن نوشیدن چایی داغ بسیار دردناک خواهد بود.

فعالیت ۶ـ۷

توضیح دهید که چگونه می‌توان با استفاده از ابزارهایی که در شکل زیر نشان داده شده است پدیدهٔ انبساط در اثر افزایش دما را نمایش داد.

بیشتر اجسام با افزایش دما انبساط پیدا می‌کنند و یا با کاهش دما حجمشان کم می‌شود. این پدیده اساس ساخت بعضی از دماسنج‌ها و دماپا (ترموستات) است ــ بی‌توجهی به پدیدهٔ انبساط در ساختن پل‌ها، خط آهن‌ها، خطوط انتقال نیرو، خطوط انتقال سوخت و ... می‌تواند مشکل‌هایی را ایجاد کند.

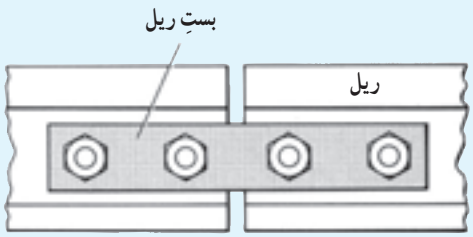
فعالیت ۶-۸

شکل الف، اتصال دو قسمت متوالی یک پل را نشان می‌دهد.

تحقیق کنید چرا برای اتصال دوبخش پل از این روش استفاده می‌شود.

شکل ب، طرحی از دو قسمت متوالی خط آهن (ریل راه‌آهن) را نشان می‌دهد. تحقیق کنید اگر فاصلهٔ خالی بین این دو قسمت به حد کافی زیاد نباشد، چه مشکلی پیش می‌آید (شکل پ).

(الف)



(ب)

(پ)

انبساط طولی : اگر میله‌ای به طول اولیهٔ L_1 را به اندازهٔ ΔT گرم کنیم به طول آن به اندازهٔ ΔL افزوده می‌شود. تجربه نشان می‌دهد ΔL با L_1 نسبت مستقیم دارد. اگر ΔT خیلی زیاد نباشد ΔL با ΔT نیز نسبت مستقیم دارد. ضریب این تناسب را با α نشان می‌دهیم و داریم :

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta T \qquad (۶ــ۹)$$

به α ضریب انبساط طولی میله می‌گویند که به جنس میله بستگی دارد. یکای α، برکلوین $(\frac{1}{K})$ یا بر درجهٔ سلسیوس $(\frac{1}{^\circ C})$ است. ضریب انبساط طولی برخی اجسام در جدول ۶ــ۵ داده شده است.

توجه کنید که مقادیر داده شده برای α در جدول بسیار کوچک هستند. همچنین خوب است بدانید که ضریب انبساط طولی α علاوه‌بر جنس ماده، به دما نیز اندکی وابسته است اما به دلیل اینکه این وابستگی ناچیز است معمولاً برای مصارف عملی آن را نادیده می‌گیریم.

جدول ۶ــ۵ــ ضریب انبساط طولی برخی اجسام

ماده	ضریب انبساط طولی $(\frac{1}{K})$
الماس	$1/2\times10^{-6}$
شیشه پیرکس	$3/2\times10^{-6}$
شیشهٔ معمولی	9×10^{-6}
فولاد	11×10^{-6}
بتون	12×10^{-6}
مس	17×10^{-6}
برنج	19×10^{-6}
آلومینیوم	23×10^{-6}
سرب	29×10^{-6}
یخ (در $0^\circ C$)	51×10^{-6}

مثال ۶ـ۱۳

پلی بتونی را با طول ۲۰۰m در نظر بگیرید. افزایش طول این پل هنگامی که دمای آن $50^{\circ}C$ زیاد شود چند سانتی‌متر است؟

پاسخ :

از جدول ۶ـ۵ و با استفاده از رابطهٔ ۶ ـ ۹ داریم :

$$\Delta L=\alpha L_1\Delta T=(12\times10^{-6})(200)(50)=12\times10^{-2}m$$
$$=12cm$$

اگر در ساختمان این پل فضای لازم برای انبساط طولی پیش‌بینی نشده باشد، چنین انبساطی می‌تواند باعث تخریب پل شود.

آزمایش ۶ـ۴

وسایل آزمایش : دستگاه اندازه‌گیری ضریب انبساط طولی با چند لولهٔ فلزی توخالی از جنس‌های مختلف ـ ارلن با درپوش سوراخ‌دار ـ لولهٔ لاستیکی ـ توری و سه‌پایه ـ چراغ گاز

شرح آزمایش :

۱ـ طول لولهٔ توخالی موردنظر را اندازه بگیرید (L_1) و روی دستگاه نصب کنید.

۲ـ در ارلن مقداری آب بریزید و درپوش آن را بگذارید.

۳ـ دمای محیط را بخوانید (θ_1) و دماسنج را از یک سوراخ و لولهٔ لاستیکی را از سوراخ دیگر درپوش رد کنید.

۴ـ ارلن را گرما دهید تا آب به جوش آید.

۵ـ صبر کنید تا از سر آزادِ لولهٔ لاستیکی بخار آب خارج شود. سپس لوله را مطابق شکل به دستگاه وصل کنید.

۶ـ آنقدر صبر کنید تا بخار آب از لوله خارج و لولهٔ توخالی کاملاً گرم شود و دمای آن به حدود دمای آب جوش درون ارلن برسد (θ_2).

۷ـ افزایش طول میلهٔ توخالی را با ریزسنج متصل به دستگاه اندازه بگیرید(ΔL).

۸ـ با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۹ ضریب انبساط طولی را به‌دست آورید.

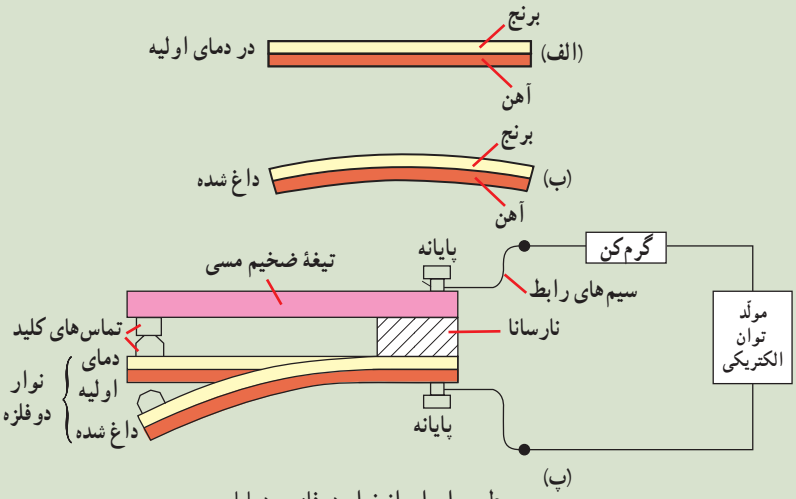
۹ـ میلهٔ توخالی دستگاه راعوض کنید و آزمایش را برای میله‌ای با جنس دیگر دوباره انجام دهید.

مطالعهٔ آزاد

نوار دوفلزه[1] و دماپا (ترموستات)

نوار دوفلزه از دو تیغهٔ فلزی متفاوت مانند برنج و آهن ساخته شده است که سرتاسر به‌هم جوش داده یا پرچ شده‌اند (شکل الف). در دمای معمولی محیط، طول دو تیغه یکسان است. با افزایش دما طول تیغه‌ها افزایش می‌یابد. تیغه‌ای که ضریب انبساط طولی بزرگ‌تری دارد، افزایش طول بیشتری نیز خواهد داشت و در نتیجه نوار طوری خم می‌شود که تیغهٔ با ضریب انبساط بیشتر کمان خارجی و تیغهٔ دیگر کمان داخلی خم را تشکیل می‌دهد (شکل ب). اگر به‌جای گرم کردن نوار، آن را سرد کنیم، نوار در خلاف جهت قبلی خم می‌شود.

دماپا کلیدی الکتریکی است که در آن قطع و وصل جریان با استفاده از حسگرهای گرمایی انجام می‌شود. اغلب از نوارهای دوفلزه به عنوان حسگرهای گرمایی در دماپا استفاده می‌شود (شکل پ). در مدار سادهٔ نشان داده شده در شکل پ، عبور جریان الکتریکی از گرم‌کن برقی باعث گرم شدن نوار دوفلزه می‌شود. وقتی دمای نوار به اندازهٔ معینی برسد براثر خم شدن نوار جریان قطع و گرم‌کن برقی خاموش می‌شود. با خاموش شدن گرم‌کن، دمای تیغه کاهش می‌یابد و نوار دوباره به شکل وضعیت قبلی خود بازمی‌گردد و به این ترتیب دوباره مدار وصل و گرم کن برقی روشن می‌شود. دماپاها در بسیاری از وسایل الکتریکی مانند یخچال، آبگرمکن، سماوربرقی و ... کاربرد دارند.

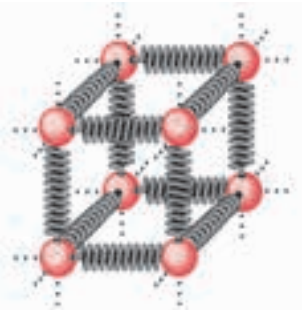


طرح‌واره‌ای از نوار دوفلزه و دماپا

فعالیت ۶ـ۶

شکل روبه‌رو دماسنجی را نشان می‌دهد که در آن از یک نوار دوفلزی حلزونی شکل استفاده شده است. اساس کار این دماسنج را در گروه خود به بحث بگذارید و نتیجه را به کلاس گزارش کنید.

انبساط گرمایی از دیدگاه مولکولی نیز قابل درک است. نیروهای بین اتمی در جامدها مثل فنر عمل می‌کنند (شکل ۶ـ۶). هر اتم در اطراف مکان تعادل خود نوسان می‌کند و با افزایش دما بر انرژی و دامنهٔ نوسان اتم‌ها افزوده می‌شود. در این حالت فاصلهٔ متوسط اتم‌ها از یکدیگر افزایش می‌یابد و در نتیجه جسم انبساط می یابد.



شکل ۶ـ۶ـ در جامدها، نیروهای بین اتمی مثل فنر عمل می‌کنند.

۱ـ بای متال (bi_metal)

مثال ۶ـ۱۴

الف) ورقه‌ای مستطیلی‌شکل به اضلاع a_1 و b_1 را درنظر بگیرید. بر اثر افزایش دمای ΔT، طول اضلاع مستطیل به اندازه Δa و Δb افزایش می‌یابند که هریک با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۹ به‌دست می‌آید.

الف) افزایش مساحت این ورقه براثر افزایش دما چقدر است؟

ب) افزایش مساحت ورقه‌ای مسی به مساحت $2500\,cm^2$ وقتی دمایش $50^\circ C$ بالا رود، چند سانتی‌متر مربع است؟

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ ۶ـ ۹ می‌توان Δa و Δb را به‌دست آورد :

$$\Delta a = \alpha a_1 \Delta T \Rightarrow a_2 = a_1 + \alpha a_1 \Delta T \Rightarrow a_2 = a_1 (1 + \alpha \Delta T)$$

$$\Delta b = \alpha b_1 \Delta T \Rightarrow b_2 = b_1 + \alpha b_1 \Delta T \Rightarrow b_2 = b_1 (1 + \alpha \Delta T)$$

مساحت ورقه پس از افزایش دما برابر با $a_2 b_2$ است و بنابراین داریم :

$$A_2 = a_2 b_2 = a_1(1 + \alpha \Delta T)\ b_1 (1 + \alpha \Delta T) = a_1 b_1 (1 + \alpha \Delta T)$$

$$= a_1 b_1 (1 + 2\alpha \Delta T + (\alpha \Delta T)^2)$$

با توجه به اینکه α معمولاً از مرتبهٔ 10^{-5} بر درجهٔ سلسیوس است (جدول ۶ـ۵ را ببینید) و ΔT معمولاً بیشتر از مرتبهٔ 10^2 درجهٔ سلسیوس نیست، می‌توان نتیجه گرفت که جملهٔ $(\alpha \Delta T)^2$ در مقایسه با جملهٔ $2\alpha \Delta T$ بسیار کوچک است و می‌شود از آن چشم‌پوشی کرد. از طرفی $a_1 b_1$ همان مساحت اولیهٔ ورقه است که آن را با A_1 نشان می‌دهیم.

بنابراین می‌توان نوشت :

$$A_2 = A_1(1 + 2\alpha \Delta T) \Rightarrow A_2 - A_1 = 2\alpha A_1 \Delta T$$

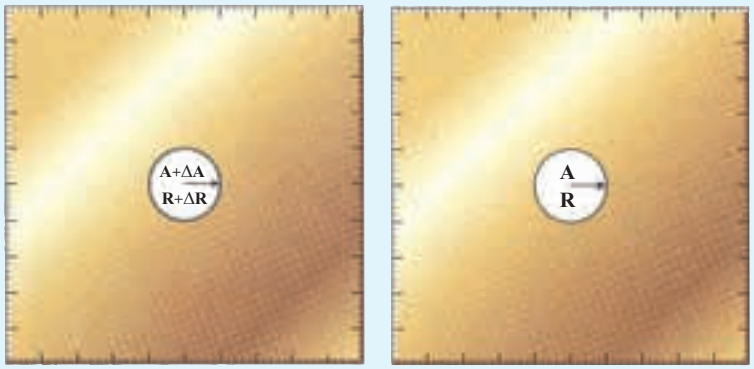
$$\Rightarrow \Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T$$

ب) از رابطهٔ به‌دست آمده در قسمت الف استفاده می‌کنیم. ورقه از جنس مس است. ضریب انبساط طولی مس با استفاده از جدول ۶ـ۵ برابر $17 \times 10^{-6}/^\circ C$ است و بنابراین داریم :

$$A_2 = 2\alpha A_1 \Delta T = 2(1/7 \times 10^{-5})(2500)(50) \simeq 4cm^2$$

فعالیت ۶ـ۱۰

شکل‌های الف و ب نشان می‌دهند که وقتی روی یک صفحهٔ فلزی حفره‌ای دایره‌ای داشته باشیم و صفحه را گرم کنیم، قطر (یا مساحت) حفره بزرگ می‌شود. نشان دهید که اگر چنین صفحه‌ای را گرم کنیم، افزایش مساحت حفره از رابطهٔ $\Delta A = 2\alpha A_1 \Delta T$ به‌دست می‌آید.



(ب) (الف)

انبساط حجمی : حجم بیشتر اجسام با افزایش دما زیاد می‌شود. اگر حجم اولیهٔ جسم (جامد یا مایع) V_1 و افزایش دما ΔT باشد جسم، افزایش حجمی به اندازهٔ ΔV پیدا می‌کند که از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta T \qquad (۶ _ ۱۰)$$

در این رابطه β ضریب انبساط حجمی جامد یا مایع و یکای آن بر کلوین $(\frac{1}{K})$ یا بر درجهٔ سلسیوس $(\frac{1}{^\circ C})$ است.

چون مایع‌ها شکل معینی ندارند انبساط آنها را به‌صورت حجمی بررسی می‌کنیم. انبساط حجمی مایع‌ها به سادگی قابل مشاهده است. در جدول ۶ــ۶ ضریب انبساط حجمی برخی مایع‌ها داده شده است.

جدول ۶ــ۶ــ ضریب انبساط حجمی چند مایع

ماده	ضریب انبساط $(\frac{1}{K})$	ماده	ضریب انبساط $(\frac{1}{K})$
جیوه	$۰/۱۸ \times ۱۰^{-۳}$	اسید استیک	$۱/۱۰ \times ۱۰^{-۳}$
گلیسیرین	$۰/۴۹ \times ۱۰^{-۳}$	بنزن	$۱/۲۵ \times ۱۰^{-۳}$
روغن زیتون	$۰/۷۰ \times ۱۰^{-۳}$	کلروفرم	$۱/۲۷ \times ۱۰^{-۳}$
پارافین	$۰/۷۶ \times ۱۰^{-۳}$	استون	$۱/۴۳ \times ۱۰^{-۳}$
بنزین	$۱/۰۰ \times ۱۰^{-۳}$	اتر معمولی	$۱/۶۰ \times ۱۰^{-۳}$
الکل اتیلیک	$۱/۰۹ \times ۱۰^{-۳}$	آمونیاک	$۲/۴۵ \times ۱۰^{-۳}$

برای بیشتر جامدها انبساط طولی در راستاهای مختلف با ضریب انبساط طولی یکسان صورت می‌گیرد[1]. به همان روشی که در مثال ۶ــ۱۴ نشان دادیم، ثابت می‌شود که ضریب انبساط حجمی این جامدها ۳ برابر ضریب انبساط طولی آنها است.

$$\beta_{\text{جامد}} = ۳\alpha \qquad (۶ _ ۱۱)$$

با مقایسهٔ ضریب انبساط حجمی جامدها با ضریب انبساط حجمی مایعات جدول ۶ــ۶ نتیجه می‌گیریم انبساط حجمی جامدها به‌مراتب کمتر از مایعات است.

۱ــ به چنین جامدهایی اصطلاحاً همسانگرد (ایزوتروپ) می‌گویند.

مثال ۶ـ۱۵

حجم یک شمش آلومینیومی در دمای $10^\circ C$ ، برابر $1000 cm^3$ است. اگر دمای شمش را به $100^\circ C$ برسانیم چقدر بر حجم آن افزوده می‌شود؟

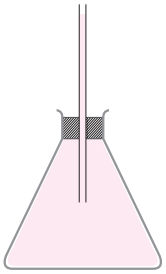
پاسخ : با استفاده از جدول ۶ـ۵ و رابطهٔ ۶ـ۱۱ داریم :

$$\beta = 3\alpha = 3\times 23\times 10^{-6} = 69\times 10^{-6}\ \frac{1}{^\circ C}$$

حال با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۱۰ خواهیم داشت :

$$\Delta V = \beta V_1 \Delta\theta = (69\times 10^{-6})(1000)(100-10) \simeq 6 cm^3$$

مثال ۶ـ۱۶



ارلنی شیشه‌ای را که در دمای $20^\circ C$ گنجایشی برابر با $200/0 cm^3$ دارد، مطابق شکل با گلیسیرین در همان دما پرکرده‌ایم. اگر دمای ظرف و گلیسیرین آن را به $60^\circ C$ برسانیم،

الف) آیا گلیسیرین از ظرف بیرون می‌ریزد؟

ب) اگر پاسخ قسمت الف مثبت است، حجم گلیسیرین سرریز شده چقدر است؟

پاسخ : افزایش حجم گلیسیرین و افزایش گنجایش ظرف را با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۱۰ محاسبه می‌کنیم :

$$\Delta V_{\text{گلیسیرین}} = \beta_{\text{گلیسیرین}} V_1 \Delta T = (49\times 10^{-5})(200/0)(60-20) \simeq 3/9 cm^3$$

$$\Delta V_{\text{ظرف}} = \beta_{\text{شیشه}} V_1 \Delta T = (3\alpha_{\text{شیشه}}) V_1 \Delta T = (200/0)(3\times 9\times 10^{-6})(60-20) \simeq 0/2 cm^3$$

چون افزایش حجم گلیسیرین بیش از افزایش گنجایش ظرف است، پس گلیسیرین از ظرف سرریز می شود. حجم گلیسیرین سرریز شده برابر است با :

$$\Delta V_{\text{گلیسیرین}} - \Delta V_{\text{ظرف}} = 3/9 - 0/2 = 3/7 cm^3$$

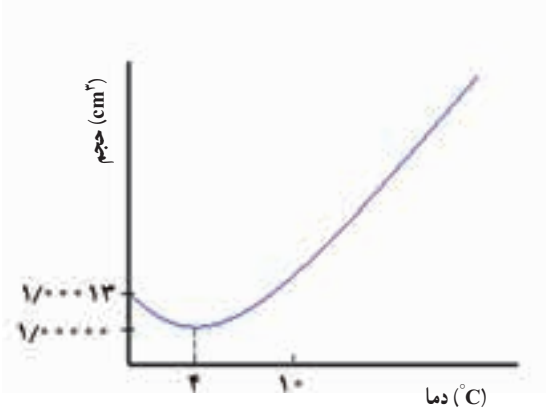
فعالیت ۶ـ۱۱

آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که با آن بتوانید حجم گلیسیرین سرریز شده در مثال ۶ـ۱۶ را اندازه بگیرید. سپس مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده را با هم مقایسه کنید.

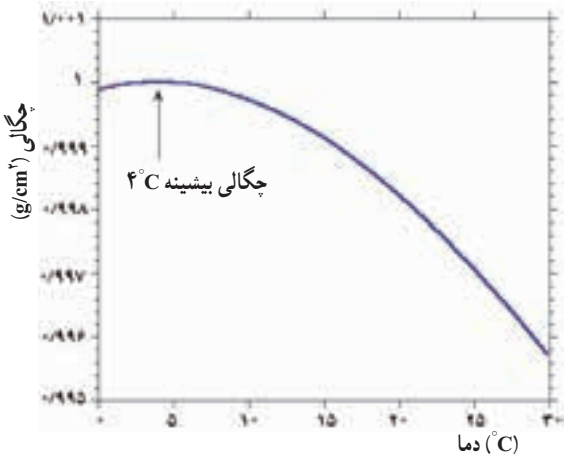
فعالیت ۶ـ۱۲

افزایش دما که به‌طور معمول موجب افزایش حجم اجسام می‌شود، بر جرم آنها تأثیری ندارد. به همین دلیل انتظار داریم که چگالی اجسام با افزایش دما کاهش یابد. رابطهٔ چگالی با تغییر دما $\rho_2 = \rho_1(1-\beta\Delta T)$ است که در آن ρ_1 و ρ_2 به ترتیب چگالی ماده در دماهای T_1 و T_2، β ضریب انبساط حجمی است. درستی این رابطه را تحقیق کنید.

انبساط غیرعادی آب : حجم بیشتر مایع‌ها با کم شدن دما کاهش و در نتیجه چگالی آنها، افزایش می‌یابد. ولی رفتار آب در محدودهٔ دمایی $۴^\circ C$ تا $۰^\circ C$ متفاوت است. یعنی در این محدوده با کاهش دما، حجم آب افزایش و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد. شکل‌های ۶ــ ۷ــ الف و ب به ترتیب نمودار حجم برحسب دما و نمودار چگالی برحسب دما را برای آب شیرین نشان می‌دهد که در آنها رفتار غیرعادی آب در محدودهٔ $۰^\circ C$ تا $۴^\circ C$ دیده می‌شود.



الف) تغییرات حجم آب (شیرین) با دما



ب) تغییرات چگالی آب (شیرین) با دما

شکل ۶ــ۷

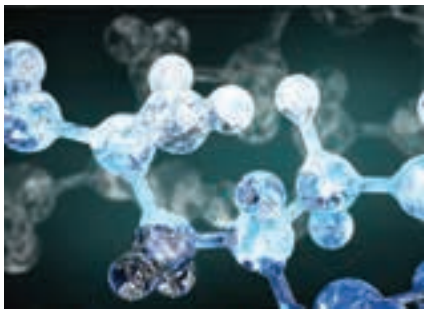
مطالعهٔ آزاد

جدول ضریب انبساط حجمی آب

جدول روبه‌رو ضریب انبساط حجمی آب را در چند دمای مختلف نشان می‌دهد که در توافق با شکل‌های ۶ــ۷ الف و ب است و از روی آن می‌توان به رفتار غیرعادی آب در دماهای $۰^\circ C$ تا $۴^\circ C$ و رفتار طبیعی آن در دماهای بالاتر از $۴^\circ C$ پی برد.

دما ($^\circ C$)	$\beta\,(\frac{۱}{^\circ C})$
۱	-۴۸×۱۰^{-۶}
۴	۰
۷	۴۵×۱۰^{-۶}
۱۰	۸۸×۱۰^{-۶}
۱۵	۱۵۱×۱۰^{-۶}
۲۰	۲۰۷×۱۰^{-۶}

همین تغییر حجم غیرعادی آب است که موجب می‌شود دریاچه‌ها به‌جای اینکه از پایین به بالا یخ بزنند از بالا یخ بزنند. وقتی دمای سطح آب مثلاً از $۱۰^\circ C$ کمی کمتر شود، چگالی آب، نسبت به آب زیر خود افزایش می‌یابد و این آب پایین می‌رود. این رفتار تا رسیدن به دمای $۴^\circ C$ ادامه می‌یابد. ولی همان‌طور که دیدیم در دمای پایین تر از $۴^\circ C$ حجم آب افزایش و در نتیجه چگالی آن کاهش می‌یابد. یعنی سردشدن بیشتر آب موجب می‌شود که چگالی آب سطح دریا نسبت به آب زیر آن کمتر شود و در نتیجه در سطح باقی بماند تا اینکه یخ بزند. بنابراین در حالی که آب زیرِ دریاچه هنوز مایع است و دمایی بیش از صفر درجه دارد، سطح آب یخ می‌زند. اگر آب دریاچه‌ها از پایین به بالا یخ می‌زد،



شکل ۶ــ ۸ــ نمایشی از آرایش مولکول‌های آب در بلور یخ

اثرات زیست‌محیطی زیانبار فراوانی درپی‌داشت و حیات گیاهی و جانوری در عمق دریاچه‌ها از بین می‌رفت. افزون بر این، وجود لایهٔ یخ در سطح دریاچه مانند یک عایق گرمایی عمل می‌کند و مانع سرد شدن آب عمق دریاچه می‌شود.

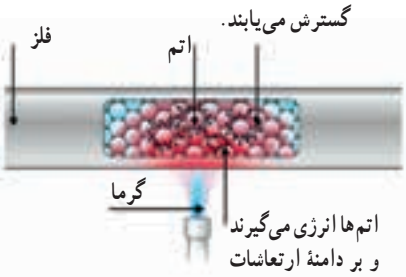
رفتار شگفت‌انگیز آب را می‌توان با ساختار غیرعادی شبکهٔ بلوری یخ توضیح داد. می‌دانیم حجم اشغال شده با آرایش منظم مولکول‌ها در مقایسه با حجم اشغال شده با آرایش نامنظم همان مولکول‌ها کمتر است. مولکول‌های آب در بلور یخ طوری آرایش یافته‌اند که در بعضی نواحی، مولکول‌ها خیلی به هم نزدیک‌اند در حالی که در نواحی دیگر بین آنها فضای خالی وجود دارد (شکل ۶ــ۸). وقتی آب از بلور یخ به حالت مایع تبدیل می‌شود، برخلاف سایر اجسام، آرایش مولکول‌های آن یکنواخت‌تر می‌شود. یعنی فاصلهٔ بین مولکول‌هایی که خیلی به هم نزدیک بودند افزایش می‌یابد در حالی که فاصلهٔ بین مولکول‌هایی که فضای خالی میان آنها وجود داشت کم می‌شود و در نتیجه حجم اشغال شده کاهش می‌یابد. در محدودهٔ دماهای $0^\circ C$ تا $4^\circ C$ بقایای ساختار مولکولی یخ هنوز در آب وجود دارد و موجب رفتار غیرعادی آب می‌شود.

۶ــ۴ انتقال گرما

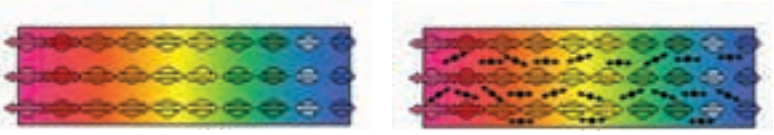
شکل ۶ــ۹ــ در این شکل، هر سه روش انتقال گرما را در تصویری مشاهده می‌کنید.

دیدیم که اختلاف دما باعث شارش گرما از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر می‌شود. این شارش گرما به سه صورت متفاوت انجام می‌شود که عبارت‌اند از رسانش گرمایی، همرفت و تابش گرمایی. در هر فرایند انتقال گرما، ممکن است هر سهٔ این سازوکارها دخالت داشته باشند (شکل ۶ــ۹). انتقال گرما از جسم گرم به جسم سرد تا وقتی ادامه می‌یابد که دو جسم همدما شوند و اصطلاحاً به تعادل گرمایی برسند. در ادامه به بررسی سازوکار هر یک از این روش‌ها می‌پردازیم.

رسانش : بسیاری از ما این تجربه را داریم که انتهای قاشق فلزی درون ظرف غذای روی اجاق روشن را با دست گرفته و داغی آن را احساس کرده‌ایم. در کتاب فیزیک (۱) و آزمایشگاه با انتقال گرما به روش رسانش آشنا شده‌ایم. در واقع ارتعاش اتم‌ها (شکل ۶ــ۱۰) و الکترون‌های آزاد در ناحیهٔ گرم شدهٔ جسم موجب انتقال بخشی از انرژی آنها به اتم‌ها و الکترون‌های بسیار زیاد مجاورشان و در نتیجه انتقال گرما به روش رسانش می‌شود. رسانش گرما در مواد مختلف، متفاوت است. چون الکترون‌ها بسیار کوچک‌اند، به سرعت حرکت می‌کنند و با برخورد با سایر الکترون‌ها و اتم‌ها سبب رسانش گرمایی می‌شوند. بنابراین در رساناهای فلزی سهم الکترون‌های آزاد در رسانش گرمایی بیشتر از اتم‌هاست. در حالی که فلزها رساناهای خوبِ گرما هستند، موادی مانند شیشه، چوب و آجر رساناهای چندان خوبی به‌شمار نمی‌روند (شکل ۶ــ۱۱). به همین دلیل از ماده‌های عایق مخصوصی در دیوارها و سقف بناها استفاده می‌کنند تا از خروج جریان گرما در زمستان و ورود آن در تابستان جلوگیری کنند.



شکل ۶ــ۱۰ــ ارتعاش اتم‌ها موجب انتقال انرژی گرمایی شده است.



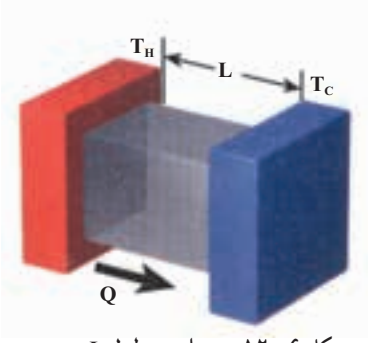
شکل ۶ــ۱۱ــ در رساناهای فلزی، الکترون‌های آزاد نقشی اساسی در رسانش گرمایی بازی می‌کنند.

فعالیت ۶ـ۱۴

برخی آشپزها برای آنکه سیب‌زمینی زودتر آب‌پز شود ابتدا چند سیخ کوچک فلزی درون سیب‌زمینی می‌گذارند و بعد آن را در آب می‌اندازند و گرم می‌کنند. علت این کار آشپزها چیست؟

با شناسایی عوامل مؤثر بر انتقال گرما به روش رسانش می‌توانیم گرمای منتقل شده از یک سر به سر دیگر میله‌ای را محاسبه کنیم.

فرض کنید طول یک میله L و مساحت مقطع آن A باشد (شکل ۶ـ۱۲). دمای انتهای سرد میله را T_C و دمای انتهای گرم میله را T_H می‌نامیم. گرمایی که در مدت زمان t از انتهای گرم میله به انتهای سرد آن شارش می‌یابد را با Q نشان می‌دهیم. نسبت $\frac{Q}{t}$، آهنگ رسانش گرمایی نامیده می‌شود و آن را با H نشان می‌دهیم. تجربه نشان می‌دهد که آهنگ رسانش گرمایی (H) با مساحت مقطع میله (A) و اختلاف دمای دو انتهای میله $(T_H - T_C)$ نسبت مستقیم و با طول میله (L) نسبت وارون دارد، یعنی :



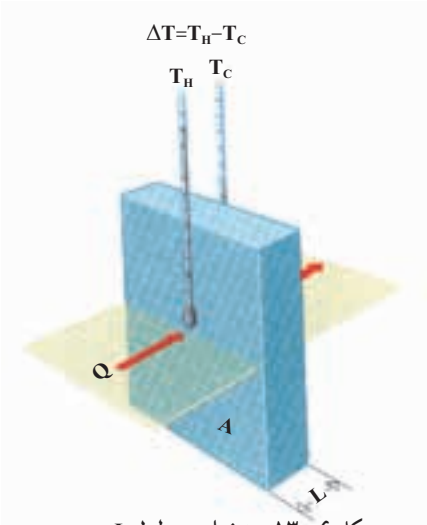
شکل ۶ـ۱۲ــ میله‌ای به طول L و مقطع A بین دومنبع با دماهای T_C و T_H قرار گرفته است.

$$H = \frac{Q}{t} = k\frac{A(T_H - T_C)}{L} \qquad (۶ ــ ۱۲)$$

در این رابطه، k رسانندگی گرمایی است که به جنس میله بستگی دارد. یکای رسانندگی گرمایی در SI، J/s.m.K یا وات بر متر ــ کلوین (W/m.K) است. جدول ۶ــ ۷ رسانندگی گرمایی برخی مواد را به‌دست می‌دهد.

جدول ۶ــ ۷ــ رسانندگی گرمایی برخی از مواد

ماده	رسانندگی گرمایی (W/m.K)	ماده	رسانندگی گرمایی (W/m.K)
پشم شیشه	۰/۰۵	یخ	۲
چوب پنبه	۰/۰۴	سرب	۳۵
هوای خشک	۰/۰۲۴	آهن	۸۰
انواع چوب	۰/۱ تا ۰/۲	آلومینیم	۲۳۵
آب	۰/۶	نقره	۴۲۰
آجر	۰/۶ تا ۰/۸	مس	۴۰۰
انواع شیشه	۰/۶ تا ۱		



شکل ۶ــ۱۳ــ تیغه‌ای به طول L و مقطع A بین دومنبع با دماهای T_C و T_H قرار گرفته است.

اگرچه رابطهٔ ۶ــ۱۲ برای میله بیان شده است، ولی برای هر تیغه یا بُره‌ای با مساحت مقطع A و ضخامت L نیز برقرار است (شکل ۶ــ۱۳).

فعالیت ۶ـ۱۳

موهای خرس های قطبی توخالی هستند. تحقیق کنید این موضوع چه نقشی در گرم نگه‌داشتن بدن آنها در سرمای قطب دارد؟

تصویری بسیار بزرگ شده‌ای از موی یک خرس قطبی

مثال ۶ـ۱۷

طول و عرض شیشهٔ پنجرهٔ اتاقی ۲/۰ m و ۱/۵ m و ضخامت آن ۵mm است، در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای بیرون است، $-۳^\circ C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای درون اتاق است، $+۲^\circ C$ است. آهنگ رسانش گرمایی از طریق شیشه چقدر است؟

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۶ـ۱۲ داریم :

$$H = k\frac{A(T_H - T_C)}{L}$$

آنگاه با قرار دادن $k = ۱W/m.K$ ، $A = ۱/۵ \times ۲/۰ = ۳m^۲$ ، $\Delta T = ۵^\circ C$ و $L = ۰/۰۰۵m$ در رابطهٔ بالا خواهیم داشت :

$$H = ۱ \times \frac{(۳)(۵)}{۰/۰۰۵} = ۳۰۰۰W$$

اگر بخواهیم با استفاده از یک بخاری برقی گرمای هدر رفته از پنجره را جایگزین کنیم، توان گرمایی این بخاری ۳۰۰۰W می‌شود.

مثال ۶ـ۱۸

برای جلوگیری از اتلاف گرما در شیشهٔ پنجره‌های معمولی، آنها را با شیشه‌های دوجداره با لایهٔ میانی هوا جایگزین می‌کنند.

طول و عرض شیشهٔ دوجدارهٔ پنجرهٔ اتاقی به ترتیب ۲m و ۱/۵m، ضخامت هریک از دو لایهٔ شیشه‌ای آن ۵mm و ضخامت لایهٔ میانی هوا ۱۰mm است. در یک روز زمستانی، دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون اتاق است $-۳^\circ C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم درون اتاق است $+۲^\circ C$ است. آهنگ رسانش گرمایی را در این حالت با عدد به‌دست آمده در مثال قبل مقایسه کنید. در این حالت می‌توان شیشهٔ دوجداره را مانند تیغه یا برهای با همان مساحت و همان ضخامت درنظرگرفت که رسانندگی گرمایی مؤثر آن تقریباً با رسانندگی گرمایی هوا برابر است[۱].

۱ــ حل درست مسائلی از این دست با فرض یکسان بودن آهنگ رسانش گرمایی در لایه‌های مختلف انجام می‌شود و به رابطهٔ زیر می‌انجامد که تدریس آن موضوع کار این کتاب نیست،

$$H = A\left(\frac{۱}{\frac{L_۱}{k_۱} + \frac{L_۲}{k_۲} + \cdots + \frac{L_n}{k_n}}\right)(T_H - T_C)$$

در مثال ۶ــ۱۸، $n = ۳$ است.

پاسخ : با استفاده از رابطهٔ ۶ــ ۱۲ داریم :

$$H = k\frac{A(T_H - T_C)}{L}$$

آنگاه با قرار دادن مقادیر داده شده خواهیم داشت

$$H = ۰/۰۲۴ \times \frac{۳ \times ۵}{۰/۰۲} = ۱۸W$$

در این محاسبه از رسانندگی گرمایی هوا، $k = ۰/۰۲۴W/m.K$ استفاده شد.

همان‌طور که می‌بینید عدد به‌دست آمده، تفاوت زیادی (۱۶۷ بار کوچک‌تر) با عدد به‌دست آمده در مثال قبل دارد که این اهمیت استفاده از شیشه‌های دوجداره برای جلوگیری از اتلاف گرما را نشان می‌دهد.

همرفت : وقتی ظرف بزرگی از آب را روی اجاق می‌گذاریم چطور همهٔ آب آن در مدت نه‌چندان زیادی گرم می‌شود؟ بخاری چگونه هوای داخل اتاق را گرم می‌کند؟ انتقال گرما در مایعات و گازها که معمولاً رساناهای گرمایی خوبی نیستند به روش **همرفت**، یعنی همراه با جابه‌جایی بخشی از خود ماده، انجام می‌گیرد. همان‌طور که خواهیم دید این پدیده براثر کاهش چگالی شاره با افزایش دما صورت می‌گیرد. انتقال گرما به روش همرفت را می‌توان به سادگی با انجام آزمایش زیر نمایش داد.

آزمایش ۶ـ۵

وسیله‌های آزمایش : لولهٔ همرفت، گیره و پایه، آب سرد، دانه‌های پرمنگنات پتاسیم یا جوهر، شعلهٔ گاز

شرح آزمایش :

۱ــ لوله را از آب سرد پرکنید و به آرامی چند دانهٔ پرمنگنات پتاسیم (یا چند قطره جوهر) را از دهانهٔ ظرف به داخل آن بریزید.

۲ــ یکی از شاخه‌های قائم لوله را مطابق شکل روی شعله بگیرید و در همان لحظه شاخهٔ قائم دیگر لوله را با دست لمس کنید.

۳ــ دستتان را از شاخهٔ قائم بردارید و در حالی که گرما دادن را ادامه می‌دهید به مایع درون لوله با دقت نگاه کنید. پس از چند دقیقه دوباره همان شاخهٔ قائم لوله را لمس کنید.

۴ــ مشاهدات خود را بنویسید و با بحث در گروه، دلیل هریک از مشاهدات را توضیح دهید.

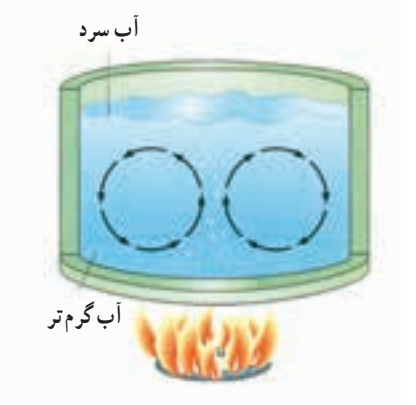
همرفت می‌تواند در همهٔ شاره‌ها، چه مایع و چه گاز، به وقوع بپیوندد. در همرفت، برخلاف رسانش گرمایی، انتقال گرما با انتقال تکه‌هایی از خود ماده صورت می‌گیرد و مولکول‌ها مسافت‌هایی طولانی را طی می‌کنند تا انرژی منتقل شود. وقتی شاره از زیر در تماس با منبعی گرم‌تر از خود قرار گیرد، مولکول‌های زیرین شاره حرکت می‌کنند و بیشتر از هم دور می‌شوند. چگالی این قسمت از

شاره کاهش می‌یابد و به بالا رانده می‌شود. شارهٔ خنک‌تر و چگال‌تر پایین می‌آید و جای شارهٔ گرم شده را می‌گیرد و به این ترتیب جریان‌های همرفتی به‌وجود می‌آیند. گرم شدن هوای داخل اتاق به‌وسیلهٔ بخاری یا شومینه (شکل ۶ــ۱۴)، جریان‌های باد ساحلی (شکل ۶ــ۱۵)، گرم شدن آب درون قابلمه (شکل ۶ــ۱۶)، انتقال گرما از کورهٔ هسته‌ای واقع در مرکز خورشید به سطح آن و ... همگی براثر پدیدهٔ همرفت رخ می‌دهند. همهٔ این مثال‌ها نمونه‌هایی از همرفت طبیعی است.

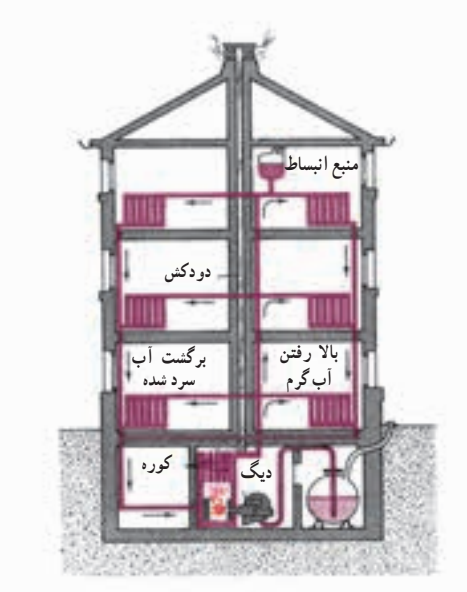
نوع دیگری از همرفت، همرفت واداشته است که در آن شاره به کمک یک تلمبه (طبیعی یا مصنوعی) به چرخش واداشته می‌شود تا با این چرخش انتقال گرما صورت پذیرد. سیستم گرم‌کنندهٔ مرکزی در ساختمان‌ها (شکل ۶ــ۱۷)، سیستم خنک‌کنندهٔ موتور اتومبیل، دستگاه گردش خون در بدن جانوران خونگرم و ... مثال‌هایی از انتقال گرما به روش همرفت واداشته هستند.

شکل ۶ــ۱۴ــ گرم شدن هوای اتاق به روش همرفت

شکل ۶ــ۱۵ــ جریان‌های باد ساحلی در شب و روز، ناشی از پدیدهٔ همرفت. به جهت چرخش هوا توجه کنید.



شکل ۶ــ۱۶ــ گرم شدن آب درون قابلمه به روش همرفت



شکل ۶ــ۱۷ــ طرحی از سیستم گرم‌کنندهٔ مرکزی در ساختمان‌ها

وارونگی هوا[1]: وارونگی هوا که معمولاً در شب‌های آرام و بدون ابر زمستان شروع می‌شود پیامد توقف همرفت طبیعی در جوّ زمین است. در چنین شب‌هایی لایهٔ هوای بسیار سردی بین سطح زمین و لایهٔ هوای گرم بالاتر قرار می‌گیرد. این لایهٔ هوای گرم، پیش از این براثر پدیدهٔ همرفت در یک روز معمولی ایجاد شده است. در واقع سردی زیاد لایهٔ هوای سرد مجاور زمین آن را چگال‌تر از هوای سردی می‌کند که در شرایط طبیعی به پایین رانده می‌شود (شکل ۶ــ۱۸ الف) و بدین ترتیب مانع از چرخش هوا براثر پدیدهٔ همرفت می‌شود. در این وضعیت گرد و غبار و گازهای آلایندهٔ شهری واقع در لایهٔ هوای سرد مجاور زمین در این لایه حبس می‌شوند (شکل ۶ــ۱۸ ب). به این پدیده وارونگی هوا می‌گویند. وارونگی هوا تا وقتی تداوم دارد که براثر وزیدن باد لایه‌های هوای سرد و گرم

۱ ــ Air Inversion

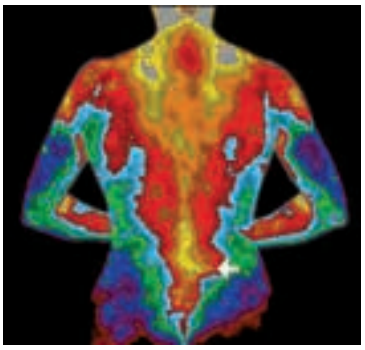
جابه‌جا شود یا با افزایش دمای قابل توجه لایهٔ سرد مجاور زمین، همرفت طبیعی دوباره در جوّ زمین از سرگرفته شود. با توجه به اینکه در این پدیده الگوی تغییرات دما در یک روز طبیعی برهم می‌خورد به آن وارونگی دما نیز گفته شده است.

الف) بالا رفتن هوای گرم در یک روز معمولی

ب) وارونگی هوا مانع از بالا رفتن هوای گرم می‌شود.

شکل ۶ــ۱۸ــ وارونگی هوا باعث می‌شود گرد و غبار و گازهای آلاینده که عمدتاً ناشی از تردد خودروها است در هوای سرد مجاور زمین حبس شوند. همرفت طبیعی، در حالت عادی باعث پراکندگی گرد و غبار و گازهای آلاینده می‌شود.

تابش گرمایی : همهٔ ما تجربهٔ گرم شدن در نور خورشید را داریم. با نزدیک کردن دستمان به اجسام گرمی مانند کتری روی اجاق روشن یا رادیاتور گرم شوفاژ نیز تجربهٔ مشابهی خواهیم داشت. دست خود را زیر صفحهٔ اتوی روشنی نگهدارید؛ دست شما گرم می‌شود. آیا گرما با روش رسانش یا همرفت از اتو به دستتان رسیده است؟ می‌دانید که هوا رسانای خوبی نیست و چون دست شما زیر اتو قرار دارد انتقال گرما به روش همرفت نیز نمی‌تواند رخ داده باشد. خورشید، اتوی داغ، کتری، رادیاتور شوفاژ و ... از خود پرتوهایی گسیل می کنند که دست ما با جذب کردن آن گرم می‌شود. این پرتوها از نوع امواج الکترومغناطیسی هستند که در درس فیزیک سال آخر دبیرستان با آنها بیشتر آشنا می‌شوید و خواهید دید که تولید امواج الکترومغناطیسی به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. یکی از این روش‌ها تابش الکترومغناطیسی جسم به دلیل دمای آن است. در واقع هر جسم می‌تواند از خود تابش الکترومغناطیسی گسیل کند که شدت و بسامد این تابش به دمای جسم بستگی دارد و به همین دلیل آن را تابش گرمایی می‌نامیم. مثلاً سطح بدن یک فرد معمولی در محیطی با دمای $22^{\circ}C$ تابشی گرمایی با آهنگی در حدود $100W$ دارد (شکل ۶ــ۱۹) در دماهای متداول، اجسام معمولاً تابش فروسرخ دارند. این نوع انتقال گرما به محیط مادی نیاز ندارد و با سرعت نور در خلأ منتشر می‌شود. تابش گرمایی از سطح هر جسم علاوه بر دما به مساحت، میزان صیقلی بودن و رنگ سطح آن جسم بستگی دارد (شکل ۶ــ۲۰). سطوح صاف و درخشان با رنگ‌های روشن تابش گرمایی کمتری دارند، در حالی که تابش گرمایی سطوح تیره، ناصاف و مات بیشتر است. تف‌سنج‌های تابشی یکی از وسایل اندازه‌گیری دما برای اجسام داغ هستند که اساس کار آنها بر تابش گرمایی گسیل شده از سطح اجسام بناشده است.

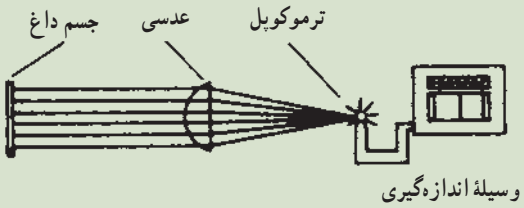


شکل ۶ــ۱۹ــ بدن یک شخص معمولی با آهنگی درحدود $100W$ تابش گرمایی می‌کند.

شکل ۶ــ۲۰ــ درون مکعب *لِسلی* آب داغ می‌ریزند. تابش گرمایی از چهار وجه جانبی مکعب، که رنگ‌های متفاوتی دارند، با هم فرق دارد.

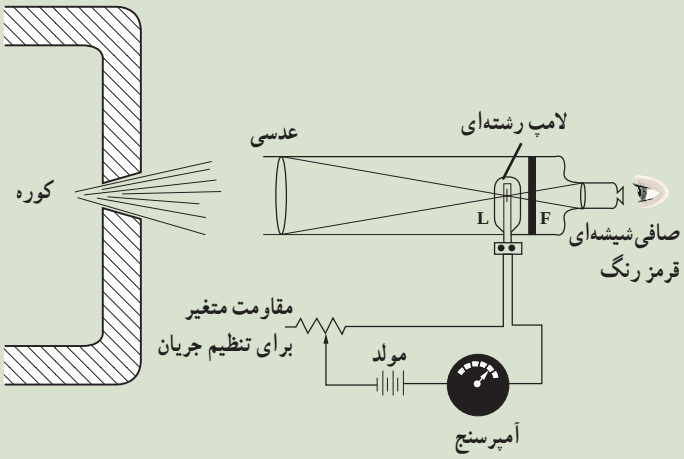
تَف‌سنج (پیرومتر) : تف‌سنج‌ها، دماسنج‌هایی هستند که براساس تابش حاصل از اجسام طراحی شده‌اند. اهمیت تف‌سنج‌ها در این است که برخلاف سایر دماسنج‌ها بدون تماس با جسمی که می‌خواهیم دمای آن را اندازه بگیریم، دمای جسم را اندازه می‌گیرند. دو نوع معروف این دماسنج‌ها، عبارت‌اند از تف‌سنج تابشی و تف‌سنج نوری.

الف) تَف‌سنج تابشی : این تف‌سنج وسیله‌ای است که دمای جسم داغ را با متمرکز کردن تابش گرمایی گسیل شده از جسم روی یک ترموکوپل یا آرایه‌ای از ترموکوپل‌ها اندازه می‌گیرد. می‌توان دمای جسم را از روی جریان خروجی ترموکوپل تعیین کرد.



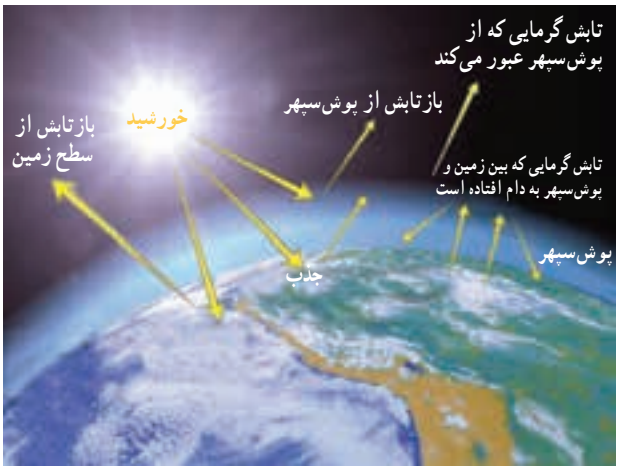
الف) تف‌سنج تابشی و طرحی از ساختار آن

ب) تَف‌سنج نوری : این تف‌سنج وسیله‌ای است که برای اندازه‌گیری دمای اجسام خیلی داغ که تابشی مرئی دارند (مانند کوره‌ها) به‌کار می‌رود. اساس کار این تف‌سنج، مقایسهٔ رنگ و شدت نور تابیده از جسم داغ، با رنگ و شدت نور یک لامپ رشته‌ای است. نور تابیده از جسم داغ، توسط یک عدسی روی رشتهٔ لامپ متمرکز می‌شود و ناظر که از طریق یک دوربین رشتهٔ ملتهب لامپ را در زمینهٔ نور حاصل از جسم داغ می‌بیند، شدت جریان لامپ را آنقدر تغییر می‌دهد تا روشنایی لامپ برابر روشنایی زمینه شود، به‌طوری که رشتهٔ لامپ محو شود. با اندازه‌گیری این جریان می‌توان دمای جسم داغ را تعیین کرد.



ب) تف‌سنج نوری و طرحی از ساختار آن

اثر گلخانه‌ای[1] : بخشی از نور خورشید با عبور از جوّ زمین به سطح آن می‌رسد. بخش عمدهٔ این نور جذب زمین می‌شود، زمین گرم می‌شود و با تابش گرمایی از خود امواج فروسرخ گسیل می‌کند. وجود گازهایی مانند CO_2، بخار آب و متان (CH_4) ــ که مولکول‌های جذب‌کنندهٔ بسیار خوبی برای امواج فروسرخ هستند ــ در لایهٔ پوش‌سپهر (استراتوسفر) جوّ زمین (لایه‌ای حدوداً در فاصلهٔ ۱۰ تا ۱۸ کیلومتری سطح زمین) باعث کدر شدن این لایه برای تابش‌های فروسرخ می‌شود. این لایه بیشترِ تابش گرمایی حاصل از زمین را جذب می‌کند. خود این لایه نیز تابش گرمایی می‌کند. بخشی از تابش گرمایی لایهٔ پوش‌سپهر از جو خارج می‌شود، ولی بیشتر آن به زمین بازمی‌گردد و به این ترتیب رفت و برگشتی از تابش گرمایی بین این لایه و سطح زمین رخ می‌دهد. در تشابه با گلخانه‌ها که با ایجاد محیطی محصور مانع از جریان هوا و خروج هوای گرم از گلخانه‌ها می‌شوند، به این به دام افتادن تابش گرمایی بین لایهٔ پوش‌سپهر و سطح زمین اثر گلخانه‌ای و به گازهای موجود در لایهٔ پوش‌سپهر که سبب این پدیده می‌شوند گازهای گلخانه‌ای می‌گویند. اگر لایهٔ پوش‌سپهر وجود نداشت، دمای میانگین سطح زمین چیزی در حدود $-18^\circ C$ می‌شد ولی اینک این دما در حدود $+15^\circ C$ است؛ یعنی اثر گلخانه‌ای حدود $33^\circ C$ به دمای میانگین سطح زمین افزوده است (شکل ۶ــ۲۱).



شکل ۶ــ۲۱ــ جذب، بازتابش و تابش گرمایی در جو و سطح زمین و اثر گلخانه‌ای

با افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای درپوش‌سپهر، اثر گلخانه‌ای تشدید می‌شود و بدین ترتیب دمای زمین افزایش می‌یابد. درچند دههٔ اخیر به دلیل فعالیت‌های مختلف صنعتی و افزایش آلاینده‌هایی مثل CO_2 در جو زمین، غلظت گازهای گلخانه‌ای در لایهٔ پوش‌سپهر زیادتر از قبل شده و دمای سطح زمین بالا رفته است.

خوب است بدانید که همواره درحالت تعادل، انرژی تابشی جذب شده توسط سطح زمین با انرژی تابشی گسیل شده از آن (بازتابش و تابش گرمایی) برابر است. همین برابری در خارجی‌ترین سطح جو زمین نیز وجود دارد. جذب و گسیل انرژی تابشی در درون خود جو نیز برابر است.

۱ــGreenhouse effect

قانون گازهای کامل (آرمانی) : به گاز درون یک ظرف دربسته، مثلاً گاز درون یک قوطی اسپری خوش‌بوکننده فکر کنید. با داغ کردن این گاز، جنبش مولکولی در آن بسیار زیاد می‌شود و فشار وارد از گاز به دیواره‌های ظرف افزایش می‌یابد و این می‌تواند موجب ترکیدن ظرف شود. اگر درِ یک بطری نوشابهٔ پلاستیکی و توخالی را ببندیم و آن را درونِ جایخی یخچال بگذاریم، پس از مدتی بطری مچاله می‌شود. شکل ۶ــ۲۲ مخزنی را نشان می‌دهد که به همین دلیل مچاله شده است. شکل ۶ــ۲۳ یک اسباب‌بازی را نشان می‌دهد که مخزن کوچک شیشه‌ای آن تا نیمه از یک مایع رنگی پرشده است. وقتی مخزن شیشه‌ای را در دستان خود بگیرید، فشار هوا و بخار مایع در نیمهٔ خالی مخزن زیاد می‌شود و سطح مایع را به طرف پایین می‌راند. این امر سبب می‌شود مایع در لولهٔ باریک و مارپیچ بالا رود. هرچه دستان شما گرم‌تر باشد و بهتر مخزن شیشه‌ای را دربرگیرد، مایع در لولهٔ باریک بیشتر بالا می‌رود.

شکل ۶ــ۲۲ــ سرد شدنِ هوای درون مخزن باعث کاهش فشار این هوا و در نتیجه مچاله شدن مخزن شده است.

شکل ۶ــ۲۳ــ با در دست گرفتن حباب شیشه‌ای و گرم کردن آن، مایع رنگی در لولهٔ مارپیچ بالا می‌رود.

دانشمندانی مانند بویل، ماریوت، شارل، گیلوساک و ... تلاش‌های بسیاری کرده‌اند تا رابطهٔ بین فشار، حجم و دمای مقدار معینی گاز درون یک محفظه را بیابند. شکل ۶ــ۲۴ استوانه (سیلندر) مدرّجی را نشان می‌دهد که مقداری گاز در آن محبوس شده است. گاز، زیر پیستونی قرار دارد که می‌تواند به‌راحتی درون استوانه بالا و پایین برود. دماسنج و فشارسنجی، دما و فشار گاز را نشان می‌دهند و حجم گاز نیز از درجه‌بندی روی بدنهٔ استوانه معلوم می‌شود. برای گرم یا سرد کردن گازِ درون استوانه می‌توانیم دستگاه را در محیطی سرد یا گرم قرار دهیم و همچنین با جابه‌جا کردن پیستون می‌توان حجم گاز را به میزان دلخواه تغییر داد.

اگر گاز درون محفظه به اندازهٔ کافی رقیق و یا چگالی آن به حدّ کافی کم باشد، یعنی مولکول‌های گاز آنقدر از هم دور باشند که با هم برهم‌کنش نداشته باشند، گاز را کامل (آرمانی) می‌نامیم. اگر تعداد مول‌های گاز کامل درون ظرفی ثابت باشد، نسبت حاصل‌ضرب فشار در حجم به دمای مطلق گاز، مقدار ثابتی است، یعنی $\frac{PV}{T}$ برای آن تغییر نمی‌کند. به عبارتی دیگر، اگر فشار، حجم و دمای گاز کامل در یک حالت به ترتیب P_1، V_1 و T_1 و در حالتی دیگر به ترتیب P_2، V_2 و T_2 باشد، داریم :

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} = \cdots \qquad (۶ــ۱۳)$$

شکل ۶ــ۲۴ــ دستگاه تحقیق قانون گازهای کامل

گرچه رابطهٔ ۶ــ۱۳ برای گازهای کامل (آرمانی) برقرار است ولی برای گازهای واقعی که چگالی آنها به حدّ کافی کم باشد نیز با دقت نسبتاً خوبی برقرار است. در این رابطه P فشار مطلق گاز (نه فشار پیمانه‌ای) و دما برحسب کلوین است.

فعالیت ۶ـ۱۵

با وجود تلاش در جهت ثابت نگه‌داشتن فشار هوای درون هواپیما، مقدار آن همواره کمتر از فشار هوای روی زمین است. وقتی هواپیما بالا می‌رود و فشار هوا کم می‌شود، بسته‌های نوشیدنی یا دِسِر باد می‌کنند و حتی گاهی درشان باز می‌شود. با فرض ثابت بودن دما، این پدیده را توضیح دهید.

مثال ۶ـ۱۹

زیرِ پیستون یک سیلندر، هوایی با حجم $۱۲۰cm^۳$ و فشار یک اتمسفر وجود دارد. با فشردن پیستون، حجم هوای محبوس را به $۲۰cm^۳$ می‌رسانیم، در حالی که دمای آن را ثابت نگه داشته‌ایم. اکنون فشار هوا چقدر است؟ (هوای محبوس درون سیلندر را گاز کامل فرض کنید.)

پاسخ : چون دما ثابت است، داریم :

$$T_۱ = T_۲$$

و در نتیجه رابطهٔ (۶ــ ۱۳) به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$P_۱V_۱ = P_۲V_۲$$

این رابطه که آن را حدود ۳۵۰ سال پیش رابرت بویل[۱] انگلیسی و امه ماریوت[۲] فرانسوی مستقل از هم به‌دست آوردند، به قانون بویل ــ ماریوت مشهور است.

در این مثال $P_۱ = ۱atm$، $V_۱ = ۱۲۰cm^۳$، $V_۲ = ۲۰cm^۳$ و $P_۲$ مجهول است. در نتیجه داریم : $(۱)(۱۲۰)=P_۲(۲۰)$ و از آنجا $P_۲ = ۶atm$ می‌شود.

فعالیت ۶ ـ ۱۶

برای بررسی درستی قانون بویل ــ ماریوت آزمایشی را طراحی کنید.

مثال ۶ـ۲۰

در آزمایشی، دمای مقدار معینی گاز اکسیژن را در فشار ثابت از $۲۷^\circ C$ به $۸۷^\circ C$ می‌رسانیم. اگر حجم گاز ابتدا ۲/۰ لیتر باشد، حجم آن را در پایان آزمایش حساب کنید.

پاسخ : در این آزمایش فشار ثابت مانده است، یعنی

$$P_۱ = P_۲$$

بنابراین رابطهٔ ۶ــ۱۳ به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$\frac{V_۱}{T_۱} = \frac{V_۲}{T_۲}$$

۱ــ Robert Boyle (1627 – 1691)

۲ ــ Edme Mariotte (1620 – 1684)

این رابطه را در حدود ۲۰۰ سال پیش ژاک‌شارل[1] و ژوزف گی‌ـ لوساک[2] به‌طور مستقل از یکدیگر به‌دست آوردند و به قانون شارل‌ـ گی‌لوساک معروف است.

با استفاده از داده‌های این مثال داریم :

$T_1 = ۲۷ + ۲۷۳ = ۳۰۰K \qquad V_1 = ۲/۰ \text{ liter}$

$T_2 = ۸۷ + ۲۷۳ = ۳۶۰K \qquad V_2 = ?$

بنابراین داریم :

$$\frac{۲/۰}{۳۰۰} = \frac{V_2}{۳۶۰}$$

و در نتیجه $V_2 = ۲/۴\text{liter}$ می‌شود.

فعالیت ۶ ـ ۱۷

سر سُرنگی شیشه‌ای (که پیستون آن آزادانه حرکت می‌کند) را بسته و آن را درون ظرف آبی می‌گذاریم. توضیح دهید با روشن کردن چراغ زیر ظرف، هریک از کمیت‌های دما، حجم و فشار هوای درون سرنگ چگونه تغییر می‌کند؟

مثال ۶ـ۲۱

درون استوانه‌ای ۱۲ لیتر گاز اکسیژن با دمای $۷^\circ C$ وجود دارد. فشار گاز درون استوانه را با فشارسنجی اندازه می‌گیریم. فشارسنج ۱۴atm را نشان می‌دهد. دمای گاز را به $۷۷^\circ C$ و حجم آن را به ۲۵ لیتر می‌رسانیم. فشاری که فشارسنج در پایان نشان می‌دهد، چند اتمسفر است؟ فشار هوای بیرون استوانه ۱atm است و فرض کنید گاز درون محفظه، گاز کامل است.

پاسخ : می‌دانیم فشارسنج، فشار پیمانه‌ای (سنجه‌ای) را نشان می‌دهد و در قانون گازهای کامل باید از فشار مطلق استفاده کنیم. بنابراین :

$$\begin{cases} P_1 = P_{g_1} + P_0 = ۱۴ + ۱ = ۱۵\text{atm} \\ V_1 = ۱۲\text{liter} \\ T_1 = \theta_1 + ۲۷۳ = ۷ + ۲۷۳ = ۲۸۰K \end{cases} \qquad \begin{cases} P_2 = ? \\ V_2 = ۲۵\text{liter} \\ T_2 = \theta_2 + ۲۷۳ = ۷۷ + ۲۷۳ = ۳۵۰K \end{cases}$$

با توجه به قانون گازهای کامل داریم :

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{۱۵ \times ۱۲}{۲۸۰} = \frac{P_2 \times ۲۵}{۳۵۰} \Rightarrow P_2 = ۹\text{atm}$$

بنابراین فشاری که اکنون فشارسنج نشان می‌دهد برابر است با $P_{g_2} = P_2 - P_0 = ۹ - ۱ = ۸ \text{ atm}$

۱ـ Jacques A.S. Charles (1746 – 1823)

۲ـ Josef Gay – Lussac (1778 – 1850)

اسماعیل جَزَری

بدیع‌الزّمان ابوالعزّ اسماعیل‌بن رزّاز جزری مشهور به اسماعیل جزری از مهندسان به نام اسلام در سدهٔ ششم هجری قمری است. تنها اثر به‌جامانده از او کتابی به نام «الجامع بین‌العلم و العمل النافع فی صناعه الحیل» که به اختصار «الحیل» نیز نامیده شده است. این کتاب به زبان عربی است و سندی مهم در تاریخ فنّاوری محسوب می‌شود. مختصر اطلاعاتی که از زندگانی جزری در اختیار داریم مبتنی بر مطالب خود او در مقدمهٔ کتابش است. تاریخ تولد او مشخص نیست، ولی از قراین چنین برمی‌آید که او در بین جمادی‌الاخر و شعبان سال ۶۰۲ هجری قمری درگذشته است. در مورد نژاد و قومیت وی نیز در منابع چیزی نمی‌توان یافت ولی با توجه به نام عربی او و قرائن آن زمان فرض می‌شود که وی عرب بوده است، هرچند فرضیه‌هایی در مورد آشوری، ایرانی، ترک یا کُرد بودن وی نیز وجود دارد.

جزری در شهر «آمد» می‌زیست که فرمانروایان آن در دیار بکر حکومت می‌کردند و همان‌طور که در مقدمهٔ کتاب خود آورده است، کتاب «الحیل» را به‌دستور ناصرالدین محمود فرمانروای آن ملک، و بین سال‌های ۵۹۷ تا ۶۰۲ هجری قمری نوشته است. کتاب «الحیل» یکی از مهم‌ترین و برجسته ترین کتاب‌های مهندسی مکانیک در تاریخ تمدن اسلامی محسوب می‌شود. کتاب به شش‌بخش تقسیم می‌شود. بخش اول شامل شرح شش نوع ساعت آفتابی و چهار ساعت شمعی؛ بخش دوم شرح ده دستگاه خودکار توزیع نوشیدنی؛ بخش سوم شرح چهار آفتابه و ظرف خودکار برای ریختن آب و شستشوی دست و شش تشت اندازه‌گیری خون هنگام رگ‌زنی؛ بخش چهارم شرح شش فواره است که در فاصله‌های زمانی مشخصی به‌طور خودکار تغییر شکل می‌دهند؛ بخش پنجم شرح پنج دستگاه آب‌کشی از آبگیر و بخش ششم شامل توصیفی از دری است که از برنج ریخته‌گری شده ساخته بود و نیز شرح وسیله‌ای هندسی برای یافتن مرکز دایرهٔ گذرنده بر هر سه نقطهٔ دلخواه واقع بر یک صفحه یا سطح یک کره است.

جزری برای هر دستگاه یک تصویر اصلی رسم کرده است که نشان‌دهندهٔ شکل کلی دستگاه است. مثلاً شکل روبه‌رو تصویری از دستگاهی است که برای بالاآوردن آب آبگیر یک چاه به کمک یک چارپا در این کتاب رسم شده است.

واضح است برای طراحی این دستگاه به محاسبات دقیقی نیاز است؛ از جمله قطر چرخ‌دنده‌ها، تعداد دنده‌ها، استحکام چرخ دنده‌ها و محورها و به‌ویژه بار ناشی از وزن آب درون ملاقه‌ها که نخست به محور و از آنجا به چرخ‌دنده‌های آن و سپس به چرخ‌دنده‌های قطاعی وارد می شود. البته مهندسان آن دوره روش ترسیم سه‌بُعدی تصاویر را نمی‌دانستند و رسم فنّی به شکل امروزی وجود نداشت، ولی این نقص مانع از درک عملکرد دستگاه‌های کتاب نمی‌شود و دستگاه‌هایی که در این کتاب توضیح داده شده است همگی از نظر فنی درست و قابل ساخت‌اند و سه نمونه از آنها در جشنوارهٔ جهانی اسلام در سال ۱۹۷۶ (۱۳۵۵ هجری شمسی) به‌نمایش درآمده است. در کتاب جزری واژه‌ها و اصطلاحات فنّی بسیاری به زبان فارسی وجود دارد که نشان‌دهندهٔ تأثیر عمیق ایرانیان بر فنّاوری جهان اسلام است.

پرسش‌های فصل ششم

۱ هنگامی که با دماسنج جیوه‌ای دمای آبی را اندازه می‌گیرید، موقع خواندن دما، باید مخزن دماسنج حتماً درون آب باشد، ولی وقتی پزشک دمای بدن بیمار را اندازه می‌گیرد، دماسنج را از محل تماس با بدن بیمار دور می‌کند، بعد دما را می‌خواند. چه تفاوتی بین دماسنج پزشکی و دماسنج جیوه‌ای معمولی وجود دارد که این روش اندازه‌گیری را توجیه می‌کند؟

۲ کدام گزینه دربارهٔ فرایند ذوب درست است؟

الف) افزایش فشار وارد بر جسم در بیشتر موارد، سبب پایین‌رفتن نقطهٔ ذوب می‌شود.

ب) افزایش فشار بر روی یخ، سبب افزایش نقطهٔ ذوب آن می‌شود.

پ) فرایند ذوب، عملی گرماگیر است.

ت) گرمایی که جسم جامد در نقطهٔ ذوب خود می‌گیرد تا به مایع تبدیل شود، سبب تغییر دمای آن نمی‌شود.

ث) دادن گرمای نهان ذوب به جامدی که به نقطهٔ ذوب رسیده است، آن را ذوب می‌کند.

۳ یکی از روش‌های بالابردن دمای یک جسم، دادن گرما به آن است. اگر به جسمی گرما دهیم، آیا دمای آن حتماً بالا می‌رود؟ توضیح دهید.

۴ قبل از تزریق دارو یا سرُم به یک بیمار، محل تزریق را با الکل تمیز می‌کنند. این کار سبب احساس خنکی در محل تزریق می‌شود. علت را توضیح دهید.

۵ چرا سطح بیرونی بطری نوشابهٔ سرد، در هوای گرم عرق می‌کند؟

۶ الف) آیا می‌توان یخ را بدون آنکه ذوب شود تا دمایی بالاتر از $0^\circ C$ گرم کرد؟

ب) آیا می‌توان آب را بدون آنکه یخ ببندد، تا دمایی پایین‌تر از $0^\circ C$ سرد کرد؟

۷ برای خنک کردن موتور اتومبیل لازم است مایعی نظیر مخلوط ضد یخ با آب و یا آب معمولی در اطراف سیلندر و درون حفره‌های سیلندر گردش کند. بهتر است گرمای ویژهٔ مایع کم باشد یا زیاد؟ چرا؟ چه عوامل دیگری نیز می‌تواند دارای اهمیت باشد؟

۸ چه روش‌هایی پیشنهاد می‌کنید که نتیجهٔ آزمایش اندازه‌گیری گرمای ویژه از دقت بیشتری برخوردار باشد؟ توضیح دهید.

مسائل فصل ششم

۱ دماهای زیر را بر حسب درجهٔ سلسیوس مشخص کنید :

الف) $0K$ ب) $273K$ پ) $373K$ ت) $546K$

۲ هنگامی که $1kg$ آب را با گرمکن غوطه‌ور در آب به مدت ۵ دقیقه گرم می‌کنیم، دمای آب $30^\circ C$ بالا می‌رود.

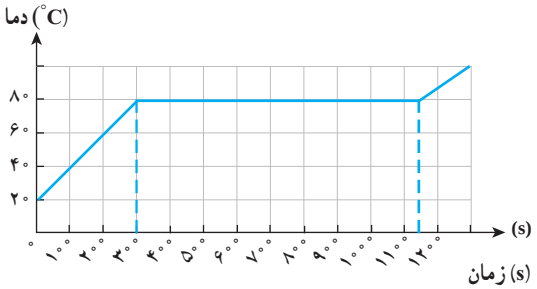
الف) توان متوسط گرمکن را حساب کنید.

ب) اگر همین گرمکن آب را به مدت ۹ دقیقه گرم کند، دمای آن‌را چقدر افزایش خواهد داد؟

۳ دمای یک قطعه فلز ۰/۶ کیلوگرمی را توسط یک گرمکن ۵۰ واتی در ۱۱۰s از $18^\circ C$ به $38^\circ C$ رسانده‌ایم. این آزمایش برای گرمای ویژهٔ فلز چه مقداری را ارائه می‌دهد؟ حدس می‌زنید که این جواب از مقدار واقعی برای گرمای ویژه بیشتر است یا کمتر؟ توضیح دهید.

۴ گرماسنجی به جرم ۲۰۰ گرم از مس ساخته شده است. یک قطعهٔ ۸۰ گرمی از یک مادهٔ نامعلوم همراه با ۵۰ گرم آب به درون گرماسنج ریخته می‌شود. دمای این مجموعه $30^\circ C$ است. در این هنگام ۱۰۰ گرم آب $70^\circ C$ به گرماسنج اضافه می‌شود، دمای تعادل $52^\circ C$ می‌شود. گرمای ویژهٔ مادهٔ نامعلوم را محاسبه کنید.

۵ به یک جسم جامد ۰/۵ کیلوگرمی توسط یک گرمکن ۱۰۰ واتی گرما می‌دهیم. منحنی تغییرات دمای این جسم با زمان در شکل روبه‌رو نشان داده شده است.



الف) چه زمانی طول می‌کشد تا این جامد به نقطهٔ ذوب خود برسد؟

ب) با استفاده از نمودار، گرمای ویژهٔ جامد و گرمای نهان ویژهٔ ذوب آن‌را محاسبه کنید.

۶ گرمکنی در هر ثانیه ۲۰۰ ژول انرژی فراهم می‌کند. چه مدت زمان طول می‌کشد تا این گرمکن ۰/۱ کیلوگرم آب $100^\circ C$ را به بخار آب $100^\circ C$ تبدیل کند؟ این گرمکن در همین مدت زمانی، چه مقدار یخ $0^\circ C$ را به آب $0^\circ C$ می‌تواند تبدیل کند؟

۷ یک گرمکن که با آهنگ ثابت ۵۰۰ وات انرژی تولید می‌کند، به‌طور کامل در یک قطعه یخ بزرگ با دمای $0^\circ C$ گذاشته شده است. در مدت ۱۳۲۰ ثانیه، ۲ کیلوگرم آب با دمای $0^\circ C$ تولید می‌شود. گرمای نهان ویژهٔ ذوب یخ را حساب کنید.

۸ یک گرمکن ۵۰ واتی غوطه‌ور در آب به‌طورکامل در ۱۰۰ گرم آب درون یک گرماسنج قرار داده می‌شود.

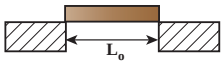
الف) این گرمکن در مدت یک دقیقه دمای آب و گرماسنج را از $20^\circ C$ به $25^\circ C$ می‌رساند. ظرفیت گرمایی گرماسنج را حساب کنید.

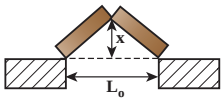
ب) چه مدت طول می‌کشد تا دمای آب درون گرماسنج از $25^\circ C$ به نقطهٔ جوش ($100^\circ C$) برسد؟

پ) چه مدت طول می‌کشد تا ۲۰ گرم آب درون این گرماسنج به بخار تبدیل شود؟

۹ یک مادهٔ فولادی ابتدا تا دمای $800^\circ C$ گرم شده و سپس در روغنی به جرم 2kg و دمای $10^\circ C$ فرو برده می‌شود. درنتیجه، دمای روغن به اندازهٔ $40^\circ C$ افزایش می‌یابد. جرم مادهٔ فولادی در صورتی که دمایش در روغن به اندازهٔ $20^\circ C$ کم شده باشد، چقدر است؟ گرمای ویژه فولاد و روغن به ترتیب برابر با $c_{فولاد} = 0/63\,kJ/kgK$ و $c_{روغن} = 1/9\,kJ/kgK$ است.

۱۰ براثر افزایش دما به اندازهٔ $32^\circ C$، میله‌ای که در مرکز آن شکافی وجود دارد به بالا تاب می‌خورد. اگر فاصلهٔ ثابت $L_0 = 3/77m$ و ضریب انبساط خطی میله $25\times10^{-6}/^\circ C$ باشد، بالارفتگی x مرکز میله چقدر است؟





۱۱ با استفاده از مقدارهای ضریب انبساط طولی درجدول ۶ــ۴، انبساط تیرآهنی با طول اولیهٔ ۲۵ متر، دراثر افزایش دمای از $-10^\circ C$ تا $30^\circ C$ را حساب کنید.

۱۲ با استفاده از جدول ۶ــ۴ حساب کنید که چه مقدار افزایش دما باعث می‌شود که طول یک خط‌کش ۰/۵ متری برنجی ۱/۱ میلی‌متر افزایش یابد.

۱۳ طول‌های یک سیم آهنی و یک سیم مسی در دمای $20^\circ C$ با هم یکسان و برابر $100m$ است. آیا در دمای $60^\circ C$ اختلافی در طول سیم‌ها مشاهده می‌شود؟ اگر پاسخ مثبت است مقدار آن را به‌دست آورید.

۱۴ مقداری نفت خام در مخزنی استوانه‌ای به ارتفاع $h=10m$ ریخته شده است. در دمای $-10^\circ C$ فاصلهٔ بین سطح نفت تا بالای ظرف برابر $\Delta h=50cm$ است. ضریب انبساط حجمی نفت $\beta=10^{-4}K^{-1}$ است. اگر از انبساط دیوارهٔ ظرف در حین افزایش دما چشم‌پوشی شود، در چه دمایی نفت از ظرف سرریز می‌شود؟

۱۵ در روزی که دما $0^\circ C$ است برای پنجره‌ای، شیشه‌ای به طول $6m$ انداخته شد. برای پیش‌بینی انبساط شیشه، فاصلهٔ کوچکی به اندازهٔ ۱/۳۵ میلی‌متر بین شیشه و چارچوب منظور شد. روزی که دما $25^\circ C$ است مشاهده می‌شود که این فاصله از بین رفته است. با چشم‌پوشی از انبساط چارچوب پنجره، ضریب انبساط شیشه را حساب کنید.

۱۶ شیشهٔ پنجره‌ای دارای عرض ۲ متر، ارتفاع ۱ متر و ضخامت $4mm$ است.

الف) در یک روز زمستانی دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای سرد بیرون است برابر $2^\circ C$ و دمای وجهی از شیشه که در تماس با هوای گرم داخل اتاق است $7^\circ C$ است. چه مقدار گرما در هر ثانیه از طریق شیشه به بیرون اتاق انتقال پیدا می‌کند؟

ب) چه مقدار انرژی در طول یک روز به این ترتیب تلف می‌شود؟

پ) اگر در طول سال اختلاف دمای دو وجه شیشه به‌طور متوسط $3^\circ C$ باشد، چه مقدار انرژی توسط رسانش از همین یک پنجره تلف می‌شود؟

۱۷ گازی در دمای $20^\circ C$ دارای حجم $100cm^3$ است. این گاز را باید تا چه دمایی گرم کنیم تا حجم آن در فشار ثابت $200cm^3$ شود؟ این گاز در همین فشار در چه دمایی دارای حجم $50cm^3$ خواهد شد؟

۱۸ هوایی با فشار یک اتمسفر درون استوانهٔ یک تلمبه دوچرخه به طول $24cm$ محبوس است.

الف) اگر طول استوانه را در دمای ثابت به $30cm$ افزایش دهیم، فشار هوای محبوس چه‌قدر خواهد شد؟

ب) برای آنکه در دمای ثابت، فشار هوای محبوس ۳ اتمسفر شود، طول استوانه را چقدر باید کاهش دهیم؟

۱۹ لاستیک یک اتومبیل حاوی مقدار معینی هواست. هنگامی که دمای هوا $17^\circ C$ است فشار اندازه‌گیری شده در لاستیک ۲ اتمسفر بیش از فشار جو است. پس از یک اتومبیل‌رانی بسیار سریع، فشار هوای لاستیک دوباره اندازه‌گیری می‌شود. مشاهده می‌شود که فشار ۲/۳ اتمسفر بیش از فشار جو است. دمای هوای درون لاستیک در این وضعیت چقدر است (حجم لاستیک را ثابت بگیرید)؟

۲۰ در گروهی از جانوران خونگرم و انسان، تبخیر عرق بدن، یکی از راه‌های مهم کنترل دمای بدن است.

الف) چه مقدار آب تبخیر شود تا دمای بدن شخصی به جرم $50kg$ را، $1^\circ C$ سردتر کند؟ گرمای ویژهٔ تبخیر آب در دمای بدن $(37^\circ C)$ برابر $2/42\times10^6 J/kg$ و گرمای ویژهٔ بدن در حدود $3480 J/kg$ است.

ب) حجم آبی را که شخص باید برای جبران آب تبخیر شده بنوشد، حساب کنید.

۲۱ در آزمایشی جرم‌های مساوی از سرب و آلیاژ سرب ــ قلع (لحیم) سرد شده است و نمودارهای تغییر دما برحسب زمان به صورت شکل زیر است.

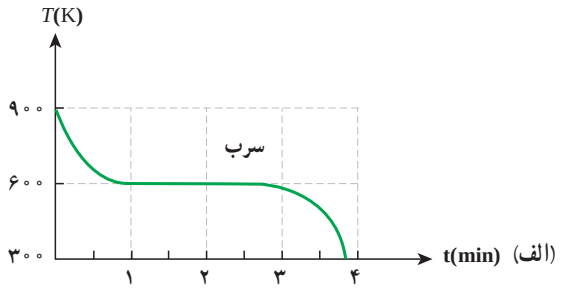
الف) حالت فیزیکی سرب را پس از ۳۰ ثانیه نام ببرید.

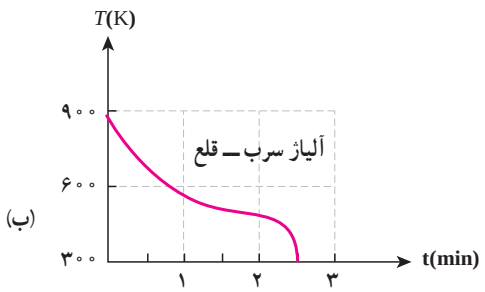
ب) چه پدیده‌ای در دمای $600K$ برای سرب روی می‌دهد؟

پ) چرا دمای سرب بیش از ۲ دقیقه در $600K$ ثابت می‌ماند؟

ت) با استفاده از نمودارهای داده‌شده، دو تفاوت مهم میان فلز سرب و آلیاژ سرب ــ قلع را نام ببرید.

ث) چرا استفاده از لحیم نسبت به سرب برای اتصال سیم‌ها یا تعمیر لوله‌های شکسته مناسب است؟





۲۲ در چالهٔ کوچکی ۱kg آب $0^{\circ}C$ قرار دارد. اگر بر اثر تبخیر سطحی قسمتی از آب تبخیر شود و بقیهٔ آن یخ ببندد، جرم آب یخ‌زده چقدر است؟

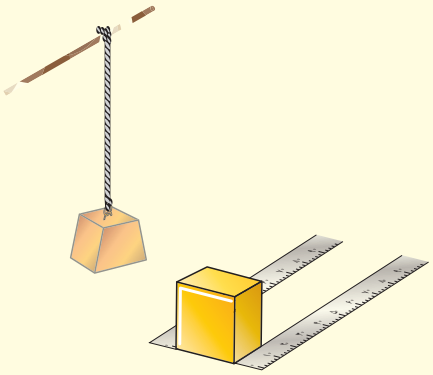
واژه‌نامه

انجماد	Freezing
اندازه‌گیری	Measurement
انرژی پتانسیل	Potential Energy
انرژی جنبشی	Kinetic Energy
انرژی درونی	Internal Energy
برایند	Resultant
بردار	Vector
بردار مکان	Position Vector
بلورین	Crystalline
پایستگی انرژی	Conservation of Energy
پخش	Diffusion
تابش	Radiation
تبخیر	Vaporization
تبخیر سطحی	Evaporation
تصعید	Sublimation
تعادل گرمایی	Thermal Equilibrium
تَف‌سنج نوری	Optical Pyrometer
توان	Power
جابه‌جایی	Displacement
جرم	Mass
چسبندگی (هم‌چسبی)	Cohesion
چسبندگی سطحی (دگرچسبی)	Adhesion
چگالش	Condensation
چگالی	Density
حالت	Phase
حرکت	Motion
حرکت شناسی	Kinematics
حرکت یکنواخت	Uniform Motion
دما	Temperature
دماپا	Thermostat
دماسنج	Thermometer
دماسنج فرینه	Maximum and Minimum Thermometer
دینامیک	Dynamics
ذوب	Fusion
ذرّات بنیادی	Elementary Particles
رسانا	Conductor
رسانش	Conduction
سرعت لحظه‌ای	Instantaneous Velocity
سرعت متوسط	Average Velocity
شتاب لحظه‌ای	Instantaneous Acceleration
شتاب متوسط	Average Acceleration
ضریب اصطکاک ایستایی	Coefficient of Static Friction
ظرفیت گرمایی	Heat Capacity
فراصوت	Ultrasound
فشار	Pressure
فشار پیمانه‌ای	Gage Pressure
فشارسنج	Barometer
فناوری	Technology
فیزیک اتمی	Atomic Physics
فیزیک هسته‌ای	Nuclear Physics
قانون‌های نیوتون	Newtons Laws
قضیه کار و انرژی	Work – Energy Theorem
کار	Work
کشش	Tension
کشش سطحی	Surface Tension
کمیّت	Quantity
گاز کامل	Ideal gas
گرانش	Gravitation
گرما	Heat
گرمای نهان	Latent Heat
گرمای ویژه	Specific Heat
مادّهٔ چگال	Condensed Matter
مقیاس دماسنجی	Temperature Scale
مویینگی	Capillarity
میعان	Liquefaction
نرده‌ای	Scalar
نمادگذاری علمی	Scientific Notation
نیرو	Force
نیروسنج	Dynamometer
نیروی رانشی	Repulsive Force
نیروی ربایشی	Attractive Force
وزن	Weight
همرَفت	Convection
یکا	Unit
یکاهای اصلی	Base Units
یکاهای فرعی	Derived Units

عنوان آزمایش : **نام آموزشگاه :** **شماره کلاس :**

تاریخ اجرای آزمایش : **نام و نام خانوادگی گزارشگر :**

تاریخ تحویل گزارش : **نام و نام خانوادگی اعضای گروه :**



وسایل لازم : وزنهٔ فلزی قلابدار ــ مکعب چوبی (هم‌جرم با وزنه) ــ نخ ــ خط‌کش ــ پایه ــ خمیر بازی ــ چسب نواری ــ ترازو

مرحله‌های اجرای آزمایش : ابتدا جرم وزنهٔ قلابدار را با استفاده از ترازوی سه‌اهرمه (تک‌کفه‌ای) اندازه‌گیری کردیم m=۵۳/۶g. برای آنکه مکعب با سطح میز اصطکاک کمتری داشته باشد زیر آن را چسب‌نواری چسباندیم. سپس جرم آن را اندازه‌گیری کردیم و آنقدر روی آن خمیربازی چسباندیم تا جرم مجموعه به ۵۳/۶ گرم رسید. چون می‌خواهیم مکعب روی مسیر مستقیم حرکت کند و در آزمایشگاه ریل پرده نداشتیم مطابق شکل روبه‌رو دو خط‌کش را در طرفین مکعب طوری روی میز چسباندیم که مکعب بتواند در نوار بین دو خط‌کش حرکت کند.

وزنه را با نخ از پایه طوری آویختیم که در حالت قائم و مماس بر مکعب ساکن باشد.

وزنه را در حالتی که نخ آن کاملاً کشیده بود به اندازهٔ 5cm از سطح میز بالا آورده و رها کردیم.

گلوله در برخورد با مکعب تقریباً ساکن شد و مکعب به حرکت درآمد و جابه‌جا شد. جابه‌جایی را اندازه‌گیری کردیم و برای کم‌کردن خطای آزمایش دو بار دیگر نیز همین کار را تکرار کردیم و میانگین جابه‌جایی مکعب را در جدول یادداشت کردیم.

آزمایش را به همین ترتیب برای ارتفاع‌های دیگر هر بار سه مرتبه انجام دادیم و همهٔ نتایج را در جدول ثبت کردیم.

جدول یا نمودار

توجه : اندازه‌گیری جابه‌جایی مکعب وقتی وزنه از ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری رها می‌شد در سومین دفعه خیلی با بقیه تفاوت داشت که آن را حذف کردیم چون احتمالاً در برخورد آن با جعبه خطایی پیش‌آمده که متوجه آن نشده‌ایم.

ردیف	ارتفاع وزنه از سطح میز (cm)	جابه‌جایی مکعب پس از برخورد			
		۱	۲	۳	میانگین
۱	۵	۷/۷	۷/۳	۷/۶	۷/۵
۲	۱۰	۱۴	۱۴/۲	۱۴/۶	۱۴/۳
۳	۱۵	۲۰/۸	۲۱/۵	~~۱۸/۵~~	۲۱/۶
۴					

تحلیل جدول یا نمودار و نتیجه‌گیری : دیده می‌شود که وقتی ارتفاع را دو برابر کردیم تقریباً جابه‌جایی مکعب نیز دو برابر و به همین ترتیب وقتی ارتفاع را سه برابر کردیم جابه‌جایی مکعب هم سه برابر شده است.

پس نتیجه می‌گیریم که : الف) وزنه وقتی نسبت به میز در ارتفاع قرار می‌گیرد دارای انرژی‌ای است که در برخورد به مکعب آن را به شکل انرژی جنبشی به مکعب می‌دهد.

انرژی وزنه را انرژی پتانسیل گرانشی می‌نامیم.

ب) هرچه ارتفاع وزنه بیشتر باشد انرژی پتانسیل گرانشی آن هم بیشتر است :

$U \propto h$ انرژی پتانسیل گرانشی جسم

عوامل ایجاد خطا :

الف) اصطکاک جعبه با لبه‌های خط‌کش‌ها دردو طرف مسیر و نیز با سطح میز

ب) اندازه‌گیری ارتفاع گلوله تا سطح میز که سعی می‌کردیم از مرکز وزنه تا سطح میز را با خط‌کش اندازه‌بگیریم و همین موجب ایجاد خطا می‌شد.

پ) طرز قرارگرفتن گلوله و نخ موجب می‌شود که پس از رهاشدن برخورد در همهٔ حالت‌ها ایده‌آل نباشد بخصوص در آزمایش سوم برای ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری.

پیشنهاد و ابتکار : اعضای گروه ما فکر می‌کنند که از عوامل دیگر مؤثر انرژی پتانسیل گرانشی هر جسم جرم آن است و برای تحقیق آن می‌توانیم مانند آزمایش اجرا شدهٔ بالا وزنه‌هایی با جرم‌های مختلف را از یک ارتفاع یکسان رها کنیم تا به جعبه برخورد کنند. البته حدس می‌زنیم که این دفعه گلوله‌ها در برخورد با جعبه متوقف نشوند و همین موضوع باعث خطای زیادی خواهد شد.

فهرست منابع

منابع فارسی

۱ــ مبانی فیزیک (جلد اول)، ویرایش نهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و یرل واکر، ترجمهٔ محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر، چاپ اول ۱۳۹۰.

۲ــ فیزیک دانشگاهی (جلد اول)، ویرایش دوازدهم، سیزر، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمهٔ اعظم پورقاضی، روح‌الله خلیلی‌بروجنی، محمدتقی فلاحی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹، مؤسسه نشر علوم نوین.

۳ــ درک فیزیک با رویکرد تصویری، بریان آرنولد، ترجمهٔ روح‌الله خلیلی بروجنی و مریم عباسیان. چاپ اول ۱۳۸۵، انتشارات مدرسه.

۴ــ حرارت و ترمودینامیک، مارک زیمانسکی و ریچارد دیتمن، ترجمهٔ حسین توتونچی، حسن شریفیان عطار و محمدهادی هادی‌زاده، چاپ اول ۱۳۶۴، مرکز نشر دانشگاهی.

۵ــ دورهٔ درسی فیزیک (جلد اول) گ.س.لندسبرگ، ترجمه لطیف کاشیگر و دیگران، چاپ اول، ۱۳۷۴، انتشارات فاطمی.

۶ــ اصول فیزیک (جلد اول)، اوهانیان، ترجمهٔ یوسف امیر ارجمند و نادر رابط، چاپ اوّل، ۱۳۸۳، مرکز نشر دانشگاهی.

۷ــ فیزیک مفهومی، ویرایش دهم، هیوئیت، ترجمهٔ منیژه رهبر، چاپ اول، ۱۳۸۸، انتشارات فاطمی.

۸ــ فیزیک پایه، ویرایش سوم، بلت، ترجمهٔ محمد خرمی و ناصر مقبلی و مهران اخباریفر، چاپ پنجم، ۱۳۸۰، انتشارات فاطمی.

۹ــ دانشنامهٔ فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ترجمهٔ محمدابراهیم ابوکاظمی و دیگران، چاپ اول ۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامهٔ بزرگ فارسی.

۱۰ــ نمایش هیجان‌انگیز فیزیک، ویرایش دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر و رسول جعفری‌نژاد، چاپ اول ۱۳۹۱.

منابع انگلیسی

1. Mc Graw – Hill Dictionary of scientific and technical terms, Parker, Fourth edition, 1989, MC Graw – Hill.

2. Holt Physics, Serway and Faughn, 1999, Holt Rinehart and Winston.

3. Physics, Giambattista and Richardson, Second Edition, 2008, MC Graw– Hill.

4. University Physics, Bauer and Westfall, 2011, MC Graw – Hill.

5. Physics, Eugene Heacht, Second Edition, 1997, Brooks / Cole Publishing company.

6. University Physics, Hugh D. Young, 1992, Addison – Wesley.

7. Fundamental of Physics, David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker, 2008, John Wiley and Sons.

8. Physics, Douglas C. Giancoli, 1991, Prentice – Hall International.

9. Principles of Physics, Frank J. Blatt, 1989, Allyn and Bacon.

تصویرهای شروع فصل‌های ۱، ۲ ، ۳ از کتاب مجموعه تصاویر نیکول فریدنی، چاپ ۱۳۸۱، انتخاب شده‌اند.

معلمان محترم، صاحب‌نظران، دانش‌آموزان عزیز و اولیای آنان می‌توانند نظر اصلاحی خود را درباره مطالب این کتاب از طریق نامه به نشانی تهران - صندوق پستی ۱۵۸۵۵/۳۶۳ - گروه درسی مربوط و یا پیام‌نگار (Email) talif@talif.sch.ir ارسال نمایند.

دفتر تألیف کتاب‌های درسی ابتدایی و متوسطه نظری