

دیوید هالیدی - رابرت رزنیک

جرل واکر

مبانی فیزیک

هالیدی

ویرایش یازدهم (سال ۲۰۱۹)

جلد اول - مکانیک

ترجمه و تلخیص: دکتر محمود بهار

به نام خدا

فهرست

صفحه	عنوان	صفحه	عنوان
۱۹	۲-۲ سرعت لحظه‌ای و تندی لحظه‌ای	(هشت)	پیشگفتار
۱۹	سرعت لحظه‌ای و تندی لحظه‌ای		
۲۱	۳-۲ شتاب		فصل ۱
۲۱	شتاب		اندازه‌گیری
۲۴	۴-۲ شتاب ثابت	۱	۱-۱ اندازه‌گیری کمیت‌ها
۲۴	شتاب ثابت: حالتی ویژه از شتاب	۱	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟
۲۶	نگاهی دیگر به شتاب	۱	اندازه‌گیری اجسام
۲۷	۵-۲ شتاب سقوط آزاد	۲	دستگاه بین‌المللی یکاها
۲۷	شتاب سقوط آزاد	۳	تبدیل یکاها
۲۹	۶-۲ انتگرال ترسیمی در تحلیل حرکت	۴	طول
۲۹	انتگرال ترسیمی در تحلیل حرکت	۴	رقم‌های با معنی و رقم‌های اعشاری
۳۲	مرور و چکیده‌ی مطالب	۶	۲-۱ استاندارد زمان
۳۳	مسئله‌ها	۶	زمان
		۷	۳-۱ استاندارد جرم
		۷	جرم
		۹	مرور و چکیده‌ی مطالب
		۱۰	مسئله‌ها
			فصل ۲
			۱۳ حرکت در طول خط راست
		۱۳	۱-۲ مکان، جابه‌جایی، و سرعت متوسط
		۱۳	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟
		۱۴	حرکت
		۱۴	مکان و جابه‌جایی
		۱۵	سرعت متوسط و تندی متوسط
			فصل ۳
			۳۷ بردارها
		۳۷	۱-۳ بردارها و مؤلفه‌های آن‌ها
		۳۷	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟
		۳۸	بردارها و نرده‌ای‌ها
		۳۸	جمع کردن بردارها به روش هندسی
		۴۰	مؤلفه‌های بردارها
			۲-۳ بردارهای یکه، جمع کردن بردارها به کمک مؤلفه‌ها
		۴۴	مؤلفه‌ها
		۴۵	بردارهای یکه
		۴۵	جمع کردن بردارها به کمک مؤلفه‌ها

صفحه	عنوان
۸۸	مکانیک نیوتونی
۸۹	قانون اول نیوتون
۸۹	نیرو
۹۱	جرم
۹۲	قانون دوم نیوتون
۹۷	۲-۵ معرفی برخی نیروهای خاص
۹۷	معرفی برخی نیروهای خاص
۱۰۲	۳-۵ کاربرد قانون‌های نیوتون
۱۰۲	قانون سوم نیوتون
۱۰۴	کاربرد قوانین نیوتون
۱۱۱	مرور و چکیده‌ی مطالب
۱۱۲	مسئله‌ها

فصل ۶

۱۱۷	نیرو و حرکت - ۲
۱۱۷	۱-۶ اصطکاک
۱۱۷	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟
۱۱۸	اصطکاک
۱۲۱	خواص نیروی اصطکاک
۱۲۵	۲-۶ نیروی پَسار و تندی حد
۱۲۵	نیروی پَسار و تندی حد
۱۲۸	۳-۶ حرکت دایره‌ای یکنواخت
۱۲۸	حرکت دایره‌ای یکنواخت
۱۳۴	مرور و چکیده‌ی مطالب
۱۳۵	مسئله‌ها

فصل ۷

۱۴۱	انرژی جنبشی و کار
۱۴۱	۱-۷ انرژی جنبشی
۱۴۹	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟
۱۴۱	انرژی چیست؟

صفحه	عنوان
۴۶	بردارها و قوانین فیزیک
۴۹	۳-۳ ضرب کرن بردارها
۵۰	ضرب کردن بردارها
۵۵	مرور و چکیده‌ی مطالب
۵۶	مسئله‌ها

فصل ۴

۵۹	حرکت‌های دوبعدی و سه‌بعدی
۵۹	۱-۴ مکان و جابه‌جایی
۵۹	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟
۶۰	مکان و جابه‌جایی
۶۲	۲-۴ سرعت متوسط و سرعت لحظه‌ای
۶۲	سرعت متوسط و سرعت لحظه‌ای
۶۵	۳-۴ شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای
۶۵	شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای
۶۷	۴-۴ حرکت پرتابی
۶۷	حرکت پرتابی
۷۳	۵-۴ حرکت دایره‌ای یکنواخت
۷۳	حرکت دایره‌ای یکنواخت
۷۶	۶-۴ حرکت نسبی یک بعدی
۷۶	حرکت نسبی یک بعدی
۷۸	۷-۴ حرکت نسبی دوبعدی
۷۸	حرکت نسبی دوبعدی
۸۰	مرور و چکیده‌ی مطالب
۸۱	مسئله‌ها

فصل ۵

۸۷	نیرو و حرکت - ۱
۸۷	۱-۵ قانون‌های اول و دوم نیوتون
۸۷	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟

صفحه	عنوان
۱۹۲	۵-۸ پایستگی انرژی
۱۹۲	پایستگی انرژی
۱۹۸	مرور و چکیده‌ی مطالب
۱۹۹	مسئله‌ها

فصل ۹

۲۰۵ مرکز جرم و تکانه‌ی خطی

۲۰۵	۱-۹ مرکز جرم
۲۰۵	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟
۲۰۶	مرکز جرم
۲۱۲	۲-۹ قانون دوم نیوتون درباره‌ی دستگاه ذرات
۲۱۲	قانون دوم نیوتون درباره‌ی دستگاه ذرات
۲۱۶	۳-۹ تکانه‌ی خطی
۲۱۶	تکانه‌ی خطی
۲۱۷	تکانه‌ی خطی دستگاه ذرات
۲۱۸	۴-۹ برخورد و ضربه
۲۱۹	برخورد و ضربه
۲۲۳	۵-۹ پایستگی تکانه‌ی خطی
۲۲۳	پایستگی تکانه‌ی خطی
۲۲۶	۶-۹ تکانه و انرژی جنبشی در برخوردها
۲۲۶	تکانه و انرژی جنبشی در برخوردها
۲۲۷	برخوردهای ناکشسان یک بعدی
۲۳۱	۷-۹ برخوردهای کشسان یک بعدی
۲۳۱	برخوردهای کشسان یک بعدی
۲۳۵	۸-۹ برخوردهای دو بعدی
۲۳۵	برخوردهای دو بعدی
۲۳۶	۹-۹ دستگاه‌های با جرم متغیر: موشک
۲۳۶	دستگاه‌های با جرم متغیر: موشک
۲۳۹	مرور و چکیده‌ی مطالب
۲۴۱	مسئله‌ها

صفحه	عنوان
۱۴۲	انرژی جنبشی
۱۴۳	۲-۷ کار و انرژی جنبشی
۱۴۴	کار
۱۴۴	کار و انرژی جنبشی
۱۴۹	۳-۷ کار انجام شده توسط نیروی گرانشی
۱۵۰	کار انجام شده توسط نیروی گرانشی
۱۵۴	۴-۷ کار انجام شده توسط نیروی فنر
۱۵۴	کار انجام شده توسط نیروی فنر
۱۵۸	۵-۷ کار انجام شده توسط یک نیروی متغیر
۱۵۸	کار انجام شده توسط یک نیروی متغیر
۱۶۲	۶-۷ توان
۱۶۲	توان
۱۶۴	مرور و چکیده‌ی مطالب
۱۶۶	مسئله‌ها

فصل ۸

۱۷۱ انرژی پتانسیل و پایستگی انرژی

۱۷۱	۱-۸ انرژی پتانسیل
۱۷۱	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟
۱۷۲	کار و انرژی پتانسیل
۱۷۴	وابسته نبودن نیروهای پایستار به مسیر حرکت
۱۷۶	تعیین مقادیر انرژی پتانسیل
۱۷۹	۲-۸ پایستگی انرژی مکانیکی
۱۷۹	پایستگی انرژی مکانیکی
۱۸۳	۳-۸ خواندن منحنی انرژی پتانسیل
۱۸۳	خواندن منحنی انرژی پتانسیل
۱۸۸	۴-۸ کار انجام شده روی یک دستگاه توسط نیروی خارجی
۱۸۸	کار انجام شده روی یک دستگاه توسط نیروی خارجی

دوران

۲۴۷

- ۱-۱۰ متغیرهای دورانی ۲۴۷
- فیزیک در این باره چه می‌گوید؟ ۲۴۷
- متغیرهای حرکت دورانی ۲۴۸
- آیا کمیت‌های زاویه‌ای کمیت‌هایی برداری‌اند؟ ... ۲۵۴
- ۲-۱۰ حرکت دورانی با شتاب زاویه‌ای ثابت ۲۵۶
- حرکت دورانی با شتاب زاویه‌ای ثابت ۲۵۶
- ۳-۱۰ رابطه‌ی میان متغیرهای خطی و زاویه‌ای ۲۵۸
- رابطه‌ی میان متغیرهای خطی و زاویه‌ای ۲۵۸
- ۴-۱۰ انرژی جنبشی دورانی ۲۶۳
- انرژی جنبشی دورانی ۲۶۳
- ۵-۱۰ محاسبه‌ی لختی دورانی ۲۶۵
- محاسبه‌ی لختی دورانی ۲۶۵
- ۶-۱۰ گشتاور نیرو ۲۶۹
- گشتاور نیرو ۲۶۹
- ۷-۱۰ قانون دوم نیوتون در حرکت دورانی ۲۷۱
- قانون دوم نیوتون در حرکت دورانی ۲۷۱
- ۸-۱۰ کار و انرژی جنبشی دورانی ۲۷۳
- کار و انرژی جنبشی دورانی ۲۷۳
- مرور و چکیده‌ی مطالب ۲۷۷
- مسئله‌ها ۲۷۹

- ۱۱-۲ نیروها و انرژی جنبشی در حرکت غلتشی ۲۸۶
- انرژی جنبشی در حرکت غلتشی ۲۸۶
- نیروها در حرکت غلتشی ۲۸۷
- ۱۱-۳ طرز کار یویو ۲۹۱
- طرز کار یویو ۲۹۱
- ۱۱-۴ مروری بر گشتاور نیرو ۲۹۲
- مروری بر گشتاور نیرو ۲۹۲
- ۱۱-۵ تکانه‌ی زاویه‌ای ۲۹۵
- تکانه‌ی زاویه‌ای ۲۹۶
- ۱۱-۶ شکل زاویه‌ای قانون دوم نیوتون ۲۹۸
- شکل زاویه‌ای قانون دوم نیوتون ۲۹۸
- ۱۱-۷ تکانه‌ی زاویه‌ای یک جسم صلب ۳۰۱
- تکانه‌ی زاویه‌ای دستگاه ذرات ۳۰۱
- تکانه‌ی زاویه‌ای جسم صلب چرخنده به دور محور ثابت ۳۰۲
- ۱۱-۸ پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای ۳۰۳
- پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای ۳۰۴
- ۱۱-۹ حرکت تقدیمی ژيروسکوپ ۳۰۸
- حرکت تقدیمی ژيروسکوپ ۳۰۸
- مرور و چکیده‌ی مطالب ۳۱۰
- مسئله‌ها ۳۱۱

فصل ۱۲

فصل ۱۱

غلش، گشتاور نیرو و تکانه‌ی زاویه‌ای ۲۸۳

- ۱-۱۱ حرکت غلتشی به صورت ترکیبی از حرکت‌های انتقالی و دورانی ۲۸۳
- فیزیک در این باره چه می‌گوید؟ ۲۸۳
- حرکت غلتشی به صورت ترکیبی از حرکت‌های انتقالی و دورانی ۲۸۴

تبادل و کشسانی

۳۱۷

- ۱-۱۲ تبادل ۳۱۷
- فیزیک در این باره چه می‌گوید؟ ۳۱۷
- تبادل ۳۱۸
- شرط‌های لازم تبادل ۳۲۰
- گرانگه ۳۲۱
- ۱۲-۲ چند مثال درباره‌ی تبادل ایستا ۳۲۳
- چند مثال درباره‌ی تبادل ایستا ۳۲۳

صفحه	عنوان
۳۵۹	۱۳-۶ سیاره‌ها و ماهواره‌ها: قانون‌های کیپلر
۳۵۹	سیاره‌ها و ماهواره‌ها: قانون‌های کیپلر
۳۶۳	۱۳-۷ مدارها و انرژی ماهواره‌ها
۳۶۳	مدارها و انرژی ماهواره‌ها
۳۶۵	۱۳-۸ اینشتین و گرانش
۳۶۵	اینشتین و گرانش
۳۶۸	مرور و چکیده‌ی مطالب
۳۶۹	مسئله‌ها

صفحه	عنوان
۳۷۵	پیوست‌ها
۳۷۵	پیوست الف
۳۷۷	پیوست ب
۳۷۸	پیوست پ
۳۷۹	پیوست ت
۳۸۳	پیوست ث
۳۸۶	پیوست ج
۳۹۰	پیوست چ
۳۹۱	پاسخ‌ها

صفحه	عنوان
۳۲۹	۱۲-۳ کشسانی
۳۲۹	ساختارهای نامعین
۳۳۰	کشسانی
۳۳۴	مرور و چکیده‌ی مطالب
۳۳۵	مسئله‌ها

فصل ۱۳

گرانش

۳۴۱	۱۳-۱ قانون گرانش نیوتون
۳۴۱	فیزیک در این باره چه می‌گوید؟
۳۴۲	قانون گرانش نیوتون
۳۴۵	۱۳-۲ گرانش و اصل برهم نهی
۳۴۵	گرانش و اصل برهم نهی
۳۴۸	۱۳-۳ گرانش در نزدیکی سطح زمین
۳۴۸	گرانش در نزدیکی سطح زمین
۳۵۱	۱۳-۴ گرانش در درون زمین
۳۵۲	گرانش در درون زمین
۳۵۳	۱۳-۵ انرژی پتانسیل گرانشی
۳۵۴	انرژی پتانسیل گرانشی

پیشگفتار

پس از سال‌ها تدریس دروس پیشرفته‌ی فیزیک، کسب تجربیات آموزشی و پژوهشی ارزنده و تألیف کتاب‌های تخصصی فیزیک در زمینه‌های مکانیک کوانتومی، نسبیت، فیزیک نوین، اپتیک و ترمودینامیک، دست به تألیف کتاب‌های فیزیک در سطح عمومی و پایه زده‌اند.

مؤلفان کتاب **مبانی فیزیک** به منظور توجه به اهمیت محتوای کتاب‌های فیزیک پایه، تقریباً، هر دو سه سال یک بار ویرایش تازه‌ای شامل تغییرات اساسی در جهت تکامل و ارتقای سطح آموزشی کتاب به خوانندگان و دانشجویان عرضه کرده‌اند. سرعت عرضه‌ی ویرایش‌های جدید چنان بود که مؤلفان با انتشار کتاب **اصول فیزیک**، ویرایش نهم (۲۰۱۱)، عنوان تازه‌ای به کتاب‌های ارزشمند و پرمحتوای خود افزودند. خوشبختانه، اینجانبان موفق شدیم ترجمه‌ی جلد‌های ۱، ۲ و ۳ این کتاب را به دوستداران گرامی فیزیک تقدیم کنیم.

به دنبال ترجمه‌ی چهار دوره کتاب‌های **فیزیک، مبانی فیزیک و اصول فیزیک** توفیق یافتیم که برای پنجمین دوره به ترجمه‌ی کتاب **مبانی فیزیک** (ویرایش دهم، سال ۲۰۱۴)، تألیف **دیوید هالیدی، رابرت رزنیکی و جرل واکر**، پردازیم و آن را به دانشجویان عزیز رشته‌های علوم پایه و مهندسی تقدیم کنیم.

این کتاب نسبت به کتاب‌های پیشین مؤلفان دارای تغییرات و همراه با اصلاحات قابل توجه و آموزنده‌ای بود که به طور خلاصه عبارت بودند از: هدف‌های آموزشی، نکته‌های کلیدی، فیزیک در این باره چه می‌گوید؟، خودآزمایی‌ها، مسئله‌های نمونه، نکته‌های کلیدی در مسئله‌های نمونه، مرور و چکیده‌ی مطالب، پرسش‌ها، مسئله‌ها، مسئله‌های بیشتر، مطالب مهم کتاب، شرح روی شکل‌ها و ...، که این امر باعث افزایش قابل ملاحظه‌ی صفحات کتاب شده بود.

افزایش حجم کتاب، تعداد زیاد مسئله‌ها و از طرفی تعداد واحدهای درسی فیزیک در دانشگاه‌ها و ساعت اختصاص یافته برای آنها، علاوه بر آن، افزایش قیمت کتاب، مرا بر آن داشت که با حفظ مطالب فیزیکی اصلی و عمده، به خلاصه‌ی یا حذف کردن پاره‌ای از موضوعات، و خصوصاً مسئله‌ها، پردازیم تا علاقه‌ی استادها و دانشجویان نسبت به مطالعه‌ی کتاب کم نشود. ترجمه و

برنامه‌ریزی منطبق با نیازهای دانش و فناوری امروزی کشور، هماهنگ کردن برنامه‌های آموزشی در دانشگاه‌ها و مؤسسه‌های آموزش عالی و معرفی و پیشنهاد منابع درسی ارزنده و معتبر از جمله هدف‌های اساسی شورای عالی برنامه‌ریزی و کمیته‌های تخصصی وابسته به آن را تشکیل می‌دهد. بدین جهت، کتاب **مبانی فیزیک**، تألیف **دیوید هالیدی و رابرت رزنیکی**، به عنوان کتاب مرجع برای تدریس **فیزیک پایه** در رشته‌های علوم پایه و مهندسی انتخاب شده است.

اینجانب و زنده‌یاد آقای دکتر نعمت‌الله گلستانیان همواره امیدوار بوده‌ایم که بتوانیم در همکاری و همگامی با هدف‌های **مرکز نشر دانشگاهی** برای تأمین منابع درسی معتبر و مورد تأیید صاحب‌نظران و استادان محترم دانشگاه‌ها سهمی داشته باشیم. ترجمه‌ی سه جلد کتاب **فیزیک**، تألیف **هالیدی - رزنیکی (۱۹۷۷)** و چاپ و انتشار آن‌ها توسط مرکز نشر دانشگاهی در سال ۱۳۶۶، سرآغازی برای تحقق یافتن این آرزوها بوده است.

پس از انتشار این کتاب‌ها تصمیم گرفته شد کار ادامه پیدا کند و از این رو برای ترجمه‌ی ویرایش دوم (۱۹۸۶)، ویرایش سوم (۱۹۹۰) و ویرایش ششم (۲۰۰۱) کتاب **مبانی فیزیک**، تألیف **هالیدی، رزنیکی و واکر** اقدام شد و خوشبختانه، توانستیم برگردان فارسی **مبانی فیزیک** را در چهار جلد به مرحله‌ی چاپ و انتشار برسانیم. استقبال خوانندگان عزیز از کتاب‌ها چنان بوده که برخی مجلد‌های آن‌ها، در مجموع ویرایش‌های مختلف، تاکنون بیش از ۹۲ بار تجدید چاپ شده است.

امروزه اهمیت کتاب‌های فیزیک پایه به حدی است که گویی ناشران و مؤلفان بزرگ دنیا در زمینه‌ی بالا بردن کیفیت و روزآمد کردن این کتاب‌ها با هم به رقابت پرداخته‌اند. در اهمیت تدوین این گونه کتاب‌ها همین قدر می‌توان گفت که فیزیک‌دانان و مؤلفان صاحب نامی، چون **مارک زیمانسکی^۱، فرانسیس سیرز^۲، هانس اوهانیان^۳، رابرت رزنیکی^۴، ریموند سروی^۵، استفن گاسیورویچ^۶، اوژن هشت^۷، ریچارد ویدنر^۸، ریچارد فاینمن^۹**، و بسیاری دیگر،

1. Mark W.Zemansky
2. Francis W.Sears
3. Hans C.Ohanian
4. Robert Resnick
5. Raymond A.Serway
6. Stephen Gasiorowicz
7. Eugen Hecht
8. Richard T.Weidner
9. Richard P.Feynman

تلخیص مطالب علاوه بر ویرایش‌های قبلی، با توجه به ویرایش یازدهم (سال ۲۰۱۹) کتاب مبانی فیزیک صورت گرفته است.

در ترجمه‌ی کتاب با تکیه بر تجربه‌های کسب شده به مدت نزدیک به ۴۵ سال در زمینه‌ی ترجمه و تألیف کتاب‌های عمومی و تخصصی فیزیک، تدریس فیزیک پایه و تخصصی و همکاری با مؤسسه‌های علمی و فرهنگی گوناگون، تلاش شده است روانی و شیوایی مطالب همراه با مفهوم و ارزش علمی آن‌ها حفظ شود و تازه‌ترین شیوه‌های نگارش و برابر نهاده‌های واژه‌ها و اصطلاحات انگلیسی با توجه به مصوبه‌های فرهنگستان زبان و ادب فارسی به کار رود.

با اعتقاد به اینکه در ترجمه‌ی متن‌های علمی باید بیشتر انتقال علم مورد نظر باشد تا انتقال فرهنگ، تلاش شده است تا حد امکان به جنبه‌های فرهنگی متن فارسی کتاب چهره‌ای آشناتر داده شود. از این رو، ضمن تلاش در تحقق این باور در ابعاد گوناگون، در موارد مقتضی به جای نام‌های اشخاص و مکان‌های مندرج در متن اصلی از نام‌های ایرانی استفاده شده است.

اینجانب ضمن گرامی داشتن یاد استاد فقید آقای دکتر نعمت‌الله گلستانیان به خاطر خدمات دانشگاهی بی‌شائبه و ارزشمند نامبرده در امر تدریس، ترجمه و تألیف مطالب فیزیکی، و همکاری صمیمانه‌ی «۴۴ ساله‌ی» ما در زمینه‌ی ترجمه و تألیف کتاب‌های فیزیک، امیدوارم فرهنگ مکتوب فیزیک در کشور ایران به خوبی حفظ شود.

چاپ و نشر این کتاب توسط شرکت آموزشی و فرهنگی مبتکران صورت گرفته است و بجا است از مدیر کاردان و اهل دانش و فرهنگ این شرکت جناب آقای یحیی دهقانی، که در نهایت سخاوتمندی اندوخته‌ی مادی و معنوی خویش را در راه تعالی و ترقی ارزش‌های آموزشی، علمی و فرهنگی کشور به کار گرفته است، تشکر و قدردانی کنم.

هم‌چنین، از کارکنان شرکت آموزشی و فرهنگی مبتکران، به‌ویژه خانم‌ها لیلی مهرعلی‌پور و حمیده نوروزی، به‌خاطر حروف‌نگاری دقیق متن، صفحه‌آرایی مناسب و شایسته و دقت در انتقال و آرایش شکل‌های کتاب، آقای خداپار مبین به‌خاطر راهنمایی در انتخاب شیوه‌ی حروف‌نگاری مناسب و تهیه‌ی امکانات لازم برای چاپ و نظارت فنی بر تولید کتاب، خانم‌ها سمیرا ایمان‌فرد و سمانه ایمان‌فرد، به‌خاطر انتقال دقیق شکل‌ها و تنظیم مناسب نوشته‌های روی شکل‌ها، خانم ملیحه محمدی، به‌خاطر اسکن کردن برخی شکل‌های کتاب، خانم مینا هرمزی، به‌خاطر طراحی ماهرانه و زیبای جلد کتاب و خانم کبری مرادی، به‌خاطر نظارت بر آماده‌سازی امکانات و نظارت بر چاپ کتاب، صمیمانه سپاسگزارم.

محمود بهار

عضو هیئت علمی دانشکده‌ی فیزیک دانشگاه خوارزمی

تهران، بهمن ۱۳۹۷

اندازه‌گیری

۱-۱ اندازه‌گیری کمیت‌ها

نکته‌های کلیدی

- دانش فیزیک مبتنی بر اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی است. کمیت‌های فیزیکی ویژه‌ای به عنوان کمیت‌های اصلی (مانند طول، زمان و جرم) انتخاب شده‌اند؛ هر یک از این کمیت‌ها برحسب یک استاندارد تعریف شده و دارای یکای اندازه‌گیری (مانند متر، ثانیه و کیلوگرم) است. کمیت‌های فیزیکی دیگر برحسب کمیت‌های اصلی و استانداردها و یکاهای آنها تعریف می‌شوند.
- دستگاه یکای مورد تأکید در این کتاب، دستگاه بین‌المللی یکاها (SI) است. سه کمیت فیزیکی درج شده در جدول ۱-۱ در فصل‌های بعد مورد استفاده قرار خواهند گرفت. استانداردها، که باید دسترس پذیر و تغییرناپذیر باشند، با توافق بین‌المللی برای این کمیت‌های اصلی به وجود آمده‌اند.
- تبدیل یکاها را با استفاده از تبدیل‌های زنجیری، می‌توان انجام داد. برای این کار، یکاها مانند کمیت‌های جبری آنقدر دستکاری می‌شوند تا فقط یکاهای مورد نظر باقی بمانند.
- متر به صورت مسافت پیموده شده توسط نور در یک بازه‌ی زمانی خاص، تعریف می‌شود.

فیزیک در این باره چه می‌گوید؟

پایه‌ی دانش و مهندسی، اندازه‌گیری و مقایسه است. بنابراین، برای پی بردن به چگونگی اندازه‌گیری اجسام و مقایسه کردن آنها به چند قاعده نیاز داریم و برای تعیین یکاهای مربوط به این اندازه‌گیری‌ها و مقایسه‌ها باید آزمایش‌هایی انجام دهیم. یکی از هدف‌های فیزیک (و نیز مهندسی)، طراحی و به پیش بردن این آزمایش‌ها است.

برای مثال، فیزیکدان‌ها می‌کوشند ساعت‌های دقیق‌تری بسازند، تا بتوانند هر زمان یا هر بازه‌ی زمانی را با دقت بسیار زیاد، اندازه‌گیری و مقایسه کنند. شما ممکن است بپرسید که آیا چنین دقتی لازم است؟ در جواب باید گفت که بدون داشتن ساعت‌های خیلی دقیق، سیستم مکان‌یابی جهانی (GPS)^۱ مورد استفاده در ناوبری سراسر دنیا بی‌فایده خواهد بود.

اندازه‌گیری اجسام

ما با آموختن چگونگی اندازه‌گیری کمیت‌های مربوط به فیزیک، دانش فیزیک را یاد می‌گیریم. از جمله‌ی این کمیت‌ها می‌توان طول، زمان، جرم، دما، فشار، و جریان الکتریکی را نام برد.

1. Global Positioning System (GPS)

هر کمیت فیزیکی از راه مقایسه با یک استاندارد برحسب یکاهای آن کمیت اندازه‌گیری می‌شود. یکا نام یگانه‌ای است که به اندازه‌های یک کمیت نسبت می‌دهیم - چنان‌که متر (با نماد m) را برای کمیت طول در نظر می‌گیریم. یک استاندارد، درست متناظر با $1/10$ برابر یکای کمیت است. مثلاً استاندارد طول، که درست متناظر با $1/10$ متر است، مسافتی است که نور در خلاء در کسر معینی از ثانیه طی می‌کند.

وقتی استاندارد را، مثلاً برای طول، در نظر گرفتیم باید روش‌هایی به کار ببریم که به کمک آن‌ها بتوان هر طولی، مانند شعاع اتم هیدروژن، فاصله‌ی میان چرخ‌های خودرو، یا فاصله‌ی یک ستاره از زمین را برحسب این استاندارد بیان کرد. خط‌کش، که وسیله‌ای برای برآورد استاندارد طول است، یکی از این ابزارهای اندازه‌گیری طول است. اما در برخی اندازه‌گیری‌ها باید از روش‌های غیرمستقیم استفاده کرد. زیرا به عنوان مثال برای اندازه‌گیری شعاع اتم، یا فاصله‌ی یک ستاره از زمین، نمی‌توان از خط‌کش استفاده کرد.

کمیت‌های اصلی. تعداد کمیت‌های فیزیکی بسیار زیاد است، اما خوشبختانه این کمیت‌ها از هم مستقل نیستند. به عنوان مثال، تندی برابر با نسبت طول به زمان است. بنابراین، باید تعدادی کمیت فیزیکی، مانند طول و زمان را با توافق بین‌المللی انتخاب کنیم و فقط برای آن‌ها استانداردهایی را در نظر بگیریم. آنگاه، کمیت‌های فیزیکی دیگر را برحسب این کمیت‌های اصلی و استانداردهای آن‌ها (به نام *استانداردهای اصلی*) تعریف کنیم.

استانداردهای اصلی باید دسترس‌پذیر و تغییرناپذیر باشند. اگر استاندارد طول را به صورت فاصله‌ی میان بینی یک شخص تا نوک انگشت اشاره، در حالت کشیده بودن کامل بازو، تعریف کنیم استاندارد خواهد داشت که به طور مسلم دسترس‌پذیر است، اما تغییرناپذیر نیست و از شخصی به شخص دیگر تغییر می‌کند.

دستگاه بین‌المللی یکاها

در سال ۱۹۷۱/۱۳۵۰* چهاردهمین مجمع عمومی اوزان و مقیاس‌ها هفت کمیت اصلی را انتخاب کرد، که اساس دستگاه بین‌المللی یکاها** (با نماد SI با توجه به سرنام‌های عبارت فرانسوی آن) یا **دستگاه متریک**، را تشکیل می‌دهند. جدول ۱-۱ یکاهای مربوط به سه کمیت اصلی - طول، زمان و جرم - را نشان می‌دهد.

برخی **یکاهای فرعی** SI برحسب این سه یکا تعریف می‌شوند. مثلاً، یکای توان در SI، به نام **وات** (با نماد W)، برحسب یکاهای مربوط به جرم، طول و زمان نوشته می‌شود. بنابراین، می‌توان نوشت

$$(1-1) \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3$$

که در آن یکای جمله‌ی سمت راست به صورت کیلوگرم - مترمربع بر مکعب ثانیه، خوانده می‌شود.

جدول ۱-۱ یکاهای مربوط به سه کمیت اصلی SI

نماد یکا	نام یکا	کمیت
m	متر	طول
s	ثانیه	زمان
kg	کیلوگرم	جرم

* عدد سمت راست ممیز نماینده‌ی سال هجری شمسی و عدد سمت چپ نماینده‌ی سال میلادی است. - م.

** دستگاه بین‌المللی یکاها با توجه به سرنام‌های عبارت فرانسوی Le Système International d'unités با نماد SI نوشته می‌شود. - م.

جدول ۲-۱ پیشوندهای مربوط به یکاهای SI

نماد	پیشوند*	ضریب
d	دسی	10^{-1}
c	سانتی	10^{-2}
m	میلی	10^{-3}
μ	میکرو	10^{-6}
n	نانو	10^{-9}
p	پیکو	10^{-12}
f	فیمتو	10^{-15}
a	آتو	10^{-18}
z	زپتو	10^{-21}
y	یوکتو	10^{-24}
Y	یوتا	10^{24}
Z	زتا	10^{21}
E	اکزا	10^{18}
P	پتا	10^{15}
T	ترا	10^{12}
G	گیگا	10^9
M	مگا	10^6
k	کیلو	10^3
h	هکتو	10^2
da	دکا	10^1

* پیشوندهای با کاربرد متداول‌تر با حروف سیاه نشان داده شده‌اند.

برای نشان دادن مقادیر بسیار بزرگ، یا بسیار کوچک، از **نمادگذاری علمی** با به‌کار بردن توان‌های ۱۰ استفاده می‌شود. با این نمادگذاری می‌توان نوشت

$$(2-1) \quad 3560000000 \text{ m} = 3,56 \times 10^9 \text{ m}$$

و

$$(3-1) \quad 0,000000492 \text{ s} = 4,92 \times 10^{-7} \text{ s}$$

نمادهای علمی یاد شده را در کاربردهای کامپیوتری، اغلب به‌صورت $3,56 \text{ E}9$ و $4,92 \text{ E}-7$ می‌نویسند، که در آن E نشان‌دهنده‌ی «نمای ۱۰» است. در برخی حسابگرها نمادها را باز هم مختصرتر می‌کنند و E را با فاصله‌ی خالی نشان می‌دهند.

در جاهایی که با مقادیر بسیار بزرگ، یا بسیار کوچک، سروکار داریم از پیشوندهای درج شده در جدول ۲-۱ استفاده می‌کنیم. در این جدول، هر پیشوند نشان‌دهنده‌ی توان معینی از ۱۰ به‌صورت یک ضریب است. قرار گرفتن پیشوند در جلو یکی از یکاهای SI به این معنی است که آن یکا باید در ضریب وابسته به پیشوند ضرب شود. بدین ترتیب، مقدار یک توان الکتریکی معین را می‌توان به صورت زیر بیان کرد

$$(4-1) \quad 1,27 \text{ GW} = 1,27 \text{ (گیگاوات)} = 1,27 \text{ (وات)} \times 10^9$$

یا، مقدار یک بازه‌ی زمانی معین را می‌توان چنین نوشت

$$(5-1) \quad 2,35 \text{ ns} = 2,35 \text{ (نانو ثانیه)} = 2,35 \times 10^{-9} \text{ s}$$

تبدیل یکاها

گاهی لازم است که یک کمیت فیزیکی داده شده با یک یکا را برحسب یکای دیگر بیان کنیم. برای این کار از روشی به نام **تبدیل‌های زنجیری** استفاده می‌شود. در این روش مقدار اصلی کمیت را در یک ضریب تبدیل (یعنی نسبتی از یکاها که برابر با واحد است) ضرب می‌کنیم. به‌عنوان مثال، چون یک دقیقه و ۶۰ ثانیه بازه‌های زمانی یکسانی هستند، داریم

$$\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 1 \quad \text{و} \quad \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 1$$

بنابراین، نسبت‌های $(60 \text{ s}) / (1 \text{ min})$ و $(1 \text{ min}) / (60 \text{ s})$ را می‌توان به عنوان ضریب‌های تبدیل به کار برد. توجه کنید که نوشتن این رابطه‌ها به صورت $\frac{1}{60} = 1$ یا $60 = 1$ درست نیست. **عدد و یکای** مربوط به هر کمیت باید همیشه با هم نوشته شوند.

چون با ضرب کردن هر کمیت در واحد، مقدار کمیت تغییر نمی‌کند ضریب‌های تبدیل را در هر جا و به هر اندازه که مفید باشند می‌توان به کاربرد. در تبدیل زنجیری باید از ضریب‌ها به گونه‌ای استفاده شود که یکاهای ناخواسته حذف شوند. مثلاً، برای تبدیل ۲ دقیقه به ثانیه، داریم

$$(6-1) \quad 2 \text{ min} = (2 \text{ min})(1) = (2 \text{ min}) \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 120 \text{ s}$$

در پیوست ت در پایان کتاب، ضریب‌های تبدیل میان SI و دستگاه‌های یگای غیر SI که هنوز در ایالات متحده آمریکا به کار می‌روند، درج شده‌است.

طول

در سال ۱۷۹۲/۱۱۷۱ جمهوری فرانسه دستگاه اوزان و مقیاس‌های جدیدی را بنا نهاد. شالوده‌ی این دستگاه متر بود که برابر با یک ده میلیونیم فاصله‌ی میان قطب شمال تا استوا تعریف می‌شد. بعدها، متر به صورت فاصله‌ی میان دو خط باریک حک شده‌ی نزدیک به دو سر میله‌ای از جنس پلاتین - ایریدیوم، به نام **میله‌ی متر استاندارد**، تعریف شد.

سرانجام، معلوم شد که برای استاندارد طول دقتی بسیار بیش از فاصله‌ی میان دو خراش باریک بر روی یک میله‌ی فلزی مورد نیاز است. در سال ۱۹۶۰/۱۳۳۹ برای متر، استاندارد تازه‌ای که مبتنی بر طول موج نور بود پذیرفته شد. برای این منظور، استاندارد مربوط به متر به صورت $۱۶۵۰۷۶۳ / ۷۳$ برابر طول موج نور خاص نارنجی - سرخ گسیل شده از اتم‌های کریپتون -۸۶ (ایزوتوپ کریپتون) در لوله‌ی تخلیه‌ی الکتریکی، که در همه جای دنیا قابل فراهم شدن است، باز تعریف شد. این تعداد طول موج‌ها را به‌گونه‌ای انتخاب کردند که استاندارد جدید به استاندارد میله‌ی متر نزدیک باشد.

اما در سال ۱۹۸۳/۱۳۶۲ نیاز به دقت بیشتر به جایی رسید که حتی استاندارد کریپتون -۸۶ هم نمی‌توانست مناسب باشد. در آن سال متر به صورت مسافت پیموده شده توسط نور در یک بازه‌ی زمانی مشخص باز تعریف شد. در هفدهمین مجمع اوزان و مقیاس‌ها متر بدین گونه تعریف شد:

متر طول مسیری است که نور در بازه‌ی زمانی $\frac{1}{299792458}$ ثانیه در خلأ می‌پیماید.



این بازه‌ی زمانی چنان انتخاب شد که تندی نور c ، درست برابر باشد با

$$c = 299792458 \text{ m/s}$$

اندازه‌گیری‌های تندی نور چنان دقیق انجام شده‌اند که سبب شده است تندی نور به عنوان کمیتی تعریف شده پذیرفته شود و برای باز تعریف متر به کار رود.

جدول ۱-۳ گستره‌ی وسیعی از طول‌ها، از اندازه‌ی عالم (سطر اول جدول) گرفته تا ابعاد

اجسام بسیار ریز، را نشان می‌دهد.

رقم‌های با معنی و رقم‌های اعشاری

فرض کنید مسئله‌ای را حل می‌کنید که در آن هر کمیت دارای دو رقم است. این رقم‌ها را **رقم‌های با معنی** می‌نامند و آن‌ها تعداد رقم‌هایی را نشان می‌دهند که شما برای گزارش پاسخ نهایی می‌توانید به کار ببرید. اگر داده‌ها با دو رقم با معنی ارائه شده باشند، پاسخ نهایی تنها

جدول ۱-۳ برخی طول‌های تقریبی

اندازه‌گیری	طول بر حسب متر
فاصله تا نخستین کهکشان‌های تشکیل شده	2×10^{26}
فاصله تا کهکشان زن به زنجیربسته (امراه‌المسلسله)	2×10^{22}
فاصله تا نزدیک‌ترین ستاره (پروکزیما قنطورس)	4×10^{16}
فاصله تا سیاره‌ی پلوتو	6×10^{12}
شعاع زمین	6×10^6
ارتفاع قله‌ی اورست	9×10^3
ضخامت برگ کاغذ	1×10^{-4}
طول یک ویروس نوعی	1×10^{-8}
شعاع اتم هیدروژن	5×10^{-11}
شعاع پروتون	1×10^{-15}

باید دو رقم با معنی داشته باشد. اما بسته به حالتی که بر روی ماشین حساب انتخاب می‌شود، ممکن است رقم‌های بیشتری نمایش داده شوند. این رقم‌های اضافی بی‌معنی هستند.

در این کتاب، نتایج نهایی محاسبات گرد شده‌اند تا با کم‌ترین تعداد رقم‌های با معنی در داده‌ها سازگار باشند. هرگاه آخرین رقم حاصل ۵ یا بیشتر باشد، آن رقم را حذف و به رقم قبلی یک واحد اضافه می‌کنیم؛ در غیر این صورت به آن رقم دست نمی‌زنیم. برای مثال، $۱۱/۳۵۱۶$ تا سه رقم با معنی به صورت $۱۱/۴$ گرد می‌شود.

وقتی عددی مانند $۳/۱۵$ یا $۳/۱۵ \times ۱۰^۳$ در مسئله به وجود می‌آید، تعداد رقم‌های با معنی مشخص است، اما در مورد عدد ۳۰۰۰ چطور؟ آیا می‌توان گفت که این عدد یک رقم با معنی دارد (۳×۱۰^۳)؟ یا می‌توان گفت که این عدد چهار رقم با معنی دارد ($۳/۰۰۰ \times ۱۰^۳$)؟ در این کتاب، فرض می‌کنیم که در عددی مانند ۳۰۰۰ همه‌ی صفرها نیز با معنی‌اند، اما بهتر است در جای دیگر از این فرض استفاده نکنیم.

رقم‌های با معنی را با **رقم‌های اعشاری** اشتباه نکنید. طول‌های $۳۵/۶ \text{ mm}$ ، $۳/۵۶ \text{ m}$ و $۰/۰۰۳۵۶ \text{ m}$ را در نظر بگیرید. این هر سه طول سه رقم با معنی دارند، اما به ترتیب، دارای یک، دو و پنج رقم اعشاری هستند.



مسئله نمونه‌ی ۱-۱ برآورد مرتبه‌ی بزرگی

شعاع بزرگ‌ترین گلوله‌ی نخ دنیا در حدود ۲ متر است. طول کل نخ این گلوله L ، در حد نزدیک‌ترین مرتبه‌ی بزرگی چقدر است؟

نکته‌ی کلیدی

ما می‌توانیم گلوله را باز کنیم و طول کل نخ، L ، را اندازه بگیریم. اما این کار پرزحمت است و تهیه‌کننده‌ی گلوله را هم خوشحال نمی‌کند. در اینجا چون می‌خواهیم فقط نزدیک‌ترین مرتبه‌ی بزرگی را بدانیم، می‌توانیم هر کمیتی را که برای محاسبه نیاز داریم تخمین بزنیم.

محاسبات: گلوله‌ی نخ را به صورت کره‌ای با شعاع $R = ۲ \text{ m}$ فرض می‌کنیم. در این گلوله، نخ‌ها تنگ هم قرار نگرفته‌اند (یعنی، میان رشته‌های نخ مجاور فضای خالی وجود دارد که قابل اندازه‌گیری نیست). با در نظر گرفتن این فضای خالی مقطع نخ را مربعی به ضلع $d = ۴ \text{ mm}$ می‌گیریم. در این صورت، نخ با

مساحت مقطع $d^۲$ و طول L حجمی برابر با

$$V = d^۲ L = (\text{طول}) (\text{مساحت مقطع})$$

را اشغال می‌کند. این حجم، تقریبی برابر با حجم گلوله است، که

از رابطه‌ی $\frac{۴}{۳} \pi R^۳$ به دست می‌آید. اگر عدد π را در حدود ۳

بگیریم حجم گلوله، به تقریب، برابر با $۴R^۳$ خواهد بود. در این صورت، داریم

$$d^۲ L = ۴R^۳$$

و از آنجا

$$L = \frac{۴R^۳}{d^۲} = \frac{۴(۲\text{m})^۳}{(۴ \times ۱۰^{-۳} \text{ m})^۲} \Rightarrow$$

$$L = ۲ \times ۱۰^۶ \text{ m} \approx ۱۰^۶ \text{ m} = ۱۰^۳ \text{ km} \quad (\text{پاسخ})$$

(توجه کنید که در این محاسبه‌ی ساده به ماشین حساب نیازی نداریم). بنابراین، در حد نزدیک‌ترین مرتبه‌ی بزرگی طول نخ گلوله در حدود ۱۰۰۰ km است!



۲-۱ استاندارد زمان

نکته‌های کلیدی

- ثانیه برحسب نوسان‌های نور گسیل شده توسط یک چشمه‌ی اتمی (سزیوم - ۱۳۳) تعریف می‌شود. علامت‌های زمانی دقیق استاندارد کننده، به سراسر جهان فرستاده می‌شوند. توسط امواج رادیویی مرتبط با ساعت‌های اتمی در آزمایشگاه‌های

زمان

اندازه‌گیری زمان دو جنبه دارد. در عرف و در برخی از منظوره‌های علمی نیاز داریم لحظه‌ای از شبانه‌روز را بدانیم تا بتوانیم ترتیب زمانی رویدادها را مشخص کنیم. اما در بسیاری از کارهای علمی می‌خواهیم بدانیم که یک رویداد چه مدت طول می‌کشد. بنابراین، هر استاندارد زمانی باید بتواند به این دو پرسش جواب دهد: «چه وقت روی داده است؟» و «چه مدت طول کشیده است؟». جدول ۱-۴ برخی بازه‌های زمانی را نشان می‌دهد.

هر پدیده‌ی تکرارشونده می‌تواند یک استاندارد زمان باشد. چرخش زمین به دور خود، که مدت زمان شبانه‌روز را معین می‌کند، در طی سده‌های متمادی معیاری برای این کار بوده است. ساعت کوارتز را، که در آن قطعه‌ای از کوارتز پیوسته ارتعاش می‌کند، می‌توان بر مبنای چرخش زمین درجه‌بندی کرد و آن را برای اندازه‌گیری بازه‌های زمانی در آزمایشگاه به کار برد. اما این درجه‌بندی را با دقتی که در فناوری علمی و مهندسی نوین مورد نیاز است، نمی‌توان انجام داد.

برای پیدا کردن استاندارد زمانی بهتر، ساعت‌های اتمی را ساخته‌اند. ساعت اتمی مؤسسه‌ی ملی استانداردها و فناوری (NIST^۱) در بولدر^۲ کلرادو^۳ استاندارد برای زمان جهانی هماهنگ شده (UTC^۴) در ایالات متحد آمریکا است. علامت‌های زمانی این ساعت از طریق موج‌های کوتاه رادیویی (ایستگاه‌های WWV و WWVH) و تلفن (به شماره‌ی ۷۱۱۱-۴۹۹-۳۰۳) در دسترس‌اند. هم‌چنین، علامت‌های زمانی (و اطلاعات وابسته) به وسیله‌ی رصدخانه‌ی دریایی ایالات متحد^۵ در یک وب‌گاه جهانی^۶ در اختیار قرار دارند. (برای میزان کردن یک ساعت به نحو بسیار دقیق در یک محل خاص زمان باید لازم برای رسیدن علامت‌ها به آن محل را نیز در نظر گرفت).

شکل ۱-۱ تغییرات طول شبانه‌روز روی زمین در یک دوره‌ی چهار ساله را، که بر مبنای مقایسه با ساعت (اتمی) سزیومی معین شده است، نشان می‌دهد. چون تغییرات نمایش داده شده در شکل ۱-۱ فصلی و تکرار شونده هستند گمان می‌رود که اختلاف زمان اندازه‌گیری شده توسط ساعت‌های زمینی و اتمی به چرخش زمین مربوط باشد. این تغییرات از اثرهای کشندی (جزر و مدی) ماه و وجود بادهای بزرگ - مقیاس جوی ناشی می‌شوند.

جدول ۱-۴ برخی بازه‌های زمانی تقریبی

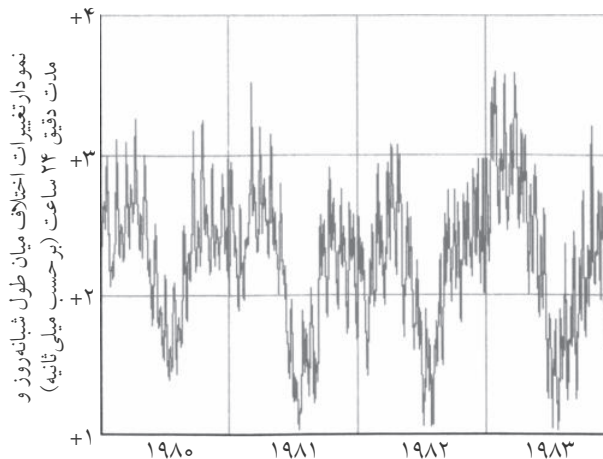
بازه‌ی زمانی	اندازه‌گیری
3×10^{40}	عمر میانگین پروتون (پیشگویی شده)
5×10^{17}	عمر جهان
1×10^{11}	عمر هرم خنوپس
2×10^9	عمر متوسط انسان
9×10^4	طول مدت شبانه‌روز
8×10^{-1}	مدت زمان بین دو ضربان قلب انسان
2×10^{-6}	عمر میانگین میوئون
1×10^{-16}	کوتاه‌ترین زمان تب نوری آزمایشگاهی
1×10^{-23}	عمر میانگین ناپایدارترین ذره
1×10^{-43}	زمان پلانک*

* زمان پلانک نزدیک‌ترین زمان پس از وقوع مه‌بانگ (انفجار بزرگ) است که در آن قوانین فیزیک را آن طور که می‌شناسیم می‌توان به کار برد.

1. National Institute of Standards and Technology (NIST)
3. Colorado
5. United States Naval Observatory

2. Boulder
4. Coordinated Universal Time (UTC)
6. Web site <http://tycho.usno.navy.mil/time.html>

شکل ۱-۱ نمودار تغییرات طول شبانه‌روز در یک دوره‌ی چهارساله. توجه کنید که تمام محور عمودی برای ۳ میلی‌ثانیه ($3\text{ms} = 0.003\text{s}$) درجه‌بندی شده است.



در سال ۱۹۶۷/۱۳۴۶ سیزدهمین مجمع عمومی اوزان و مقیاس‌ها بر پایه‌ی ساعت سزیومی، تعریف استاندارد زمان، ثانیه، را چنین پذیرفت

یک ثانیه زمانی است که طول می‌کشد تا نور (با طول موج خاص) گسیل شده از اتم سزیوم -۱۳۳، تعداد 9192631770 نوسان انجام دهد.

سازگاری ساعت‌های اتمی چنان است که دو ساعت سزیومی پس از ۶۰۰۰ سال کار کردن بیش از یک ثانیه با هم اختلاف پیدا نمی‌کنند. این دقت در مقایسه با ساعت‌هایی که به تازگی ساخته شده‌اند باز هم ناچیز است. دقت این ساعت‌ها می‌تواند به یک در 10^{18} ، یعنی، یک ثانیه در $1 \times 10^{18} \text{ s}$ (در حدود 3×10^1 سال) برسد.

۳-۱ استاندارد جرم

نکته‌های کلیدی

- کیلوگرم برحسب یک جرم استاندارد از جنس پلاتین - ایریدیوم نگهداری شده در نزدیکی پاریس تعریف می‌شود. برای اندازه‌گیری جرم در مقیاس اتمی، از یکای جرم اتمی ($a.m.u$)، تعریف شده
- چگالی یک ماده ρ ، برابر با جرم واحد حجم است:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

جرم

کیلوگرم استاندارد

استاندارد جرم در دستگاه بین‌المللی یکاها (SI) استوانه‌ای از جنس پلاتین - ایریدیوم است که در اداره‌ی بین‌المللی اوزان و مقیاس‌ها، واقع در نزدیکی پاریس، نگهداری می‌شود و بنابر توافق بین‌المللی به آن جرم یک کیلوگرم نسبت داده شده است. جدول ۱-۵ برخی جرم‌ها را که در گستره‌ای از مرتبه‌ی بزرگی ۸۳ قرار دارند، برحسب کیلوگرم، نشان می‌دهد.

جرم استاندارد دوم

جرم اتم‌ها را با کیلوگرم استاندارد نمی‌توان مقایسه کرد. بدین جهت، جرم استاندارد دومی هم وجود دارد. مبنای این استاندارد، جرم اتم کربن ^{12}C است، که بنا به توافق بین‌المللی، به کربن جرمی برابر با ۱۲ برابر یکای جرم اتمی (با نماد u) نسبت داده شده است. رابطه‌ی میان دو یکای جرم چنین است

$$1u = 1,66053886 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (7-1)$$

عدم قطعیت این عدد ± 10 در دو رقم اعشاری آخر است. دانشوران با دقتی پذیرفتنی می‌توانند به طور تجربی جرم اتم‌های دیگر را نسبت به جرم کربن ^{12}C معین کنند.

چگالی

چگالی ρ (حرف یونانی کوچک رو) یک جسم، جرم یکای حجم آن جسم است:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8-1)$$

چگالی‌ها را برحسب کیلوگرم بر متر مکعب، یا گرم بر سانتی‌متر مکعب، بیان می‌کنند. چگالی آب ($1/000$ گرم بر سانتی‌متر مکعب) را، اغلب، برای مقایسه به کار می‌برند. چگالی برف تازه در حدود ۱۰٪ چگالی آب و چگالی پلاتین در حدود ۲۱ برابر چگالی آب است.

جدول ۱-۵ برخی جرم‌های تقریبی

جرم برحسب کیلوگرم	جسم
1×10^{53}	جهان شناخته شده
2×10^{41}	کهکشان ما
2×10^{30}	خورشید
7×10^{22}	ماه
5×10^{15}	سیارک اروس
1×10^{12}	کوه کوچک
7×10^7	کشتی اقیانوس‌پیما
5×10^3	فیل
3×10^{-3}	دانه‌ی انگور
7×10^{-10}	ذره‌ی غبار
5×10^{-17}	مولکول پنی‌سیلین
4×10^{-25}	اتم اورانیوم
2×10^{-27}	پروتون
9×10^{-31}	الکترون

مسئله‌ی نمونه‌ی ۱-۲ چگالی و آبگونی



نکته‌ی کلیدی

چگالی شن در نمونه، شن ρ ، برابر با جرم یکای حجم - یعنی نسبت جرم کل دانه‌های شن، شن m ، به حجم کل نمونه کل V ، است:

$$\rho_{\text{شن}} = \frac{m_{\text{شن}}}{V_{\text{کل}}} \quad (10-1)$$

محاسبات: حجم کل نمونه کل V ، برابر است با

$$V_{\text{کل}} = V_{\text{دانه}} + V_{\text{فضاهای تهی}}$$

با جانشانی فضاهای تهی V از معادله‌ی ۱-۹ و حل کردن معادله نسبت به دانه $V_{\text{دانه}}$ ، داریم

$$V_{\text{دانه}} = \frac{V_{\text{کل}}}{1+e} \quad (11-1)$$

با توجه به معادله‌ی ۱-۸، جرم کل دانه‌های شن، شن m ، برابر با حاصل ضرب چگالی دی‌اکسید سیلیسیوم جامد (جزء اصلی شن)، شن است:

در هنگام وقوع زمین‌لرزه اگر لرزش باعث آبگونی زمین شود ذرات خاک در هنگام لغزیدن بر روی هم با اصطکاک کمی روبه‌رو می‌شوند و هر جسم سنگینی می‌تواند در زمین فرو رود. در این صورت، سطح زمین به شکل باتلاقی از ماسه‌ی روان در می‌آید. امکان آبگونی زمین شنی را می‌توان برحسب نسبت فضای تهی e ، برای نمونه‌ای از زمین پیشگویی کرد:

$$e = \frac{V_{\text{فضاهای تهی}}}{V_{\text{دانه}}} \quad (9-1)$$

در اینجا دانه $V_{\text{دانه}}$ حجم کل دانه‌های شن در نمونه و فضاهای تهی $V_{\text{فضاهای تهی}}$ حجم کل بین دانه‌ها (در فضاهای تهی) است. اگر e از مقدار بحرانی $0/80$ بیشتر شود، در حین زمین‌لرزه آبگونی می‌تواند بروز کند. چگالی شن ρ ، چقدر است؟ چگالی دی‌اکسید سیلیسیوم جامد (جزء اصلی شن)،

$$\rho(\text{SiO}_2) = 2,600 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \text{ است.}$$

$e = 0.80$ ، در می‌یابیم که آبگونش هنگامی رخ می‌دهد که چگالی شن کمتر از مقدار زیر باشد

$$\rho_{\text{شن}} = \frac{2.600 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}{1.80} = 1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \text{ (پاسخ)}$$

در هنگام بروز آبگونش، یک ساختمان ممکن است چندین متر در زمین فرو برود.



$$(12-1) \quad m_{\text{شن}} = \rho(\text{SiO}_2) V_{\text{ها}}$$

با جانشانی این رابطه در معادله‌ی ۱-۱۰ و سپس جانشانی دانه‌ها از معادله‌ی ۱-۱۱، داریم

$$(13-1) \quad \rho_{\text{شن}} = \frac{\rho(\text{SiO}_2)}{V_{\text{کل}}} \times \frac{V_{\text{کل}}}{1+e} = \frac{\rho(\text{SiO}_2)}{1+e}$$

با جانشانی $\rho(\text{SiO}_2) = 2.600 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ و مقدار بحرانی

مرور و چکیده مطالب

ضریب‌های تبدیلی برابر با واحد ضرب می‌شوند و یکاها مانند کمیت‌های جبری به گونه‌ای دست‌کاری می‌شوند که فقط یکاهای مطلوب باقی بمانند.

طول متر، بنا به تعریف، مسافتی است که نور به طور دقیق در یک بازه‌ی زمانی مشخص می‌پیماید.

زمان ثانیه بر مبنای نوسان‌های نور گسیل شده از یک چشمه‌ی اتمی (سزیوم - ۱۳۳) تعریف می‌شود. علامت‌های زمانی دقیق از طریق امواج رادیویی، که با ساعت‌های اتمی آزمایشگاه‌های استانداردکننده میزان شده‌اند به سراسر دنیا فرستاده می‌شوند.

جرم کیلوگرم، بنابه تعریف، عبارت است از پیش نمونه‌ای خاص از پلاتین - ایریدیوم که در نزدیکی پاریس، فرانسه، نگهداری می‌شود. برای اندازه‌گیری در مقیاس اتمی، به طور معمول، یکای جرم اتمی را، که بر مبنای جرم اتم کربن - ۱۲ تعریف شده است، به کار می‌برند.

چگالی چگالی یک ماده ρ ، جرم یکای حجم آن ماده است:

$$(1-8) \quad \rho = \frac{m}{V}$$

اندازه‌گیری در فیزیک دانش فیزیک مبتنی بر اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی است. برخی کمیت‌های فیزیکی به عنوان **کمیت‌های اصلی** انتخاب شده‌اند (مانند طول، زمان و جرم)، که هر یک بر حسب یک استاندارد و یک یکای اندازه‌گیری معین تعریف شده‌اند (مانند متر، ثانیه و کیلوگرم). سایر کمیت‌های فیزیکی بر حسب کمیت‌های اصلی و استانداردها و یکاهای آن‌ها تعریف می‌شوند.

یکاهای SI در این کتاب دستگاه یکای مورد تأکید، دستگاه بین‌المللی یکاها (SI) است. در فصل‌های آغازین کتاب سه کمیت فیزیکی مندرج در جدول ۱-۱ کاربرد بیشتری دارند. استانداردها، که باید دسترس‌پذیر و تغییرناپذیر باشند، با توافق بین‌المللی برای کمیت‌های اصلی در نظر گرفته شده‌اند. این استانداردها هم برای کمیت‌های اصلی و هم برای کمیت‌های فرعی حاصل از آن‌ها در تمام اندازه‌گیری‌های فیزیکی به کار می‌روند. برای ساده‌سازی نمادهای اندازه‌گیری می‌توان از نمادهای علمی و پیشوندهای جدول ۱-۲ استفاده کرد.

تبدیل یکاها تبدیل یکاها را با استفاده از روش **تبدیل‌های زنجیری** می‌توان انجام داد. در این روش، داده‌ها پی‌درپی در

پودمان ۱-۱ اندازه‌گیری کمیت‌ها

*** ۷ تصور کنید در حالی که در ساحلی در نزدیکی استوا دراز کشیده‌اید و غروب خورشید را در افق دریای آرام تماشا می‌کنید، درست در لحظه‌ی ناپدید شدن لبه‌ی بالای قرص خورشید یک ساعت وقت نگهدار را به کار می‌اندازید. سپس سرپا می‌ایستید و در حالی که ارتفاع چشم‌های شما از سطح زمین $H = 1.70\text{ m}$ است، دوباره در لحظه‌ی ناپدید شدن لبه‌ی بالای قرص خورشید، ساعت را از کار می‌اندازید. اگر این بازه‌ی زمانی $t = 11/18$ باشد، شعاع کره‌ی زمین r ، چقدر است؟

پودمان ۳-۱ استاندارد جرم

* ۸ جرم زمین $5.98 \times 10^{24}\text{ kg}$ است. جرم متوسط اتم‌هایی که ماده‌ی زمین را تشکیل می‌دهند 40 u است. زمین از چند اتم تشکیل شده است؟

* ۹ طلا با چگالی 19.32 g/cm^3 ، شکل‌پذیرترین فلزات است و می‌توان آن را در اثر فشردن به صورت یک برگه‌ی نازک یا در اثر کشیدن به صورت یک تار باریک درآورد. (الف) اگر نمونه‌ای از طلا به جرم $27/63$ گرم را در اثر فشردن به برگه‌ای به ضخامت $1/000\text{ }\mu\text{m}$ تبدیل کنیم، مساحت برگه‌ی طلا چقدر می‌شود؟ (ب) اگر این نمونه‌ی طلا را در اثر کشیدن به یک تار استوانه‌ای باریک با مقطعی به شعاع $2/500\text{ }\mu\text{m}$ تبدیل کنیم، طول تار چقدر می‌شود؟

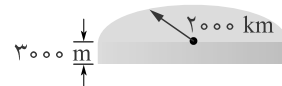
* ۱۰ (الف) با فرض آنکه چگالی آب درست 1 g/cm^3 است، جرم یک متر مکعب آب را برحسب کیلوگرم پیدا کنید. (ب) فرض کنید $10/0$ ساعت طول بکشد تا مخزنی حاوی 5700 m^3 آب خالی شود. «آهنگ شارش جرم» آب از مخزن، برحسب کیلوگرم بر ثانیه چیست؟

* ۱۱ بر اثر بارندگی، بخشی از خاک دامنه‌ی یک کوه به ابعاد $2/5\text{ km}$ افقی، $0/80\text{ km}$ در راستای شیب کوه به سمت بالا و به عمق $2/0\text{ m}$ به صورت گل و لای کنده می‌شود و به یک دره می‌ریزد. فرض کنید این گل و لای به طور یکنواخت در سطح دره به ابعاد $0/40\text{ km} \times 0/40\text{ km}$ پخش می‌شود و چگالی گل و

* ۱ زمین کره‌ای با شعاع تقریبی $6/37 \times 10^6\text{ m}$ است. (الف) محیط زمین برحسب کیلومتر، (ب) مساحت سطح زمین برحسب کیلومتر مربع و (پ) حجم زمین برحسب کیلومتر مکعب، چیست؟

* ۲ میکرومتر ($1\text{ }\mu\text{m}$) را اغلب میکرون می‌نامند. (الف) $1/0\text{ km}$ چند میکرون است؟ (ب) $1/0\text{ }\mu\text{m}$ چه کسری از سانتی‌متر است؟ (پ) یک یارد چند میکرون است؟

* ۳ جنوبگان (قطب جنوب) ناحیه‌ای، به شکل تقریبی نیم‌دایره به شعاع 2000 km است (شکل ۲-۱). ضخامت متوسط پوشش یخ در این ناحیه 3000 m است. حجم یخ ناحیه‌ی جنوبگان چند سانتی‌متر مکعب است؟ (خمیدگی سطح زمین را نادیده بگیرید).



شکل ۲-۱ مسئله‌ی ۳.

پودمان ۲-۱ استاندارد زمان

* ۴ سریع‌ترین رشد گیاهی ثبت شده مربوط به هسپروبوکاوویپلی^۱ است که در مدت ۱۴ شبانه‌روز به اندازه‌ی $3/7\text{ m}$ رشد کرد. آهنگ رشد این گیاه برحسب میکرومتر بر میلی‌ثانیه چه بوده است؟

* ۵ مدت یک جلسه‌ی درس (۵۰ دقیقه) در حدود یک میکروقرن است. (الف) یک میکروقرن چند دقیقه است؟ (ب) با استفاده از معادله‌ی زیر

$$\text{درصد اختلاف} = \left(\frac{\text{مقدار تقریبی} - \text{مقدار واقعی}}{\text{مقدار واقعی}} \right) \times 100$$

درصد اختلاف را نسبت به مقدار تقریبی به دست آورید.

* ۶ چون چرخش زمین به تدریج در حال کند شدن است، طول هر شبانه‌روز افزایش می‌یابد: طول شبانه‌روز در پایان یک قرن به اندازه‌ی $1/0\text{ ms}$ بیشتر از آغاز قرن است. در مدت ۳۰ قرن مقدار افزایش کل طول شبانه‌روز چیست؟

1. *Hesperoyucca whipplei*

**** ۱۵** در مخزنی که اندکی نشتی دارد آب ریخته می‌شود. جرم آب موجود در مخزن m ، برحسب زمان t از معادله‌ی $m = 5/00t^{1/8} - 3/00t + 20/00$ به دست می‌آید، که در آن m برحسب گرم و $t \geq 0$ برحسب ثانیه است. (الف) در چه زمانی مخزن بیشترین جرم آب را دارد؟ (ب) این بیشترین جرم چقدر است؟ آهنگ تغییر جرم آب برحسب کیلوگرم بر دقیقه در زمان‌های (پ) $t = 2/00s$ و (ت) $t = 5/00s$ ، چیست؟

***** ۱۶** ظرفی با دیوارهای قائم و مساحت قاعده‌ی $17/0cm \times 14/0cm$ را با دانه‌هایی از آب نبات، هر یک به حجم $50/0mm^3$ و جرم $0/0200g$ ، پر می‌کنیم. فرض کنید حجم فضای خالی میان دانه‌های آب نبات قابل چشم‌پوشی است. اگر ارتفاع آب نبات‌های ظرف با آهنگ $0/250cm/s$ افزایش یابد، آهنگ افزایش یافتن جرم آب نبات‌ها (برحسب کیلوگرم بر دقیقه) در ظرف چقدر است؟

لای $1900kg/m^3$ است. جرم گل و لای ته‌نشین شده در مساحت $4/0m^2$ از دره چقدر است؟

**** ۱۲** یک سانتی‌متر مکعب از ابر کومه‌ای (کومولوس) دارای ۵۰ تا ۵۰۰ قطره آب است. شعاع هر قطره آب معمولی $10\mu m$ است. برای این گستره از تعداد قطره‌های آب کمترین و بیشترین مقادیر متناظر را، به ترتیب، در حالت‌های زیر مشخص کنید. (الف) در استوانه‌ای از ابر کومه‌ای به ارتفاع $3/0km$ و شعاع $1/0km$ ، چند مترمکعب آب وجود دارد؟ (ب) این آب چند بطری یک لیتری را پر می‌کند؟ (پ) چگالی آب $1000kg/m^3$ است. جرم آب موجود در این ابر چقدر است؟

**** ۱۳** چگالی آهن $7/87g/cm^3$ و جرم یک اتم آهن $9/27 \times 10^{-26}kg$ است. اتم‌ها را به صورت کره‌های تنگ‌هم چیده شده در نظر می‌گیریم. (الف) حجم یک اتم آهن چقدر است؟ (ب) فاصله‌ی میان مرکزهای دو اتم مجاور چیست؟

**** ۱۴** یک مول اتم برابر با $6/02 \times 10^{23}$ اتم است. بدن یک گربه‌ی خانگی بزرگ تا نزدیک‌ترین مرتبه‌ی بزرگی، شامل چند مول اتم است؟ جرم اتم هیدروژن، اتم اکسیژن، اتم کربن، به ترتیب، $1/0u$ ، $16u$ و $12u$ است.

حرکت در طول خط راست

۱-۲ مکان، جابه‌جایی، و سرعت متوسط

نکته‌های کلیدی

- مکان x یک ذره بر روی محور x ، جای ذره نسبت به مبدا، یا نقطه‌ی صفر محور را معین می‌کند.
 - مکان ذره، بسته به این که ذره در کدام طرف مبدا قرار دارد، مثبت یا منفی است، یا اگر ذره در مبدا باشد مکان آن صفر است.
 - جهت مثبت بر روی یک محور همان جهت افزایش یافتن عددهای مثبت است؛ جهت مخالف، جهت منفی محور x است.
 - جابه‌جایی یک ذره Δx ، تغییر مکان ذره است:
- $$\Delta x = x_2 - x_1$$
- جابه‌جایی کمیتی برداری است. این کمیت مثبت است اگر ذره در جهت مثبت محور x حرکت کرده باشد و منفی است اگر ذره در جهت منفی حرکت کرده باشد.
 - هرگاه ذره‌ای در بازه‌ی زمانی $\Delta t = t_2 - t_1$ از مکان x_1 تا مکان x_2 حرکت کند، سرعت متوسط آن در این بازه‌ی زمانی برابر
- $$v_{\text{avg}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$
- است با
- علامت جبری v_{avg} جهت حرکت را نشان می‌دهد (v_{avg} کمیتی برداری است). سرعت متوسط به مسافت واقعی پیموده شده توسط ذره بستگی ندارد، اما در عوض، به مکان‌های آغازی و پایانی ذره بستگی دارد.
 - در روی یک نمودار x برحسب t ، سرعت متوسط در بازه‌ی زمانی Δt ، با شیب خط راست وصل‌کننده‌ی دو نقطه‌ی منحنی که معرف دو انتهای بازه‌ی زمانی هستند، برابر است.
 - تندی متوسط s_{avg} یک ذره در طی بازه‌ی زمانی Δt به مسافت کل پیموده شده در این بازه‌ی زمانی بستگی دارد:
- $$s_{\text{avg}} = \frac{\text{مسافت کل}}{\Delta t}$$

فیزیک در این باره چه می‌گوید؟

یکی از هدف‌های دانش فیزیک مطالعه‌ی حرکت اجسام است - مثلاً، اینکه یک جسم با چه سرعتی حرکت می‌کند و در یک مدت معین چه مسافتی را می‌پیماید. مهندسان انجمن ملّی مسابقات خودروهای معمولی در حالی که کارایی خودروهای خود را پیش از مسابقه و در حین مسابقه بررسی می‌کنند، در مورد این جنبه از دانش فیزیک تعصب نشان می‌دهند. زمین‌شناسان در تلاش برای پیشگویی زمین‌لرزه از این بخش دانش فیزیک برای اندازه‌گیری حرکت صفحات زمین ساخت استفاده می‌کنند. پژوهشگران حوزه‌ی پزشکی در هنگام تشخیص گرفتگی جزئی در یک سرخرگ، برای شناخت شارش خون در بدن بیمار به این بخش فیزیک نیاز دارند و راننده‌ها هم به این بخش فیزیک توجه دارند تا هنگام دریافت کردن

اعلام خطر آشکارساز رادار خودرو خود بتوانند سرعت خودرو را با آهنگ مناسبی کم کنند. در این مورد مثال‌های زیادی را می‌توان بیان کرد. در این فصل کتاب، ما فیزیک پایه‌ی مربوط به حرکت را در حالتی مطالعه می‌کنیم که یک جسم (خودرو مسابقه، صفحه‌ی زمین ساخت، یاخته‌ی خون، یا هر جسم دیگر) در طول یک محور حرکت می‌کند. چنین حرکتی را **حرکت یک بعدی** می‌نامند.

حرکت

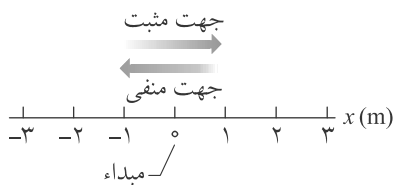
دنیا و هر چه در آن است در حال حرکت است. حتی اجسام به ظاهر ساکن، مانند یک جاده، با چرخش زمین به دور خود، حرکت مداری زمین به دور خورشید، حرکت مداری خورشید به دور مرکز کهکشان راه شیری و حرکت این کهکشان نسبت به کهکشان‌های دیگر، نیز حرکت می‌کنند. رده‌بندی و مقایسه‌ی حرکت‌ها (که **حرکت‌شناسی**، یا **سینماتیک** نام دارد) اغلب کاری چالش برانگیز است. ما دقیقاً چه چیزی را اندازه می‌گیریم و مقایسه را چگونه انجام می‌دهیم؟ پیش از آنکه برای پاسخ دادن به این پرسش‌ها تلاش کنیم، برخی ویژگی‌های کلی حرکت را که در سه موضوع زیر قرار می‌گیرند، بررسی می‌کنیم.

۱. حرکت فقط در طول یک خط راست انجام می‌شود. این خط ممکن است در راستای قائم، در راستای افقی، یا به صورت مورب باشد، اما باید راست باشد.
۲. نیروها (هُل دادن‌ها و کشیدن‌ها) باعث ایجاد حرکت می‌شوند. در این فصل، تنها خود حرکت و تغییر در حرکت را مطالعه می‌کنیم. در اینجا، می‌خواهیم بدانیم آیا جسم متحرک سرعتش زیاد می‌شود یا کم می‌شود، متوقف می‌شود یا جهت حرکتش عوض می‌شود؟ اگر حرکت تغییر می‌کند، زمان در این تغییر چگونه دخالت می‌کند؟
۳. جسم در حالت حرکت، یک ذره است (منظور جسم نقطه مانند نظیر الکترون است) یا جسمی است که مانند یک ذره حرکت می‌کند. یک قطعه‌ی چدن خشک را که از بالای یک سطح شیب‌دار به پایین می‌لغزد، می‌توان یک ذره‌ی در حال حرکت در نظر گرفت؛ اما بوته‌ی خاری را که در حال وول خوردن به پایین است نمی‌توان یک ذره فرض کرد.

مکان و جابه‌جایی

تعیین مکان یک جسم به معنی پیدا کردن موضع جسم نسبت به یک نقطه‌ی مرجع است، که اغلب، **مبداء** (یا نقطه‌ی صفر) محوری مانند محور x ، در شکل ۱-۲ است. **جهت مثبت** این محور همان جهت افزایش یافتن عددها (مختصه‌ها) است، که در شکل ۱-۲ به سمت راست است، و جهت مخالف، **جهت منفی** است.

برای مثال، یک ذره ممکن است در مکان $x = 5 \text{ m}$ باشد، که نشان می‌دهد ذره در فاصله‌ی ۵ متری طرف مثبت مبداء واقع شده است. اگر ذره در مکان $x = -5 \text{ m}$ باشد، معنی‌اش این است که به همان فاصله در سوی مخالف مبداء واقع است. نوشتن علامت مثبت مختصه لازم نیست، اما علامت منفی را همیشه باید نوشت.



شکل ۱-۲ نمودار مکان یک جسم در روی محوری معین می‌شود که برحسب یکاهای طول (در اینجا متر) نشانه‌گذاری شده و در دو جهت مخالف تا بی‌نهایت امتداد یافته است. نام محور، که در اینجا x است، همیشه در طرف مثبت مبداء نوشته می‌شود.

تغییر مکان ذره از x_1 به مکان دیگر x_2 را **جابه‌جایی** Δx می‌نامند که برابر است با

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad (1-2)$$

[نماد Δ ، حرف یونانی دلتای بزرگ است، که نشان دهنده‌ی تغییر یک کمیت و معرف مقدار پایانی (نهایی) منهای مقدار آغازی (اولی) کمیت است]. هنگامی که عددهای مربوط به مکان‌های x_1 و x_2 را در معادله‌ی ۱-۲ قرار می‌دهیم، حاصل مثبت همیشه نشان می‌دهد که جابه‌جایی در جهت مثبت (در شکل ۱-۲ به طرف راست) و حاصل منفی نشان می‌دهد که جابه‌جایی در جهت مخالف (در شکل ۱-۲ به طرف چپ) است.

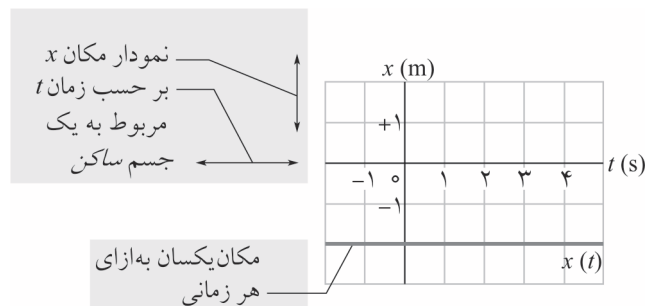
تعداد واقعی مترهای پیموده شده در طی یک مسافت به جابه‌جایی ربطی ندارد؛ جابه‌جایی فقط مربوط به مکان‌های آغازی و پایانی حرکت است. به عنوان مثال، اگر ذره از $x = 5 \text{ m}$ به $x = 200 \text{ m}$ برود و دوباره به $x = 5 \text{ m}$ برگردد، جابه‌جایی از آغاز تا پایان برابر است با $\Delta x = (5 \text{ m}) - (5 \text{ m}) = 0$.

علامت‌ها. علامت مثبت برای جابه‌جایی نیازی به نشان دادن ندارد، اما علامت منفی را همیشه باید نشان داد. اگر علامت (و در نتیجه جهت) جابه‌جایی را نادیده بگیریم، فقط بزرگی (یا قدر مطلق) جابه‌جایی مشخص می‌شود. برای مثال، جابه‌جایی $\Delta x = -4 \text{ m}$ دارای بزرگی 4 m است.

جابه‌جایی نمونه‌ای از **کمیت برداری** است، که کمیتی دارای جهت و بزرگی، هر دو، است. جابه‌جایی دو ویژگی دارد: (۱) **بزرگی**، که مسافت (مثلاً تعداد مترهای) بین مکان‌های آغازی و پایانی است. (۲) **جهت**، که از مکان آغازی به سمت مکان پایانی است، و اگر حرکت در راستای یک محور صورت گیرد، جهت با علامت مثبت یا منفی نشان داده می‌شود.

سرعت متوسط و تندی متوسط

برای توصیف مکان، یک روش ساده استفاده از نمودار مکان x به صورت تابعی از زمان t ، یعنی نمودار $x(t)$ است [نمادگذاری $x(t)$ به معنی x تابعی از t است، نه حاصل ضرب x در t]. به عنوان مثالی ساده، شکل ۲-۲ تابع $x(t)$ مربوط به یک حیوان در حال سکون (که آن را یک ذره در نظر می‌گیریم) در بازه‌ی زمانی ۷ ثانیه را نشان می‌دهد. این حیوان در مختصه‌ی $x = -2 \text{ m}$ ساکن است.



شکل ۲-۲ نمودار تابع $x(t)$ برای یک حیوان که در مکان $x = -2 \text{ m}$ ساکن است. در اینجا به ازای تمام زمان‌های t ، مقدار x برابر با -2 m است.

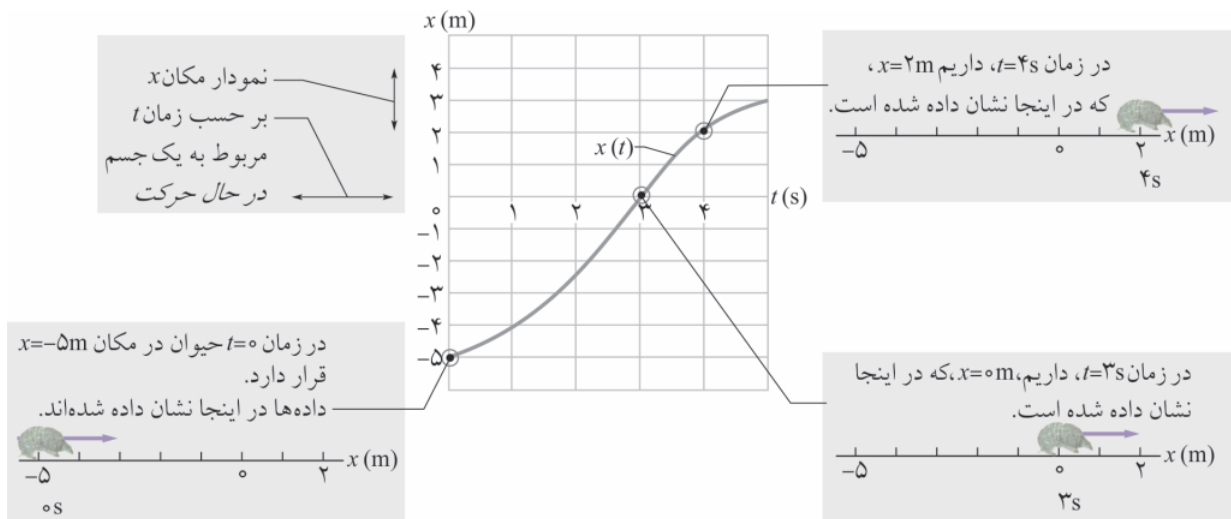
شکل ۲-۳ نیز برای حیوان رسم شده و جالب تر است، زیرا به حرکت مربوط می شود. حیوان ابتدا در زمان $t = 0$ در مکان $x = -5\text{ m}$ قرار دارد. سپس، به طرف مکان $x = 0$ حرکت می کند، در زمان $t = 3\text{ s}$ از آن نقطه می گذرد، و آنگاه به سمت مقادیر مثبت و بزرگ تر x حرکت می کند. شکل ۲-۳ حرکت راست خط واقعی حیوان را هم (در سه زمان) نشان می دهد و شبیه آن چیزی است که می توانیم ببینیم. نمودار شکل ۲-۳ انتزاعی تر است، اما نشان می دهد که حیوان با چه سرعتی حرکت می کند.

در عمل، در حرکت ذره اصطلاح «با چه سرعتی» به چند کمیت وابسته است. یکی از این کمیت ها **سرعت متوسط** v_{avg} ، است که برابر با نسبت جابه جایی انجام شده Δx ، به بازه زمانی معین Δt است:

$$v_{avg} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (2-2)$$

این نمادگذاری نشان می دهد که مکان x_1 مربوط به زمان t_1 و مکان x_2 مربوط به زمان t_2 است. یکای معمول برای v_{avg} ، **متر بر ثانیه** (با نماد m/s) است. در مسئله ها ممکن است از یکاهای دیگر هم استفاده شود، اما این یکاها همیشه به صورت نسبت $\frac{\text{طول}}{\text{زمان}}$ بیان می شوند.

نمودارها. در نمودار x بر حسب t ، v_{avg} شیب خط راستی است که دو نقطه ی خاص از منحنی $x(t)$ را به هم وصل می کند؛ یکی از نقطه ها متناظر با x_1 و t_1 ، و نقطه ی دیگر متناظر با x_2 و t_2 است. v_{avg} نیز مانند جابه جایی دارای بزرگی و جهت است (یعنی کمیتی برداری است). بزرگی v_{avg} ، همان بزرگی شیب خط راست است. مثبت بودن v_{avg} (و شیب خط) نشان می دهد که خط به طرف بالا و به سمت راست کشیده می شود و منفی بودن v_{avg} (و شیب خط) نمایشگر آن است که خط به طرف پایین و به سمت راست کشیده می شود. سرعت متوسط v_{avg} همیشه با جابه جایی Δx هم علامت است، زیرا در معادله ی ۲-۲، Δt همیشه مثبت است.



شکل ۲-۳ نمودار تابع $x(t)$ مربوط به حیوانی که حرکت می کند. شکل مسیر وابسته به نمودار نیز نشان داده شده است.

شکل ۲-۴ چگونگی پیدا کردن v_{avg} حیوان با استفاده از شکل ۲-۳ و در بازه‌ی زمانی $t = 1s$ تا $t = 4s$ را نشان می‌دهد. در این شکل نقطه‌ای از منحنی مکان را که مربوط به آغاز بازه‌ی زمانی است، با یک خط راست به نقطه‌ی دیگر، که مربوط به پایان بازه‌ی زمانی است، وصل می‌کنیم. سپس، شیب $\Delta x / \Delta t$ این خط راست را پیدا می‌کنیم. به ازای بازه‌ی زمانی داده شده سرعت متوسط برابر است با

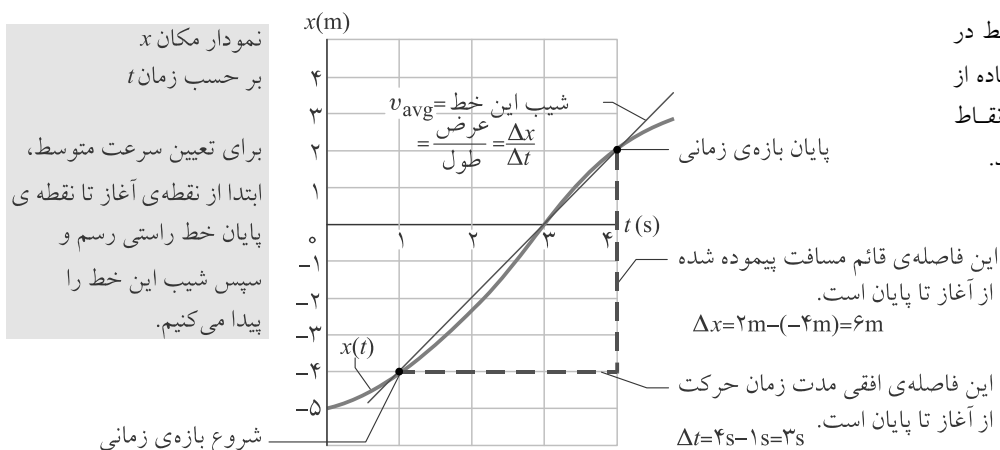
$$v_{avg} = \frac{6 \text{ m}}{3 \text{ s}} = 2 \text{ m/s}$$

تندی متوسط v_{avg} ، کمیت دیگری است که «چگونه تند رفتن» را در حرکت یک ذره توصیف می‌کند. در حالی که سرعت متوسط به جابه‌جایی Δx ذره مربوط می‌شود، تندی متوسط به مسافت کل پیموده شده (مثلاً تعداد مترهای پیموده شده) بستگی دارد و از جهت حرکت مستقل است؛ یعنی

$$v_{avg} = \frac{\text{مسافت کل پیموده شده}}{\Delta t} \quad (3-2)$$

چون تندی متوسط به جهت بستگی ندارد، بدون علامت جبری است. گاهی v_{avg} همان v_{avg} (بدون توجه به علامت) است، اما این دو مقدار می‌توانند کاملاً متفاوت باشند.

شکل ۲-۴ محاسبه‌ی سرعت متوسط در میان زمان‌های $t = 1s$ و $t = 4s$ ، با استفاده از شیب خطی که در روی منحنی $x(t)$ نقاط متناظر با این زمان‌ها را به هم وصل می‌کند.



مسئله‌ی نمونه‌ی ۱-۲ سرعت متوسط

فرض کنید در جاده‌ی مستقیمی با یک خودرو و وانت فرسوده مسافت $8/4 \text{ km}$ را با تندی 70 km/h می‌پیمایید. در این حال بنزین وانت تمام می‌شود و خودرو می‌ایستد. از این به بعد مسافت $2/0 \text{ km}$ را در مدت 30 دقیقه با پای پیاده و در همان جاده پیش می‌روید تا به جایگاه پخش بنزین برسید.

(الف) جابه‌جایی کل شما از لحظه‌ی شروع به رانندگی تا رسیدن به جایگاه پخش بنزین چقدر است؟

نکته‌ی کلیدی

برای آسانی فرض می‌کنیم در جهت مثبت محور x از مکان اول $x_1 = 0$ تا مکان دوم x_2 در جایگاه پخش بنزین، حرکت می‌کنید. مکان دوم در نقطه‌ی $x_2 = 8/4 \text{ km} + 2/0 \text{ km} = 10/4 \text{ km}$ قرار دارد. پس، جابه‌جایی شما Δx در راستای محور x از تفاضل مکان دوم و مکان اول به دست می‌آید.

محاسبه: با استفاده از معادله‌ی ۱-۲، داریم

برای پیدا کردن v_{avg} به روش ترسیمی، ابتدا نمودار تابع $x(t)$ را مطابق شکل ۲-۵ رسم می‌کنیم. در این شکل نقطه‌ی آغاز حرکت در مبدا مختصات و نقطه‌ی پایان در نمودار نقطه‌ی مشخص شده با «جایگاه» است. سرعت متوسط شما از شیب خط راست وصل کننده‌ی این دو نقطه، یعنی، از تقسیم کردن عرض نقطه‌ی مشخص شده با «جایگاه» ($\Delta x = 10.4 \text{ km}$) به طول این نقطه ($\Delta t = 0.62 \text{ h}$) به دست می‌آید، که برابر است با $v_{avg} = 16.8 \text{ km/h}$.

(ت) فرض کنید پس از گرفتن بنزین از جایگاه، ۴۵ دقیقه دیگر طول بکشد تا شما به خودرو خود برگردید. تندی متوسط شما از آغاز رانندگی تا بازگشت دوباره به خودرو چقدر است؟

نکته‌ی کلیدی

تندی متوسط از نسبت مسافت کل پیموده شده به بازه‌ی زمانی کل مربوط، به دست می‌آید.

محاسبه: مسافت کل برابر است با

$$8.4 \text{ km} + 2.0 \text{ km} + 2.0 \text{ km} = 12.4 \text{ km}$$

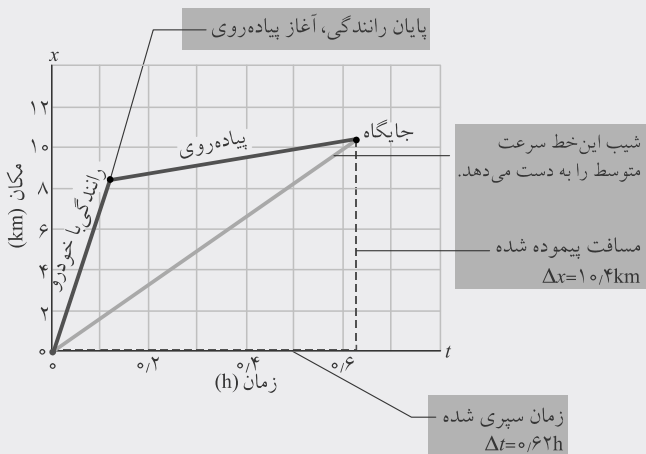
و بازه‌ی زمانی کل برابر است با

$$0.12 \text{ h} + 0.50 \text{ h} + 0.75 \text{ h} = 1.37 \text{ h}$$

بنابراین، با استفاده از معادله‌ی ۲-۳، داریم

$$s_{avg} = \frac{12.4 \text{ km}}{1.37 \text{ h}} \Rightarrow$$

$$s_{avg} = 9.1 \text{ km/h} \quad (\text{پاسخ})$$



شکل ۲-۵ خط‌های نشان‌دار شده با «رانندگی با خودرو» و «پیاده‌روی»، نمودارهای مکان - زمان مربوط به مراحل رانندگی با خودرو و پیاده‌روی هستند (نمودار مرحله‌ی پیاده‌روی با فرض ثابت بودن سرعت پیاده‌روی رسم شده است). شیب خط راست وصل کننده‌ی مبدا به نقطه‌ی مشخص شده با «جایگاه»، سرعت متوسط مسافت از آغاز تا رسیدن به جایگاه را به دست می‌دهد.



$$\Delta x = x_2 - x_1 = 10.4 \text{ km} - 0 \Rightarrow$$

$$\Delta x = 10.4 \text{ km} \quad (\text{پاسخ})$$

بنابراین، جابه‌جایی کل شما 10.4 km در جهت مثبت محور x است. (ب) بازه‌ی زمانی Δt از آغاز حرکت شما با خودرو تا رسیدن به جایگاه پخش بنزین چقدر است؟

نکته‌ی کلیدی

ما بازه‌ی زمانی مربوط به پیاده‌روی، یعنی (پیاده‌روی) Δt (مساوی با 0.50 h) را می‌دانیم، اما بازه‌ی زمانی (رانندگی) Δt مربوط به رانندگی شما با خودرو را نمی‌دانیم. در عین حال، می‌دانیم که جابه‌جایی خودرو، یعنی (رانندگی) Δx برابر با 8.4 km و سرعت متوسط (رانندگی) v_{avg} برابر با 70 km/h است. این سرعت متوسط برابر با نسبت جابه‌جایی خودرو به بازه‌ی زمانی مربوط به رانندگی است.

محاسبات: ابتدا می‌نویسیم

$$v_{avg}(\text{رانندگی}) = \frac{\Delta x(\text{رانندگی})}{\Delta t(\text{رانندگی})}$$

با مرتب کردن این رابطه و جانشانی داده‌ها، داریم

$$\Delta t(\text{رانندگی}) = \frac{\Delta x(\text{رانندگی})}{v_{avg}(\text{رانندگی})} = \frac{8.4 \text{ km}}{70 \text{ km/h}} = 0.12 \text{ h}$$

پس، می‌توان نوشت

$$\Delta t = \Delta t(\text{رانندگی}) + \Delta t(\text{پیاده‌روی})$$

$$\Delta t = 0.12 \text{ h} + 0.50 \text{ h} \Rightarrow$$

$$\Delta t = 0.62 \text{ h} \quad (\text{پاسخ})$$

(پ) سرعت متوسط شما، v_{avg} ، از آغاز رانندگی تا رسیدن به جایگاه پخش بنزین چقدر است؟ این مقدار را با روش‌های عددی و ترسیمی به دست آورید.

نکته‌ی کلیدی

با توجه به معادله‌ی ۲-۳ می‌دانیم که v_{avg} برای کل مسافت، از نسبت جابه‌جایی 10.4 km مربوط به کل مسافت به بازه‌ی زمانی 0.62 h مربوط به کل مسافت به دست می‌آید.

محاسبه: در اینجا، داریم

$$v_{avg} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{10.4 \text{ km}}{0.62 \text{ h}} \Rightarrow$$

$$v_{avg} = 16.8 \text{ km/h} \approx 17 \text{ km/h} \quad (\text{پاسخ})$$

۲-۲ سرعت لحظه‌ای و تندی لحظه‌ای

نکته‌های کلیدی

- سرعت لحظه‌ای (یا به بیان ساده سرعت) v یک ذره‌ی در حال حرکت برابر است با
- سرعت لحظه‌ای (در یک زمان خاص) را می‌توان به صورت شیب (در آن زمان خاص) نمودار x برحسب t پیدا کرد.
- تندی، بزرگی سرعت لحظه‌ای است.

سرعت لحظه‌ای و تندی لحظه‌ای

تا اینجا دو راه برای توصیف سرعت حرکت یک جسم بیان کردیم: سرعت متوسط و تندی متوسط، که هر دو در طی یک بازه‌ی زمانی Δt اندازه‌گیری می‌شوند. اما عبارت «چگونه تند رفتن» بیشتر به اینکه یک ذره در یک لحظه‌ی معین چه سرعتی دارد اتلاق می‌شود - و آن **سرعت لحظه‌ای** v (یا به بیان ساده **سرعت**) یک ذره است.

سرعت در هر لحظه، از سرعت متوسط با کوتاه‌تر کردن بازه‌ی زمانی Δt و رفته رفته نزدیک شدن به صفر به دست می‌آید. به تدریج که Δt کوچک‌تر می‌شود سرعت لحظه‌ای به سمت یک مقدار حدی میل می‌کند، که سرعت در آن لحظه است:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (۴-۲)$$

توجه کنید که v آهنگ تغییر مکان ذره x ، برحسب زمان، در یک لحظه‌ی معین است؛ یعنی v مشتق x نسبت به t است. هم‌چنین، توجه کنید که v در هر لحظه برابر با شیب منحنی مکان - زمان ذره در نقطه‌ی مربوط به آن لحظه است. سرعت نیز کمیتی برداری است و بنابراین دارای یک جهت وابسته است.

تندی، بزرگی سرعت است؛ یعنی تندی، سرعتی است که جهتش هیچ‌گونه نشانی چه به صورت بیانی و چه به صورت علامت جبری ندارد. (**هشدار:** تندی می‌تواند کاملاً با تندی متوسط متفاوت باشد). سرعت $+5 \text{ m/s}$ و سرعت -5 m/s هر دو دارای تندی 5 m/s هستند. تندی سنج خودرو تندی را اندازه می‌گیرد نه سرعت را (این وسیله نمی‌تواند جهت را مشخص کند).



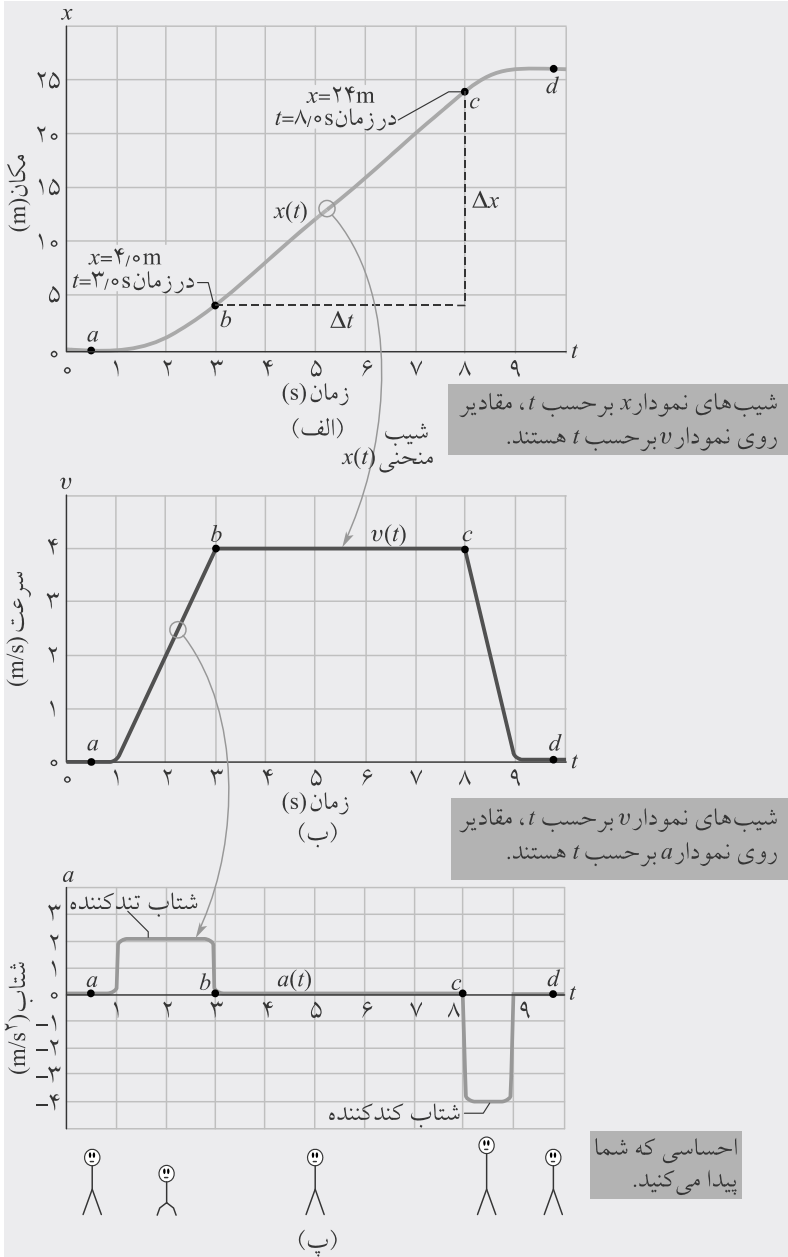
مسئله‌ی نمونه‌ی ۲-۲ سرعت و شیب x برحسب t

نکته‌ی کلیدی

در هر لحظه از روی شیب منحنی $x(t)$ می‌توان سرعت در آن لحظه را پیدا کرد.

شکل ۲-۶ الف نمودار $x(t)$ مربوط به یک آسانسور را نشان می‌دهد که در آغاز ساکن است، سپس، آسانسور به سمت بالا (که آن را جهت مثبت محور x اختیار می‌کنیم) حرکت می‌کند و آنگاه، متوقف می‌شود. نمودار $v(t)$ را رسم کنید.

شکل ۲-۶ (الف) منحنی تابع $x(t)$ مربوط به آسانسور که در راستای محور x به سمت بالا حرکت می‌کند. (ب) منحنی تابع $v(t)$ مربوط به آسانسور. توجه کنید که این منحنی مشتق منحنی $x(t)$ است ($v = dx/dt$). (پ) منحنی تابع $a(t)$ مربوط به آسانسور. این منحنی مشتق منحنی $v(t)$ است ($a = dv/dt$). آدمک‌های پایین منحنی شتاب، احساسی را که مسافر آسانسور در حین تغییر کردن شتاب ممکن است پیدا کند، نشان می‌دهند.



این، هم‌چنان که آسانسور شروع به حرکت می‌کند و سپس سرعتش کم می‌شود تا متوقف شود، v مطابق شکل، در بازه‌های ۱s تا ۳s و ۸s تا ۹s، تغییر می‌کند. بنابراین، شکل ۲-۶ ب، همان نمودار مورد نظر را نشان می‌دهد. (توصیف شکل ۲-۶ پ، در پودمان ۲-۳ خواهد آمد).

اگر نمودار تابع $v(t)$ ، مطابق شکل ۲-۶ ب، در دست باشد، می‌توان «وارون عمل کرد» و شکل نمودار $x(t)$ مربوط به آن را (به صورت شکل ۲-۶ الف) به دست آورد. اما واضح است که مقادیر واقعی x در زمان‌های مختلف را نمی‌دانیم، زیرا نمودار

محاسبات: شیب $x(t)$ ، و در نتیجه سرعت، در بازه‌های زمانی صفر تا ۱s و از ۹s به بعد، صفر و در نتیجه آسانسور ساکن است. در طول بازه‌ی bc ، شیب منحنی ثابت و غیرصفر است. در نتیجه، آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند. بنابراین، شیب منحنی $x(t)$ چنین محاسبه می‌شود

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v = \frac{24\text{ m} - 4.0\text{ m}}{8.0\text{ s} - 3.0\text{ s}} = +4.0\text{ m/s} \quad (2-5)$$

علامت مثبت نشان می‌دهد که آسانسور در جهت مثبت محور x حرکت می‌کند. منحنی‌های مربوط به بازه‌های ذکر شده (که در آن $v = 0$ و $v = 4\text{ m/s}$) در شکل ۲-۶ ب، رسم شده‌اند. علاوه بر

(این مساحت مثبت است، زیرا منحنی $v(t)$ در بالای محور t قرار دارد). شکل ۶-۲ الف، نشان می‌دهد که x در این بازه‌ی زمانی به اندازه‌ی ۲۰ m افزایش یافته است. اما شکل ۶-۲ ب، در مورد **مقادیر** x در ابتدا و انتهای بازه‌ی زمانی به ما اطلاعاتی نمی‌دهد. به همین جهت به اطلاعات دیگری، مانند مقدار x در برخی لحظه‌های معین، نیازمندیم.



$v(t)$ فقط **تغییرات** x را نشان می‌دهد. برای پیدا کردن تغییر x در هر بازه‌ی زمانی به زبان ریاضی باید مساحت «زیر منحنی» نمودار $v(t)$ در آن بازه را حساب کرد. برای مثال، در طول بازه‌ی ۳ s تا ۸ s ، که سرعت آسانسور $۴/۰\text{ m/s}$ است، مقدار تغییر x برابر است با

$$\Delta x = (۴/۰\text{ m/s})(۸/۰\text{ s} - ۳/۰\text{ s}) = +۲۰\text{ m} \quad (۶-۲)$$

۳-۲ شتاب

نکته‌های کلیدی

• شتاب متوسط برابر با نسبت تغییر سرعت Δv ، به بازه‌ی زمانی مربوط به ایجاد این تغییر Δt ، است:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$a_{\text{avg}} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

علامت جبری، جهت a_{avg} را نشان می‌دهد.

• در روی نمودار v برحسب t ، شتاب a در هر زمان t ، برابر با شیب منحنی در نقطه‌ای است که t را نشان می‌دهد.

• شتاب لحظه‌ای (یا به بیان ساده شتاب) a ، برابر با مشتق زمانی

شتاب

وقتی سرعت یک ذره تغییر می‌کند، می‌گویید ذره دارای **شتاب** شده است (یا ذره شتاب گرفته است). برای حرکت در راستای یک محور، **شتاب متوسط** a_{avg} ، در بازه‌ی زمانی Δt برابر است با

$$a_{\text{avg}} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (۷-۲)$$

که در آن ذره در زمان t_1 دارای سرعت v_1 و در زمان t_2 دارای سرعت v_2 است. **شتاب لحظه‌ای** (یا به بیان ساده **شتاب**) برابر است با

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (۸-۲)$$

از لحاظ ریاضی، شتاب یک ذره در هر لحظه برابر با آهنگ تغییر سرعت در آن لحظه است. از نظر ترسیمی شتاب در هر نقطه برابر با شیب منحنی $v(t)$ در آن نقطه است. از ترکیب معادله‌ی ۸-۲ با معادله‌ی ۴-۲ می‌توان نوشت

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (۹-۲)$$

بنابراین از لحاظ ریاضی، شتاب یک ذره در هر لحظه مشتق دوم تابع مکان $x(t)$ نسبت به زمان است.