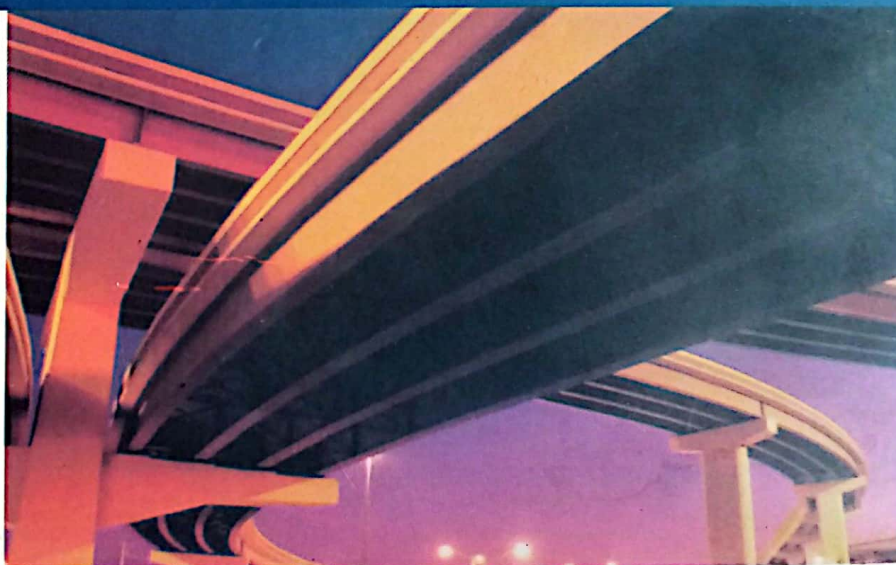


فردیناند پی. بی.یر ■ ای. راسل جانستون

مکانیک برداری برای مهندسان - جلد ۱

استاتیک

ویراست هشتم



ترجمه

دکتر ابراهیم واحدیان

فهرست نمادها

کویل؛ گشتاور	M	شتاب	$a, \ddot{a}$
گشتاور حول نقطه O	M_O	مقدار ثابت؛ شعاع؛ فاصله	a
گشتاور برابند حول نقطه O	M_O^R	شتاب مرکز جرمی	$\ddot{a}, \ddot{\bar{a}}$
بزرگی کویل یا گشتاور؛ جرم زمین	M	شتاب B نسبت به چارچوب در انتقال به A	$a_{B/A}$
گشتاور حول محور OL	M_{OL}	شتاب P نسبت به چارچوب $\mathcal{F}$	$a_{P/\mathcal{F}}$
راستای قائم	n	شتاب کوریولیس	a_c
مؤلفه قائم عکس‌العمل	N	عکس‌العمل در تکیه‌گاه‌ها و اتصالها	$\dots, C, B, A$
مبدأ مختصات	O	نقاط	$\dots, C, B, A$
فشار	p	سطح	A
نیرو؛ بردار	P	پهنای، فاصله	b
آهنگ تغییر بردار P نسبت به چارچوب مختصات ثابت	$\dot{P}$	ثابت؛ ضریب میرایی گرانرو	c
آهنگ جرمی جریان؛ تغییر الکتریکی	q	مرکز هندسی	C
نیرو؛ بردار	Q	فاصله	d
آهنگ تغییر بردار Q نسبت به چارچوب مختصات ثابت	$\dot{Q}$	بردارهای یک‌ه در امتداد قائم	e_t, e_n
آهنگ تغییر بردار Q نسبت به چارچوب Q_{xyz}	$(\dot{Q})_{O_{xyz}}$	بردارهای یک‌ه در شعاع و جهت‌های معکوس	e_θ, e_r
بردار مکان	r	ضریب مقاومت؛ پایه لگاریتم طبیعی	e
بردار مکان B نسبت به A	$r_{B/A}$	انرژی مکانیکی کل	E
شعاع؛ فاصله؛ مختصه قطبی	r	تابع اسکالر	f
نیروی برابند؛ بردار برابند؛ عکس‌العمل	R	بسامد ارتعاش واداشته	f_f
شعاع زمین	R	بسامد طبیعی	f_n
بردار مکان	s	نیرو؛ نیروی اصطکاک	F
طول کمان؛ طول کابل	s	شتاب گرانی	g
نیرو، بردار	S	مرکز گرانی؛ مرکز جرمی؛ ثابت گرانش	G
زمان، ضخامت	t	ارتفاع؛ شکم دادگی کابل؛ گشتاور زاویه‌ای در هر واحد جرم	h
نیرو	T	اندازه حرکت زاویه‌ای حول نقطه O	H_O
کشش	T	آهنگ تغییر گشتاور زاویه‌ای H_G نسبت به چارچوب مختصات ثابت	$\dot{H}_G$
سرعت	u	آهنگ تغییر اندازه حرکت‌های زاویه‌ای نسبت به چارچوب چرخش G_{xyz}	$(\dot{H}_G)_{G_{xyz}}$
تغییر	u	بردارهای یک‌ه در امتداد محورهای مختصات	k, j, i
کار	U	جریان	i
سرعت	$v, \mathbf{v}$	گشتاور لختی	$\dots, I_z, I$
تندی	v	گشتاور لختی مرکز هندسی	$\bar{I}$
سرعت مرکز جرمی	$\bar{v}, \bar{\mathbf{v}}$	حاصلضرب‌های لختی	$\dots, \bar{I}_{xy}$
سرعت B نسبت به چارچوب انتقال به A	$\mathbf{v}_{B/A}$	گشتاور لختی قطبی	J
سرعت P نسبت به چارچوب چرخش $\mathcal{F}$	$\mathbf{v}_{P/\mathcal{F}}$	ثابت فتر	k
حاصلضرب برداری نیروهای برشی	$\mathbf{V}$	شعاع چرخش	k_O, k_y, k_z
حجم؛ انرژی پتانسیل، برش	V	شعاع چرخش مرکز سطحی	$\bar{k}$
بار بر واحد طول	w	طول	l
وزن؛ بار	$W, \mathbf{W}$	اندازه حرکت خطی	L
مختصات قائم؛ فاصله‌ها	z, y, x	طول، دهانه	L
مشتق‌های زمان مختصات z, y, x	$\dot{z}, \dot{y}, \dot{x}$	جرم	m
مختصات قائم مرکز هندسی، مرکز گرانی، یا مرکز جرمی	$\ddot{z}, \ddot{y}, \ddot{x}$	جرم در هر واحد طول	m'

چگالی؛ شعاع انحنای
 زمان دوره‌ای، زمان تناوبی
 دوره ارتعاش آزاد
 زاویه اصطکاک؛ زاویه اولری؛ زاویه فاز؛ زاویه
 اختلاف فاز
 زاویه اولری
 سرعت زاویه‌ای
 بسامد دایره‌ای ارتعاش واداشته
 بسامد دایره‌ای طبیعی
 سرعت زاویه‌ای چارچوب مرجع

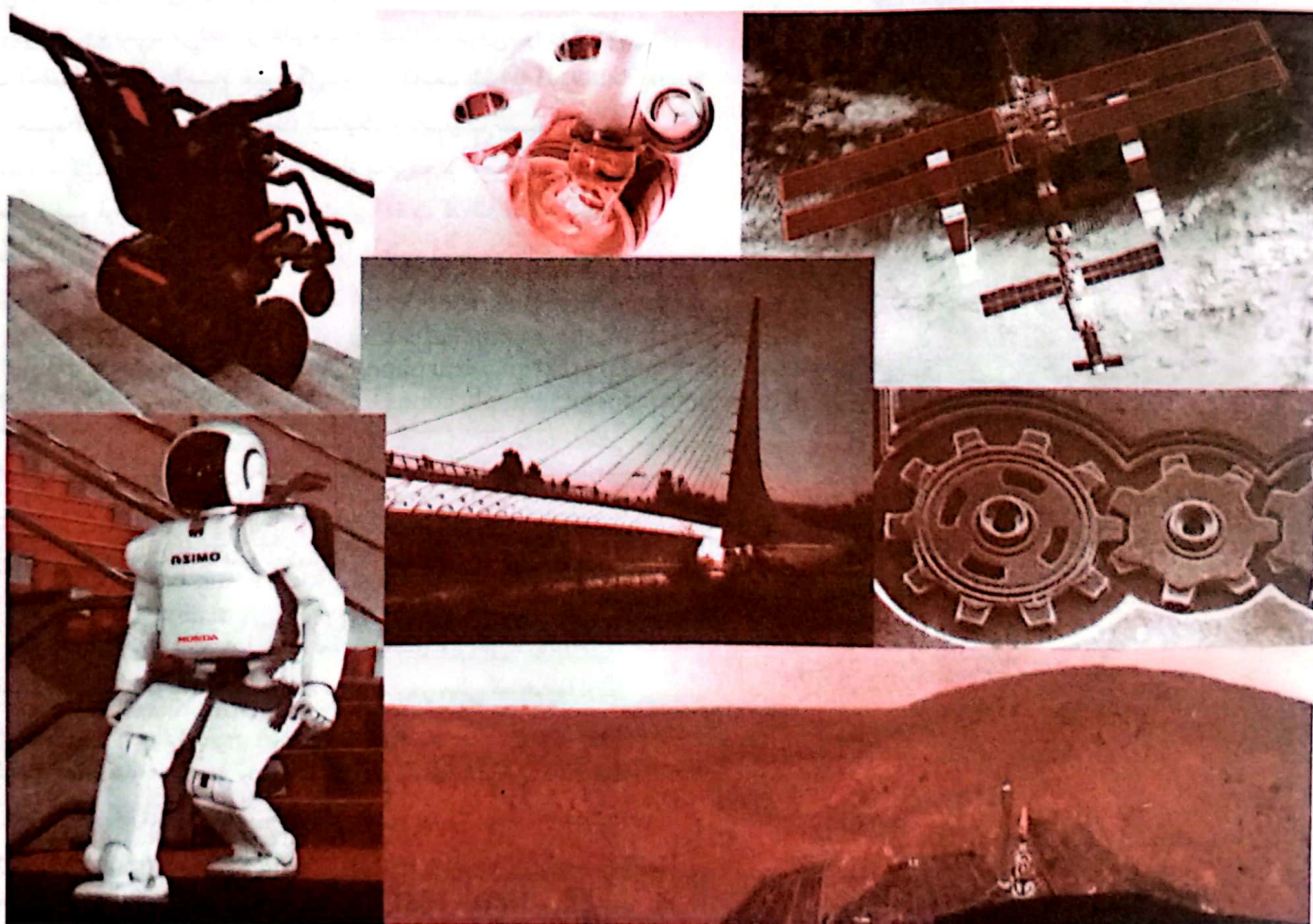
ρ
 τ
 τ_n
 ϕ
 φ
 ψ
 ω, ω
 ω_f
 ω_n
 Ω

شتاب زاویه‌ای
 زاویه‌ها
 وزن مخصوص
 افزایش طول، کشیدگی، کشش
 جابه‌جایی مجازی
 کار مجازی
 خارج از مرکز مقطع مخروطی یا مدار
 بردار واحد در امتداد یک خط
 بازده
 مختصه زاویه‌ای، زاویه اولری؛ زاویه؛ مختصه قطبی
 ضریب اصطکاک

α, α
 γ, β, α
 γ
 δ
 δr
 δU
 ϵ
 λ
 η
 θ
 μ

فصل ۱

مقدمه



اصول اولیه مکانیک، که به صورت فرمول‌بندی توسط نیوتون، در اواخر قرن ۱۷، پایه‌گذاری شد، برای بسیاری از مهندسان امروزی قابل استفاده است. طراحی و تحلیل تقریباً همه ابزارهای و سیستمهای لازم از دانش این اصول اولیه است.

تبدیل یک سیستم یکاها به سیستم دیگر	۴.۱
روش حل مسئله	۵.۱
دقت عددی	۶.۱

۱.۱ مکانیک چیست؟	۱.۱
۲.۱ مفاهیم و اصول بنیادی	۲.۱
۳.۱ سیستم یکاها	۳.۱



عکس ۱.۱ سیر ایزاک نیوتون.

۱.۱ مکانیک چیست؟

مکانیک را می‌شود به عنوان علمی تعریف کرد که شرایط سکون یا حرکت اجسام تحت تأثیر نیروها را پیش‌بینی و توصیف می‌کند. این علم به سه قسمت تقسیم می‌شود: مکانیک اجسام صلب (جامد)، مکانیک اجسام تغییرشکل‌پذیر، و مکانیک شاره‌ها (سیالات). مکانیک اجسام صلب خود به دو قسمت استاتیک و دینامیک تقسیم می‌شود، که اولی با اجسام ساکن سروکار دارد و دومی با اجسام متحرک. در مطالعه این مبحث اجسام را کاملاً صلب فرض می‌کنیم. اما واقعیت این است که سازه‌ها و ماشین‌ها هیچ‌وقت به‌طور کامل صلب نیستند و در عمل بر اثر بارهایی که به آنها وارد می‌شود تغییر شکل پیدا می‌کنند. اما این تغییر شکلهای معمولاً کوچک‌اند و اثر قابل ملاحظه‌ای روی شرایط تعادل یا حرکت سازه موردنظر نمی‌گذارند. با این حال وقتی از مقاومت سازه در برابر شکست صحبت می‌کنیم این تغییر شکلهای اهمیت پیدا می‌کنند و در مطالعه مبحث مقاومت مصالح (که بخشی از مکانیک اجسام تغییر شکل‌پذیر را تشکیل می‌دهد) بررسی می‌شوند. سومین بخش مکانیک، که موسوم به مکانیک شاره‌ها (سیالات) است خود به دو مبحث شاره‌های تراکم‌پذیر و شاره‌های تراکم‌ناپذیر تقسیم می‌شود. بخش مهمی از مبحث شاره‌های تراکم‌ناپذیر را هیدرولیک تشکیل می‌دهد، که با مایعات سروکار دارد.

مکانیک یک علم فیزیکی است، زیرا با مطالعه پدیده‌های فیزیکی سروکار دارد. به هر حال بعضیها مکانیک را مربوط به ریاضیات می‌دانند، در حالی که خلیها از آن به عنوان یک موضوع مهندسی یاد می‌کنند. هر دو دیدگاه در این بخش تا حدودی موجه است. مکانیک پایه اغلب علوم مهندسی و پیش‌نیاز گریزناپذیر مطالعه آنهاست. با وجود این، مکانیک فاقد آن تجربه‌گری است که در بعضی از علوم مهندسی وجود دارد، یعنی، فقط متکی به تجربه یا مشاهده نیست؛ مکانیک به خاطر دقت و تأکیدی که بر استدلال استقرایی دارد به ریاضیات شبیه است. اما، بازهم گفته باشیم که، مکانیک یک علم انتزاعی یا حتی یک علم محض نیست، بلکه یک علم کاربردی است. هدف مکانیک تبیین و پیش‌بینی پدیده‌های فیزیکی و در نتیجه پی‌ریزی کاربردهای مهندسی است.

۲.۱ مفاهیم و اصول بنیادی

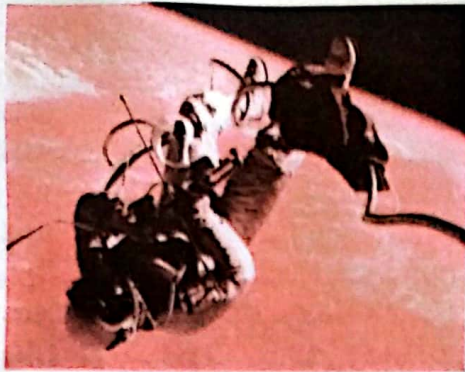
اگرچه مطالعه مکانیک به زمان ارسطو (۳۸۴ تا ۳۲۲ ق. م.) و ارشمیدس (۲۸۷ تا ۲۱۲ ق. م.) برمی‌گردد، اما قرن‌ها طول کشید تا نیوتون (۱۶۴۲-۱۷۲۷) اصول بنیادی آن را به نحو رضایتبخشی فرمولبندی کرد. این اصول را بعدها دالامبر، لاگرانژ، و هامیلتون به صورت اصلاح‌شده بیان کردند. با این همه، اعتبار آنها همچنان به قوت خود باقی

بود تا اینکه اینشتین نظریه نسبیت خود را فرمولبندی کرد (۱۹۰۵). با آنکه محدودیت کاربرد فرمولهای نیوتون حالا کاملاً محرز شده است اما مکانیک نیوتونی هنوز هم مبنا علوم مهندسی امروزی است.

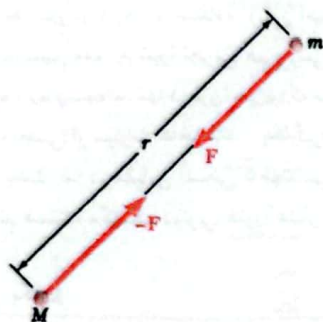
مفاهیم بنیادی‌ای که در مکانیک به کار برده می‌شوند عبارت‌اند از فضا، زمان، جرم، و نیرو. این مفاهیم را نمی‌توان حقیقتاً تعریف کرد؛ آنها را باید بر مبنای شهر و تجربه پذیرفت و به عنوان یک چارچوب مرجع برای مطالعه مکانیک به کار برد. مفهوم فضا به تصور مکان نقطه‌ای مثل P مربوط می‌شود. مکان P را می‌توان با سه اندازه طول تعریف کرد که از یک نقطه مرجع، یا مبدأ، در سه راستای معین اندازه‌گیری می‌شوند. این طولها را مختصات نقطه P می‌شناسیم. برای تعریف یک رویداد، تنها ذکر مکان وقوع در آن فضا کافی نیست. زمان و فضا آن نیز باید مشخص شود.

از مفهوم جرم برای مشخص کردن و مقایسه اجسام بر مبنای آزمایشهای بنیادی مکانیکی استفاده می‌شود. مثلاً، دو جسم هم جرم (هر دو) یک‌جور جذب زمین می‌شوند البته مقاومت آنها نیز در برابر تغییر حرکت انتقالی یکسان است.

نیرو نمایانگر تأثیری است که یک جسم بر روی جسم دیگر می‌گذارد. نیرو ممکن است عملاً از راه تماس یا مثل نیروهای گرانشی و نیروهای مغناطیسی، از راه دور اعمال شود. یک نیرو با نقطه اثر، بزرگی و راستا (جهت) مشخص می‌شود، نیرو را با یک بردار نشان می‌دهند (بخش ۳.۲).



عکس ۲.۱ وقتی در مدار زمین به اشخاص و اشیایی برمی‌خوریم که آنها را «در حالت بی‌وزنی» می‌گویند، حتی اثر نیروی گرانشی وارد حدود ۹۰٪ تجربه روی سطح زمین است. دلیل این محدودیت در فصل ۱۲ (جلد دوم) وقتی قانون دوم نیوتون درباره حرکت ذره مادی به‌کار می‌رود، ثابت خواهد شد.



شکل ۱.۱

قانون گرانش نیوتون اندیشه کنش از راه دور را مطرح می‌کند و دامنه کاربرد قانون سوم نیوتون را گسترش می‌دهد: می‌بینید که نیروی F و عکس‌العمل آن $-F$ در شکل ۱.۱ مساوی و مختلف‌الجهت‌اند، و خط اثرشان هم یکی است.

یک مورد خاص و بسیار مهم این قانون، مورد جاذبه زمین بر روی یک ذره واقع بر سطح آن، است. در این مورد نیروی F را که زمین به ذره وارد می‌کند، به‌عنوان وزن آن (W) تعریف می‌کنند. اگر M را مساوی جرم زمین، m را مساوی جرم ذره، و r را مساوی شعاع زمین (R) بگیریم، و ثابت

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (3.1)$$

را وارد کنیم مقدار وزن (W) یک ذره به جرم m را می‌شود به این صورت بیان کرد

$$W = mg \quad (4.1)$$

البته، مقدار R در رابطه (۳.۱) به ارتفاع نقطه مورد نظر، و همچنین به عرض جغرافیایی آن بستگی دارد، زیرا زمین کاملاً کروی نیست. بنابراین، مقدار g با تغییر مکان ذره مورد نظر تغییر می‌کند. اما تا وقتی که نقطه عملاً بر روی سطح زمین باقی بماند، اغلب محاسبات مهندسی را می‌شود با فرض g برابر با 9.81 m/s^2 یا 32.2 ft/s^2 ، با دقت کافی انجام داد.

اصولی را که تا اینجا فهرست‌وار عنوان کردیم، هر جا در جریان مطالعه مکانیک لازم باشد معرفی خواهیم کرد. مطالعه استاتیک ذره‌ها که در فصل ۲ انجام می‌شود مبتنی بر قانون جمع متوازی‌الاضلاع و قانون اول نیوتون به تنهایی است. اصل انتقال‌پذیری (جابه‌جایی) در فصل ۳ و در آغاز مطالعه استاتیک اجسام صلب بیان می‌شود، و قانون

۱. در تعریف دقیق‌تر وزن (W) باید چرخش زمین را هم به حساب بیاوریم.

در مکانیک نیوتونی، فضا، زمان، و جرم سه مفهوم مطلق و مستقل از هم هستند (اما در مکانیک نسبیتی این‌طور نیست). به‌طوری‌که زمان وقوع یک رویداد بستگی به مکان آن دارد، و جرم جسم هم با سرعت آن تغییر می‌کند. اما از طرف دیگر، مفهوم نیرو مستقل از سه مفهوم دیگر نیست. در واقع، یکی از اصول اساسی مکانیک نیوتونی که در ادامه مطلب بیان می‌کنیم حاکی از این است که برآیند نیروهای وارد بر یک جسم بستگی به جرم جسم و نحوه تغییرات سرعت آن در زمان دارد.

در اینجا شرایط سکون یا حرکت ذره‌ها و اجسام صلب را برحسب چهار مفهوم بنیادی‌ای که معرفی شد، مطالعه خواهیم کرد. وقتی می‌گوییم ذره مقصودمان مقدار بسیار اندکی از ماده است که می‌شود فرض کرد نقطه‌ای را در فضا اشغال کرده است. جسم صلب هم مجموعه تعداد زیادی از این ذره‌هاست که مکان هر کدام نسبت به دیگری ثابت است. واضح است که مطالعه مکانیک اجسام صلب مستلزم آگاهی از مکانیک ذره‌هاست. به‌علاوه، نتایجی را که برای ذره به‌دست می‌آید می‌شود مستقیماً در بسیاری از مسئله‌ها که با شرایط سکون یا حرکت اجسام واقعی سروکار دارند، به‌کار برد. مطالعه مکانیک مقدماتی متکی بر شش اصل بنیادی است که همه مبنای تجربی دارند.

قانون متوازی‌الاضلاع برای جمع‌بستن نیروها. بنا به این قانون می‌شود به‌جای دو نیرویی که به یک ذره اثر می‌کنند، یک تک‌نیرو به‌نام برآیند قرار داد که از رسم قطر متوازی‌الاضلاعی به‌دست می‌آید که دو ضلع مجاورش همان دو نیروی معلوم‌اند (بخش ۲.۲).

صل انتقال‌پذیری. بنا به این اصل، اگر نیروی وارد بر نقطه معلومی از یک جسم صلب را به‌وسیله نیروی دیگری که با نیروی اول از لحاظ مقدار و جهت برابر، ولی نقطه اثر آن متفاوت است جایگزین کنند، وضعیت تعادل یا حرکت جسم تغییر نخواهد کرد، به شرط آنکه دو نیرو دارای یک خط اثر باشند (بخش ۳.۳).

سه قانون بنیادی نیوتون. این قانونها را که سیر ایزاک نیوتون در نیمه دوم قرن هفدهم فرمولبندی کرد می‌شود به‌صورت زیر بیان کرد:

قانون اول. اگر برآیند نیروهایی که به یک ذره وارد می‌شوند صفر باشد، ذره در حالت سکون می‌ماند (در ابتدا در سکون) یا اگر با سرعت ثابت بر روی خط مستقیم در حرکت باشد (در ابتدا در حرکت) (بخش ۱۰.۲).

قانون دوم. اگر برآیند نیروهایی که به یک ذره وارد می‌شوند صفر نباشد، ذره در امتداد این برآیند و متناسب با بزرگی آن شتاب می‌گیرد.

همان‌طور که در بخش ۲.۱۲ خواهیم دید، این قانون را می‌شود به‌صورت زیر بیان کرد

$$F = ma \quad (1.1)$$

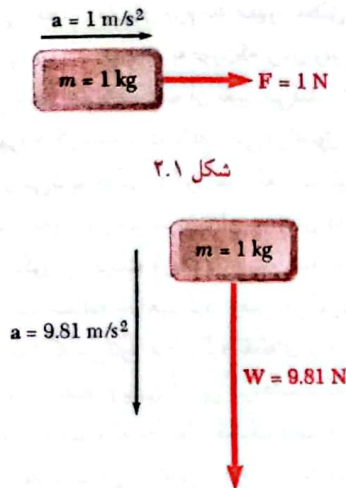
که در آن F ، m و a به‌ترتیب نشان‌دهنده برآیند نیروهای وارد بر ذره، جرم ذره، و شتاب ذره‌اند که با سیستم یکاهای سازگار بیان می‌شوند.

قانون سوم. نیروهای عمل و عکس‌العمل میان دو جسم که با هم تماس دارند هم‌اندازه‌اند، در یک امتدادند و در خلاف جهت هم اثر می‌کنند (بخش ۱.۶).

قانون گرانش نیوتون. این قانون می‌گوید که دو ذره به جرمهای M و m یکدیگر را با نیروهای مساوی و مختلف‌الجهت (F و $-F$) جذب می‌کنند (شکل ۱.۱). بزرگی این نیرو (F) از فرمول زیر به‌دست می‌آید

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2.1)$$

که در آن r فاصله بین دو ذره، و G ثابت عمومی یا ثابت گرانش است.



شکل ۲.۱

شکل ۳.۱

سوم نیوتون، در فصل ۶، در آغاز تحلیل نیروهایی که اعضای مختلف تشکیل دهنده یک سازه به هم وارد می‌کنند، معرفی خواهد شد. قانون دوم و قانون گرانش نیوتون را در کتاب دینامیک (ج ۲) مطرح خواهیم کرد. در آنجا نشان خواهیم داد که قانون اول نیوتون حالت خاصی از قانون دوم است (بخش ۲.۱۲ کتاب دینامیک) و اصل قابلیت انتقال را می‌شود از اصول دیگر به دست آورد و بنابراین حذف کرد (بخش ۵.۱۶ کتاب دینامیک). اما فعلاً قانونهای اول و سوم نیوتون، قانون جمع متوازی الاضلاع و اصل انتقال پذیری مبنای لازم و کافی برای مطالعه استاتیک ذره‌ها، اجسام صلب، و سیستمهای متشکل از اجسام صلب را فراهم می‌کنند.

همان‌طور که قبلاً گفتیم، شش اصل بنیادی بالا مبتنی بر شواهد تجربی‌اند. به‌استثنای قانون اول نیوتون و اصل انتقال پذیری، که این اصول مستقل‌اند و نمی‌شود آنها را با عملیات ریاضی از هم، یا از هر اصل فیزیکی مقدماتی دیگر به دست آورد. بخش عمده ساختار مکانیک نیوتونی مبتنی بر همین اصول شش‌گانه است. بیش از دو قرن است که مسئله‌های بی‌شماری که با شرایط سکون و حرکت اجسام صلب، و اجسام تغییرشکل‌پذیر و شاره‌ها سروکار دارند، با استفاده از این اصول بنیادی حل شده‌اند. بسیاری از جوابهای به دست آمده، به شیوه تجربی هم واریسی شده‌اند، و به این ترتیب اصول یادشده باز هم به تأیید رسیده‌اند. تنها در قرن اخیر بود که مکانیک نیوتونی در بررسی حرکت اتمها و حرکت بعضی از سیارات عاجز ماند و به‌کارگیری نظریه نسبیت به عنوان یک مکمل ضرورت یافت. اما در مقیاس انسانی یا مهندسی، که سرعتها در مقایسه با سرعت نور بسیار کم هستند، مکانیک نیوتونی هنوز اعتبار خود را حفظ کرده است.

۳.۱ سیستمهای یکاها

به چهار مفهوم بنیادی که در بخش قبل معرفی کردیم، یعنی یکاهای طول، زمان، جرم، و اصطلاحاً یکاهای حرکتی می‌گویند. اگر قرار باشد که این یکاها در معادله (۱.۱) صدق کنند، آنها را نمی‌توان به‌طور مستقل از هم انتخاب کرد. سه تا از این یکاها را می‌توان به دلخواه تعریف کرد؛ آنها را یکاهای اصلی می‌گویند. اما چهارمین یکا را باید مطابق با معادله (۱.۱) انتخاب کرد که آن را یکای فرعی می‌نامند. در این صورت اصطلاحاً می‌گوییم که یکاهای حرکتی انتخاب شده سیستم یکاهای سازگار تشکیل می‌دهند.

سیستم بین‌المللی یکاها (یکاهای SI)*. در این سیستم یکاهای اصلی، یکاهای طول، جرم، و زمان هستند که آنها را به ترتیب متر (m)، کیلوگرم (kg)، و ثانیه (s) می‌نامند. هر سه این یکاها به دلخواه تعریف می‌شوند. ثانیه که قبلاً ۱/۸۶۴۰۰ متوسط روز خورشیدی اختیار شده بود، امروزه به صورت مدتی برابر با ۹۱۹۲۶۳۱۷۷۰ دوره تناوب تابش متناظر با گذار میان دو تراز حالت پایه اتم سزیم ۱۳۳ تعریف می‌شود. متر که ابتدا یک ده میلیونم فاصله خط استوا تا قطب شمال تعریف شده بود فعلاً برابر ۱۶۵۰۷۶۳۷۲۳ طول موج نارنجی — سرخ متناظر با گذار آشکار در یک اتم کریپتن — ۸۶ تعریف می‌شود. کیلوگرم — که تقریباً برابر با جرم ۰/۰۰۱ m³ آب است — طبق تعریف جرم یک استوانه استاندارد از جنس پلاتین-ایریدیم در نظر گرفته می‌شود که آن را در اداره بین‌المللی اوزان و مقیاسها در سور نزدیک پاریس، در فرانسه نگه می‌دارند. یکای نیرو در این سیستم یک یکای فرعی است. به این یکا نیوتون (N) می‌گویند و یک نیوتون بنا به تعریف نیرویی است که به یک جرم یک کیلوگرمی شتابی برابر با ۱ m/s² بدهد (شکل ۲.۱). از رابطه (۱.۱) می‌توانیم بنویسیم

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg})(1 \text{ m/s}^2) = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (5.1)$$

اصطلاحاً می‌گوییم که سیستم یکاهای SI تشکیل یک سیستم مطلق را می‌دهد. بدین معنی که سه یکای اصلی انتخاب شده مستقل از موقعیت محل اندازه‌گیری‌اند. متر، و

* SI مربوط به Systeme International d'Unités (فرانسوی) است.

کیلوگرم، و ثانیه را می‌شود در هر نقطه‌ای از زمین و یا حتی در سایر کرات هم به‌کار برد و این یکاها همواره و در همه جا مفهوم واحدی دارند.

وزن یک جسم، یا نیروی گرانی وارد بر یک جسم، را (مثل هر نیروی دیگری) می‌شود برحسب نیوتون بیان کرد. از رابطه (۴.۱) نتیجه می‌شود که وزن جسمی به جرم ۱ kg (شکل ۳.۱) برابر است با

$$\begin{aligned} W &= mg \\ &= (1 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) \\ &= 9.81 \text{ N} \end{aligned}$$

اضعاف و اجزای یکاهای اصلی SI را می‌توان با استفاده از پیشوندهای تعریف شده در جدول ۱.۱ به دست آورد. اضعاف و اجزای یکاهای طول، جرم، و نیرو که اغلب در مهندسی از آنها استفاده می‌کنند به ترتیب عبارت‌اند از: کیلومتر (km) و میلیمتر (mm)؛ مگاگرم (Mg) و گرم (g)؛ و کیلو نیوتون (kN). طبق جدول ۱.۱ داریم

$$\begin{aligned} 1 \text{ km} &= 1000 \text{ m} & 1 \text{ mm} &= 0.001 \text{ m} \\ 1 \text{ Mg} &= 1000 \text{ kg} & 1 \text{ g} &= 0.001 \text{ kg} \\ 1 \text{ kN} &= 1000 \text{ N} \end{aligned}$$

برای تبدیل این یکاها (به ترتیب) به متر، کیلوگرم، و نیوتون، تنها کاری که باید بکنیم این است که ممیز اعشار را سه رقم به طرف راست یا سه رقم به طرف چپ می‌بریم. مثلاً برای تبدیل ۳/۸۲ km به متر، ممیز را سه رقم به طرف راست می‌بریم:

$$3.82 \text{ km} = 3820 \text{ m}$$

همچنین برای تبدیل ۴۷/۲ mm به متر ممیز را سه رقم به سمت چپ می‌بریم

$$47.2 \text{ mm} = 0.0472 \text{ m}$$

تبدیل‌های بالا را با استفاده از نمادگذاری علمی می‌توانیم به این صورت بنویسیم

$$\begin{aligned} 3.82 \text{ km} &= 3.82 \times 10^3 \text{ m} \\ 47.2 \text{ mm} &= 47.2 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

اضعاف یکای زمان دقیقه (min) و ساعت (h) اند. از آنجا که ۶۰ s = ۱ min و ۶۰ min = ۱ h است، اضعاف زمان را نمی‌شود مثل بقیه به راحتی تبدیل کرد.

۱. مگاگرم به تن متریک نیز معروف است.

جدول ۲.۱ یکاهای اصلی SI که در مکانیک به کار می‌روند

فرمول	نماد	یکا	کمیت
m/s^2	...	متر بر مجذور ثانیه	شتاب
rad	...	رادیان	زاویه
rad/s^2	...	رادیان بر مجذور ثانیه	شتاب زاویه‌ای
rad/s	...	رادیان بر ثانیه	سرعت زاویه‌ای
m^2	...	مترمربع	سطح
kg/m^3	...	کیلوگرم بر متر مکعب	چگالی
$N \cdot m$	J	ژول	انرژی
$kg \cdot m/s^2$	N	نیوتون	نیرو
s^{-1}	Hz	هرتز	پسامد
$kg \cdot m/s$	...	نیوتون-ثانیه	ضربه
m	...	متر	طول
kg	...	کیلوگرم	جرم
$N \cdot m$	...	نیوتون-متر	گشتاور نیرو
J/s	W	وات	توان
N/m^2	Pa	پاسکال	فشار
N/m^2	Pa	پاسکال	تنش
s	...	ثانیه	زمان
m/s	...	متر بر ثانیه	سرعت
m^3	...	مترمکعب	جامدات
$10^{-3} m^3$	L	لیتر	مایعات
$N \cdot m$	J	ژول	کار

* یکای مکمل (۱ دور $= 2\pi \text{ rad} = 360^\circ$)

** یکای اصلی

و اجزای یکای حجم عبارت‌اند از

$$1 \text{ dm}^3 = (1 \text{ dm})^3 = (10^{-1} \text{ m})^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ cm}^3 = (1 \text{ cm})^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mm}^3 = (1 \text{ mm})^3 = (10^{-3} \text{ m})^3 = 10^{-9} \text{ m}^3$$

یادتان باشد که در اندازه‌گیری حجم مایعات به دسی‌متر مکعب (dm^3) معمولاً لیتر (L) می‌گویند.

سایر یکاهای فرعی SI را که برای اندازه‌گیری گشتاور نیرو، کارنیرو، و غیره به کار می‌روند در جدول ۲.۱ آورده‌ایم. با آنکه این یکاها را در فصلهای بعدی در مواقع لزوم تعریف خواهیم کرد، اما در اینجا باید یک قاعده مهم را یادآوری کنیم؛ وقتی یک یکای فرعی از تقسیم دویکای اصلی برهم به دست می‌آید در صورت کسر مربوط به یکای فرعی می‌توانیم از پیشوند استفاده کنیم اما در مخرجش نه. مثلاً ثابت k یک فنر را که تحت بار 100 N طولش 20 mm اضافه می‌شود به این صورت می‌نویسیم

$$k = \frac{100 \text{ N}}{20 \text{ mm}} = \frac{100 \text{ N}}{0.020 \text{ m}} = 5000 \text{ N/m}$$

یا

$$k = 5 \text{ kN/m}$$

ولی هیچ‌وقت نمی‌نویسیم $k = 5 \text{ N/mm}$.

یکاهای معمول در سیستم U.S. بیشتر مهندسان آمریکایی هنوز معمولاً از سیستمی که براساس یکاهای اصلی مانند یکاهای طول، نیرو، و زمان است استفاده می‌کنند. این

جدول ۱.۱ پیشوندهای سیستم SI

نماد	پیشوند	مضرب
T	ترا	10^{12}
G	گیگا	10^9
M	مگا	10^6
k	کیلو	10^3
h	هکتو	10^2
da	دکا	10^1
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	فمتو	10^{-15}
a	آتو	10^{-18}

ما به اولین بخش نماد هر پیشوندی تأکید می‌کنیم. به ترتیبی که اولین پیشوند همسانی را حفظ کند. مثلاً در کیلو‌متر پیشوند اولین بخش یعنی کیلو پیشوند تلقی می‌شود، نه دومی. برای همسان کیلو‌متر به کیلوگرم می‌توان اشاره کرد.

باید از به کار بردن این پیشوندها اجتناب کنید، مگر بخواهید سطح یا حجم چیزی را اندازه بگیرید یا در یک کار غیر فنی - مثل اندازه‌گیری ابعاد بدن و لباس - لازم باشد که از سانتیمتر استفاده کنید.

استفاده از اضعاف یا اجزای مناسب یک یکای معلوم مزیتش این است که می‌توانیم از نوشتن عددهای خیلی بزرگ یا خیلی کوچک اجتناب کنیم. به عنوان مثال معمولاً 427200 m را 427.2 km ، و 0.00216 m را 2.16 mm می‌نویسیم^۱.

یکاهای سطح و حجم. یکای سطح مترمربع (m^2) است که نماینده مساحت مربعی است به ضلع 1 m و یکای حجم مترمکعب (m^3) است که برابر با حجم مکعبی است که ضلعش 1 m باشد. برای اجتناب از نوشتن عددهای خیلی بزرگ یا خیلی کوچک موقع محاسبه مساحتها و حجمها، می‌توانیم از سیستمهای واحدهای فرعی‌ای استفاده کنیم که به ترتیب از توانهای دوم و سوم میلی‌متر و دوتا از اضعاف دیگر متر یعنی دسی‌متر (dm) و سانتیمتر (cm) به دست می‌آیند. از آنجا که بنا به تعریف

$$1 \text{ dm} = 0.1 \text{ m} = 10^{-1} \text{ m}$$

$$1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m} = 10^{-2} \text{ m}$$

$$1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m} = 10^{-3} \text{ m}$$

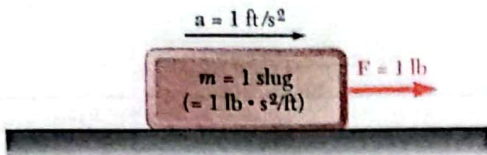
اجزای یکای سطح عبارت‌اند از

$$1 \text{ dm}^2 = (1 \text{ dm})^2 = (10^{-1} \text{ m})^2 = 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ cm}^2 = (1 \text{ cm})^2 = (10^{-2} \text{ m})^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ mm}^2 = (1 \text{ mm})^2 = (10^{-3} \text{ m})^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$$

^۱ باید توجه کنید که برای آشکار کردن کمیتی در یکاهای SI، که در سمت راست یا در سمت چپ علامت اعشار بیش از چهار رقم به کار رود - به عنوان مثال 427200 m یا 0.00216 m - نباید ارقام را در گروههای سه تایی با علامت کاما (,) از هم جدا کرد. زیرا علامت کاما در قرارداد بیشتر کشورها معنی دیگر می‌دهد. بنابراین بهتر است که از قانون فاصله استفاده شود. یعنی نویسیم $427,200 \text{ m}$ یا $0.002,16 \text{ m}$ و بنویسیم 427200 m یا 0.00216 m و بین اعداد 427 و 200 یا 2 و 16 فاصله بگذاریم. (البته به نظر مترجم در ایران کمتر از فاصله استفاده می‌شود. در هر حال بهتر است از کاما استفاده نشود.)



شکل ۵.۱

با مقایسه شکل‌های ۴.۱ و ۵.۱ نتیجه می‌گیریم که جرم اسلاگ ۳۲/۲ برابر بزرگتر از جرم پوند استاندارد است.

درحقیقت در سیستم یکاهای متداول U.S. اجسام به وسیله وزنشان برحسب پوند به جای جرمشان برحسب اسلاگ، برای مبحث استاتیک مناسبتر است، جایی که مقادارهای پی‌درپی با وزنها و نیروهای دیگر و تنها به‌ندرت با جرمها سروکار دارد. با این وجود، در مطالعه دینامیک جایی که نیروها، جرمها، و شتابها درگیر هستند، وقتی وزن، W ، به پوند داده شده باشد، جرم m را به اسلاگ بیان خواهیم کرد. با یادآوری معادله (۴.۱) می‌نویسیم

$$m = \frac{W}{g} \quad (۷.۱)$$

که در آن g شتاب گرانی ($g = ۳۲.۲ \text{ ft/s}^2$) است.

یکی دیگر از یکاهای متداول و دست‌وپاگیر U.S. در مسئله‌های مهندسی، مایل است (mi)، مایل برابر ۵۲۸۰ ft ؛ اینچ (in) برابر $\frac{1}{12} \text{ ft}$ ؛ و کیلوپوند (kip) برابر نیروی ۱۰۰۰ پوندی است. قن اغلب برای نشان‌دادن یک جرم ۲۰۰۰ پوندی به‌کار می‌رود اما، شبیه پوند، باید به اسلاگ در محاسبات مهندسی تبدیل شود. تبدیل یکاها به فوت، پوند و ثانیه کمیتهای بیان شده در دیگر یکاهای معمول در U.S. به‌طور کلی بیشتر مورد لزوم است و مستلزم دقت بیشتری نسبت به عمل متناظر در یکاهای SI است. به‌عنوان مثال، اگر مقدار سرعت داده شده $v = ۳۰ \text{ mi/h}$ باشد باید آن را به ft/s به شکل زیر تبدیل کنیم. نخست می‌نویسیم

$$v = ۳۰ \frac{\text{mi}}{\text{h}}$$

چون می‌خواهیم از یکای مایل خلاص شویم و به‌جای آن از یکای ft استفاده کنیم، باید عضو سمت راست معادله را در عبارتهای $\frac{۵۲۸۰ \text{ ft}}{۱ \text{ mi}}$ و $\frac{۱ \text{ h}}{۳۶۰۰ \text{ s}}$ ضرب کنیم. با این کار تغییری در مقدار سمت راست معادله حاصل نمی‌شود. زیرا ۱ مایل برابر ۵۲۸۰ ft است، یعنی حاصل عبارت $\frac{۵۲۸۰ \text{ ft}}{۱ \text{ mi}}$ برابر ۱ است. از سوی دیگر حاصل عبارت $\frac{۱ \text{ h}}{۳۶۰۰ \text{ s}}$ نیز ۱ است، زیرا ۱ ساعت برابر ۳۶۰۰ ثانیه است. بنابراین می‌بینیم که سمت راست معادله دوبار در ۱ ضرب می‌شود، پس در نتیجه تغییری حاصل نمی‌شود. به این ترتیب رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$v = \left(۳۰ \frac{\text{mi}}{\text{h}} \right) \left(\frac{۵۲۸۰ \text{ ft}}{۱ \text{ mi}} \right) \left(\frac{۱ \text{ h}}{۳۶۰۰ \text{ s}} \right)$$

همان‌گونه که در رابطه بالا می‌بینیم، مایل هم در صورت و هم در مخرج عبارت سمت راست موجود است، به همین ترتیب، h کسر بالا را با حذف مایل در صورت و مخرج و همچنین حذف h در صورت و مخرج ساده می‌کنیم و عبارت زیر را به‌دست می‌آوریم

$$v = ۴۴ \frac{\text{ft}}{\text{s}} = ۴۴ \text{ ft/s}$$

۴.۱ تبدیل یک سیستم از یکاها به سیستم دیگر

بسیاری از موارد، یک مهندس می‌خواهد یک نتیجه عددی به‌دست‌آمده از یکاهای SI را به یکاهای U.S. تبدیل کند، یا برعکس. چون یکای زمان در هر دو سیستم برابر



عکس ۳.۱ یکای جرم تنها یکای اساسی هنوز بر مبنای استاندارد فیزیکی است. روش حرکت در جابه‌جایی استاندارد کار مبنی بر پدیده‌های طبیعی بدون تغییر است.

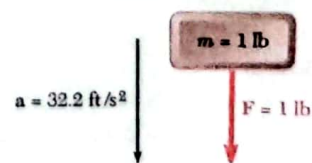
یکاها به‌ترتیب عبارت‌اند از فوت (ft)، پوند (lb)، و ثانیه (s). ثانیه در هر دو دستگاه U.S. و SI (بین‌المللی) یکسان است. فوت برابر ۰.۳۰۴۸ m تعریف شده است. پوند برابر وزنی استاندارد از پلاتین که به‌نام پوند استاندارد نامیده می‌شود و در مؤسسه بین‌المللی استانداردها و تکنولوژی در خارج از واشنگتن نگهداری می‌شود. جرم آن برابر ۰.۴۵۳۵۹۲۴۳ kg است. از آنجا که وزن یک جسم به نیروی گرانشی زمین بستگی دارد که با موقعیت محلی تغییر می‌کند، تصریح شده است که برای تعریف دقیق نیروی ۱ پوندی (۱ lb) باید در سطح دریا و در عرض جغرافیایی ۴۵° قرار داشته باشد. واضح است یکاهای معمول در U.S. تشکیل یک سیستم مطلق یکاها را نمی‌دهد، زیرا این سیستمها به جاذبه گرانشی زمین وابسته‌اند، که آنها سیستم گرانشی یکاها را تشکیل می‌دهند.

در حالی که پوند استاندارد به‌عنوان یکای جرم در معاملات بازرگانی ایالات متحده به‌کار می‌رود، از آن نمی‌توان در محاسبات مکانیک مهندسی استفاده کرد، زیرا چنین یکایی را نمی‌توان به‌عنوان یکاهای پایه در پاراگراف قبل تعریف کرد. درحقیقت، وقتی یک نیروی ۱ پوندی بر جسمی وارد شود، یعنی وقتی جسم در اثر نیروی گرانی قرار گیرد، پوند استاندارد شتاب گرانی $g = ۳۲.۲ \text{ ft/s}^2$ به خود می‌گیرد (شکل ۴.۱)، نه یکای شتابی که از معادله (۱.۱) به‌دست می‌آید. یکای سازگار جرم فوت، پوند، و ثانیه برابر جرمی است که بر اثر نیرویی ۱ پوندی شتابی برابر ۱ ft/s^2 پیدا کند (شکل ۵.۱). این یکا را بعضی مواقع اسلاگ (slug) می‌نامند، که می‌توان آن را از معادله $F = ma$ پس از جایگزینی ۱ پوند (۱ lb) به جای F و ۱ ft/s^2 به جای a به‌دست آورد. می‌نویسیم

$$F = ma \quad ۱ \text{ lb} = (۱ \text{ slug})(۱ \text{ ft/s}^2)$$

و به‌دست می‌آید

$$۱ \text{ slug} = \frac{۱ \text{ lb}}{۱ \text{ ft/s}^2} = ۱ \text{ lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft} \quad (۶.۱)$$



شکل ۴.۱

یکاهای جرم. یکای معمول جرم در U.S. (اسلاگ) یک یکای فرعی است. بنابراین، با استفاده از معادله‌های (۶.۱)، (۸.۱)، و (۱۱.۱)، می‌نویسیم

$$1 \text{ slug} = 1 \text{ lb} \cdot \text{s}^2 / \text{ft} = \frac{1 \text{ lb}}{1 \text{ ft/s}^2} = \frac{4.448 \text{ N}}{9.80665 \text{ m/s}^2} = 0.4536 \text{ kg}$$

و با یادآوری معادله (۵.۱)

$$1 \text{ slug} = 1 \text{ lb} \cdot \text{s}^2 / \text{ft} = 14.59 \text{ kg} \quad (۱۲.۱)$$

همچنین آن را نمی‌توان به عنوان یکای با ثابت جرم به کار برد. یادآور می‌شویم که جرم یونید استاندارد بنا به تعریف برابر است با

$$1 \text{ یونید جرم} = 0.4536 \text{ kg} \quad (۱۳.۱)$$

این ثابت را می‌توان برای تعیین جرم در یکاهای SI (کیلوگرم) یک جسم که با وزنش در U.S. یکاهای معمول (یونید) مشخص می‌شود، به کار برد.

برای تبدیل یک یکای فرعی معمول در U.S. به یکاهای SI، یک ضرب یا تقسیم ساده توسط ضرایب تبدیل مناسب وجود دارد. برای مثال، برای تبدیل گشتاور یک نیرو که از $M = 47 \text{ lb} \cdot \text{in}$ ، به یکاهای SI به دست آمده است از فرمول (۱۰.۱) و (۱۱.۱) استفاده می‌کنیم و می‌نویسیم

$$M = 47 \text{ lb} \cdot \text{in} = 47(4.448 \text{ N})(25.4 \text{ mm}) \\ = 5310 \text{ N} \cdot \text{mm} = 5.31 \text{ N} \cdot \text{m}$$

ضریب تبدیل به دست آمده در این بخش را نیز می‌توان برای تبدیل نتیجه عددی در یکاهای SI به U.S. به کار برد. برای مثال، اگر گشتاور یک نیرو $M = 40 \text{ N} \cdot \text{m}$ به دست آمده باشد، مانند آخرین پاراگراف بخش ۳.۱ چنین می‌نویسیم

$$M = 40 \text{ N} \cdot \text{m} = (40 \text{ N} \cdot \text{m}) \left(\frac{1 \text{ lb}}{4.448 \text{ N}} \right) \left(\frac{1 \text{ ft}}{0.3048 \text{ m}} \right)$$

با محاسبه عددی و حذف یکاهای اضافی در صورت و مخرج چنین به دست می‌آید

$$M = 29.5 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

یکاهای معمول در U.S. که بیشتر در مکانیک کاربرد دارند در جدول ۳.۱ با معادل آنها در SI فهرست شده‌اند.

۵.۱ روش حل مسئله

شما برای حل یک مسئله مکانیک باید به همان طریق عمل کنید که انگار با یک مسئله واقعی مهندسی مواجه هستید. اگر از تجربه و شهود کمک بگیرید فهم و فرمولبندی مسئله آسانتر خواهد شد. اما بعد از اینکه مسئله به وضوح بیان شد، دیگر جایی برای تصورات شما در حل آن باقی نمی‌ماند. حل مسئله باید مبتنی باشد بر شش اصل بنیادی که در بخش ۲.۱ بیان کردیم یا براساس قضیه‌هایی باشد که از روی آنها به دست آوردیم. هر قدمی که برداشته می‌شود باید بر این اساس توجیه شود. قواعد را باید سخت رعایت کرد تا تقریباً به طور خودکار به حل مسئله بینجامد، و دیگر جایی برای شهود یا «احساس» باقی نماند. پس از به دست آمدن جواب مسئله، باید آن را واریسی کرد. در اینجا ممکن است دوباره به عقل سلیم و تجربه شخصی متوسل شوید. اگر از جواب به دست آمده کاملاً راضی نبودید فرمولبندی مسئله، و اعتبار روشهایی را که برای حل آن به کار برده‌اید و همچنین صحت محاسباتان را واریسی کنید.

بیان مسئله باید واضح و دقیق باشد. باید شامل داده‌های مسئله و نشان‌دهنده اطلاعات لازم باشد. مسئله باید یک شکل تر و تمیز داشته باشد که همه کمیت‌های



عکس ۴.۱ اهمیت یکاها در تمام محاسبات نباید از میزانی که در مسئله تأکید شده بیشتر باشد. معلوم شده است که ۱۲۵ میلیون دلار برای رفتن به اطراف مدار مریخ به منظور تعیین آب و هوای آن هزینه شده است، که البته با شکست روبه‌رو شد، زیرا اولین پیمانکار گروه فضایی در محاسبات خود به جای استفاده از یکاهای ویژه SI از یکاهای U.S. استفاده کرد.

است تنها دو یکای بنیادی جنبشی برای تبدیل لازم می‌شود. بنابراین، از آنجا که همه دیگر یکاهای جنبشی (سینتیک) را می‌توان از این یکاهای بنیادی به دست آورد، فقط دو ضریب تبدیل لازم به یادآوری است.

یکاهای طول. بنا به تعریف یکای معمول U.S. طول چنین است

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m} \quad (۸.۱)$$

نتیجه می‌گیریم که

$$1 \text{ mi} = 5280 \text{ ft} = 5280(0.3048 \text{ m}) = 1609 \text{ m}$$

یا

$$1 \text{ mi} = 1.609 \text{ km} \quad (۹.۱)$$

همچنین

$$1 \text{ in} = \frac{1}{12} \text{ ft} = \frac{1}{12}(0.3048 \text{ m}) = 0.0254 \text{ m}$$

یا

$$1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm} \quad (۱۰.۱)$$

یکاهای نیرو. با یادآوری یکای متداول U.S. نیرو (یونید) به وزن استاندارد یونید (به جرم $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$) از سطح دریا و عرض جغرافیایی 45° (که در آن $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$) تعریف شده است و با استفاده از معادله (۴.۱)، می‌نویسیم

$$W = mg$$

$$1 \text{ lb} = (0.4536 \text{ kg})(9.80665 \text{ m/s}^2) = 4.448 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

یا، با توجه به معادله (۵.۱)،

$$1 \text{ lb} = 4.448 \text{ N} \quad (۱۱.۱)$$

جدول ۳.۱ یکاهای معمول U.S. و معادل آنها در SI

مقدار	یکای معمول در U.S.	معادل در SI
شتاب	ft/s ²	۰٫۳۰۴۸ m/s ²
	in/s ²	۰٫۰۲۵۴ m/s ²
مساحت	ft ²	۰٫۰۹۲۹ m ²
	in ²	۶۴۵٫۲ mm ²
انرژی	ft · lb	۱٫۳۵۶ J
نیرو	kip	۴٫۴۴۸ kN
	lb	۴٫۴۴۸ N
	oz	۰٫۲۷۸۰ N
ضربه	lb · s	۴٫۴۴۸ N · s
طول	ft	۰٫۳۰۴۸ m
	in	۲۵٫۴۰ mm
	mi	۱٫۶۰۹ km
جرم	oz mass	۲۸٫۳۵ g
	lb mass	۰٫۴۵۳۶ kg
	slug	۱۴٫۵۹ kg
	ton	۹۰۷٫۲ kg
گشتاور یک نیرو	lb · ft	۱٫۳۵۶ N · m
	lb · in	۰٫۱۱۳۰ N · m
گشتاور لختی	in ²	۰٫۴۱۶۲ × ۱۰ ^۶ mm ²
یک سطح	lb · ft · s ²	۱٫۳۵۶ kg · m ²
یک جرم	lb · s	۴٫۴۴۸ kg · m/s
مقدار اندازه حرکت	ft · lb/s	۱٫۳۵۶ W
توان	hp	۷۴۵٫۷ W
فشار یا تنش	lb/ft ²	۴۷٫۸۸ Pa
	lb/in ² (psi)	۶٫۸۹۵ kPa
سرعت	ft/s	۰٫۳۰۴۸ m/s
	in/s	۰٫۰۲۵۴ m/s
	mi/h (mph)	۰٫۴۴۷۰ m/s
	mi/h (mph)	۱٫۶۰۹ km/h
حجم	ft ³	۰٫۰۲۸۳۲ m ³
	in ³	۱۶٫۳۹ cm ³
مایعات	gal	۳٫۷۸۵ L
	qt	۰٫۹۴۶۴ L
کار	ft · lb	۱٫۳۵۶ J

مربوط را نشان بدهد. برای همه اجسام مورد نظر باید نمودارهای جداگانه‌ای رسم شود تا نیروهایی را که بر هر جسم وارد می‌شوند به‌طور مشخص نشان بدهد. این نمودارها به نمودار جسم آزاد معروف‌اند که آنها را به تفصیل در بخشهای ۱۱.۲ و ۲.۴ شرح خواهیم داد.

از اصول بنیادی مکانیک که در بخش ۲.۱ فهرست کردیم، برای نوشتن معادله‌های شرایط سکون یا حرکت اجسام استفاده خواهد شد. هر معادله باید به‌طور مشخص مربوط به یکی از نمودارهای جسم آزاد باشد. در این صورت می‌توانیم با رعایت دقیق قواعد معمول جبر و ثبت هر مرحله از کار، اقدام به حل مسئله کنیم.

پس از اینکه جواب مسئله به‌دست آمد، باید به دقت واریسی شود. اشتباهها در استدلال را غالباً می‌شود با واریسی یکاها مشخص کرد. به‌عنوان مثال، برای تعیین گشتاور یک نیروی ۵۰ نیوتونی حول نقطه‌ای به فاصله ۰٫۶۰ m از خط اثر آن، باید نوشته باشیم (بخش ۱۲.۳).

$$M = Fd = (50 \text{ N})(0.60 \text{ m}) = 30 \text{ N} \cdot \text{m}$$

یکای N · m سکه از ضرب نیوتون در متر به‌دست آمده است. یکای درستی برای گشتاور نیروست؛ اگر یکای دیگری به‌دست آورده بودیم، پی‌می‌بردیم که اشتباهی رخ داده است.

خطاهای محاسبه، معمولاً به این طریق معلوم می‌شوند که مقادیر عددی به‌دست آمده را باید در معادله‌ای که هنوز به کار نرفته است قرار بدهیم و ببینیم این مقادیر در معادله صدق می‌کنند یا نه. در مهندسی بر صحت محاسبات بیش از حد نباید تأکید کرد.

۶.۱ دقت عددی

دقت پاسخ هر مسئله بستگی به دو عامل دارد که عبارت‌اند از: (۱) دقت داده‌های مسئله و (۲) دقت محاسبات انجام شده.

دقت پاسخ مسئله نمی‌تواند از دقت کم‌دقت‌ترین این دو عامل بیشتر باشد. برای مثال، اگر باری که به یک پل اعمال می‌شود ۷۵۰۰۰ lb و خطای احتمالی اطلاعات ۱۰۰ lb باشد، خطای نسبی که میزان دقت داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند برابر است با

$$\frac{100 \text{ lb}}{75000 \text{ lb}} = 0.0013 = 0.13 \text{ درصد}$$

بنابراین بی‌معنی خواهد بود که عکس‌العمل یکی از تکیه‌گاههای پل را بعد از محاسبه مثلاً ۱۴۳۲۲ lb ذکر کنیم. دقت جواب مسئله، هر قدر هم که محاسبات را دقیق انجام داده باشیم بیشتر از ۰٫۱۳ درصد نمی‌تواند باشد، و امکان خطا در جواب ممکن است به ۲۰ lb $\approx$ (۱۴۳۲۲ lb)(۰٫۱۳/۱۰۰) برسد. جواب درست را باید به‌صورت ۱۴۳۲۰ ± ۲۰ lb بنویسیم.

در مسائل مهندسی، داده‌های عددی به‌ندرت با دقتی بیش از ۰٫۲ درصد داده می‌شوند. بنابراین به‌ندرت می‌شود توجیه کرد که جواب چنین مسائلی با دقتی بیش از ۰٫۲ درصد نوشته شود. یک قاعده عملی این است که اعدادی را که با «۱» شروع می‌شوند با ۴ رقم و بقیه را با سه رقم ثبت کنیم. اگر چیزی خلاف این موضوع گفته نشده باشد، دقت داده‌های یک مسئله را باید به همین طریق مشخص کرد. مثلاً یک نیروی lb-۴۰ را باید بخوانیم lb-۴۰٫۰ و نیروی lb-۱۵ را باید بخوانیم lb-۱۵٫۰۰. تعداد زیادی از مهندسان شاغل در صنعت و دانشجویان مهندسی از ماشین حسابهای جیبی استفاده می‌کنند. سرعت و دقت این ماشینها، محاسبات عددی را در حل بسیاری از مسائل آسان کرده است. با این حال دانشجو نباید ارقام بامعنی را، بیش از تعداد قابل توجیه، صرفاً به این خاطر که آسان به‌دست می‌آیند، ثبت کند. همان‌طور که قبلاً گفتیم در حل مسائل مهندسی عملی دقت بیش از ۰٫۲ درصد به‌ندرت لازم یا بامعنی است.