فصل ۱

مقدمه و مفاهیم پایه

اهداف

با مطالعه این فصل، شما باید قادر باشید:

- مفاهیم پایهٔ مکانیک سیالات را درک کرده و جریان‌های مختلف سیال را که در مسائل پیش می‌آیند، تشخیص دهید.
- مسائل مهندسی را مدل کرده و آنها را به صورت سیستماتیک حل کنید.
- از مباحث دقت، تمرکز و مرتبه اعشار درک کاری داشته و اهمیت هماهنگی ابعادی را در محاسبات مهندسی رعایت نمایید.

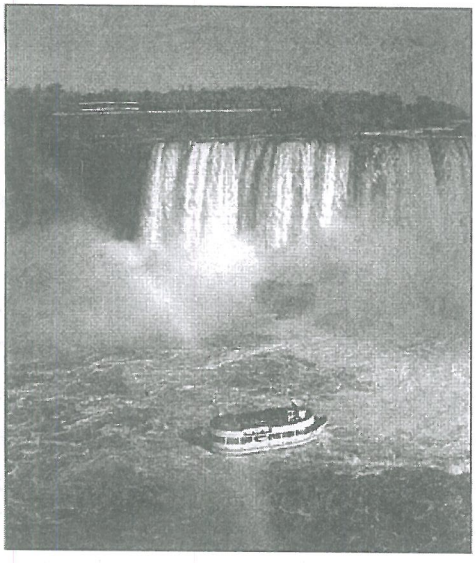
در این فصل مقدماتی، مفاهیم پایه‌ای که عموماً در تحلیل جریان سیال استفاده می‌شوند را بیان می‌کنیم. فصل را با بحث در مورد فازهای ماده و روش‌های متعدد طبقه‌بندی جریان سیال، مانند جریان لزج در برابر جریان غیر لزج، جریان داخلی در برابر جریان خارجی، جریان تراکم‌پذیر در برابر جریان تراکم ناپذیر، جریان آرام در برابر جریان مغشوش، جریان طبیعی در برابر جریان اجباری و جریان دائم در برابر جریان غیردائم آغاز می‌کنیم. هم‌چنین در ارتباط با شرط عدم لغزش در سطح اشتراک جامد و مایع بحث کرده و تاریخچه مختصری از توسعه مکانیک سیالات ارائه خواهیم داد.

پس از معرفی مفاهیم سیستم و حجم معیار، سیستم واحدهای مورد استفاده را مرور می‌کنیم. سپس در مورد چگونگی مدل‌سازی ریاضی مسائل مهندسی و تفسیر نتایج حاصل از چنین مدل‌هایی بحث می‌کنیم. به دنبال آن روش ذاتاً سیستماتیک را برای حل مسائل دنبال می‌کنیم، که به عنوان یک مدل در حل مسائل مهندسی می‌تواند به‌کار رود. نهایتاً در ارتباط با دقت، ریزبینی و میزان اهمیت ارقام معنی‌دار در اندازه‌گیری‌ها و محاسبات مهندسی بحث می‌کنیم.

۱-۱ مقدمه

مکانیک قدیمی‌ترین دانش فیزیکی است که با اجسام ساکن و متحرک که تحت اثر نیروها قرار دارند، سروکار دارد. شاخه‌ای از مکانیک که با اجسام ساکن سروکار دارد، استاتیک نام دارد و شاخه‌ای که با اجسام متحرک در ارتباط است، دینامیک نامیده می‌شود. زیرشاخه مکانیک سیالات علمی است که با رفتار سیالات ساکن (استاتیک سیالات) و متحرک (دینامیک سیالات) و هم‌چنین اثرات متقابل بین سیال و جامد یا سیالات دیگر در مرز مشترک آنها سروکار دارد. مکانیک سیالات را اصولاً دینامیک سیالات می‌نامند که سیال ساکن حالت خاصی از آن است که در آن سرعت حرکت صفر است (شکل ۱-۱).

مکانیک سیالات نیز به چندین زیرشاخه تقسیم می‌شود. هیدرودینامیک، که به مطالعه سیالات متحرک تراکم ناپذیر (مانند مایعات، به‌ویژه آب و گازهای کم سرعت) می‌پردازد. زیرشاخه‌ای از هیدرودینامیک که با جریان مایعات در لوله‌ها و کانال‌های باز سروکار دارد،



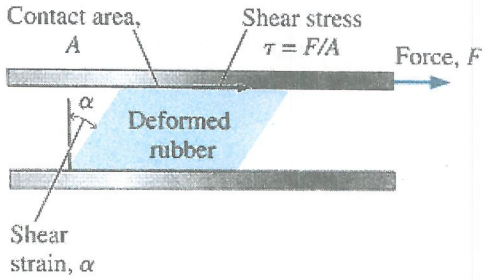
شکل ۱-۱ مکانیک سیالات به مایعات و گازهای متحرک یا ساکن می‌پردازد.

هیدرولیک نامیده می‌شود. دینامیک گازها، به جریان سیالات با تغییرات شدید چگالی مانند جریان گازهای درون شیپوره‌ها در سرعت‌های بالا می‌پردازد. آیرودینامیک با جریان گازها (به‌ویژه هوا) روی بدنه اجسامی‌مانند هواپیماها، موشک‌ها و اتومبیل‌ها در سرعت‌های پایین و بالا سروکار دارد. برخی از زیرشاخه‌های خاص مکانیک سیالات مانند هواشناسی اقیانوس‌شناسی و هیدرولوژی، با جریان سیالات موجود در طبیعت سروکار دارند.

سیال چیست؟

از علم فیزیک می‌دانیم که ماده دارای سه فاز اصلی است: جامد، مایع و گاز (در دماهای خیلی بالا، پلاسما هم وجود دارد). فازهای مایع و گاز یک ماده، سیال نامیده می‌شوند. تفاوت بین حالت جامد و مایع یک ماده در میزان مقاومت آن ماده در مقابل تنش برشی وارد بر آن است که سبب تغییر شکل آن ماده می‌شود. در یک جسم جامد با اعمال تنش برشی تغییرشکل ناچیز است، در حالی‌که در یک سیال با اعمال تنش برشی(هرقدر هم کوچک) سیال به طور پیوسته تغییر شکل می‌دهد. در جامدات، تنش با کرنش متناسب است، در حالی‌که در سیالات تنش با نرخ کرنش متناسب است. با اعمال نیروی برشی ثابت بر یک جسم جامد، نهایتاً تغییر شکل در زاویه خاصی متوقف می‌شود، در حالی‌که در یک سیال این تغییر شکل هرگز متوقف نشده، و به یک نرخ کرنش معین نزدیک می‌شود. قطعه پلاستیکی مستطیل شکلی را در نظر بگیرید که بین دو صفحه قرار گرفته است. هنگامی‌که صفحه بالایی با نیروی F کشیده شده و صفحه پایینی ثابت باشد، قطعه پلاستیکی مطابق شکل ۱-۲ تغییر شکل می‌دهد.

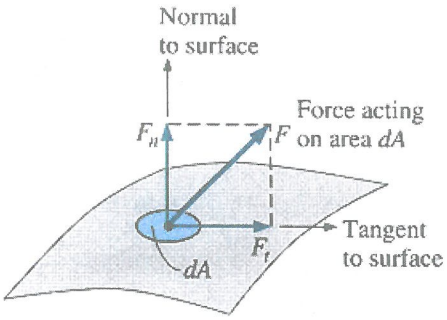
زاویه تغییر شکل α (که جابه‌جایی زاویه‌ای یا کرنش برشی نامیده می‌شود)، متناسب با نیروی F افزایش می‌یابد. در حالی‌که صفحه پایینی ثابت است، با فرض اینکه هیچ لغزشی بین صفحات و قطعه پلاستیکی وجود ندارد، سطح بالایی پلاستیک به اندازه تغییر مکان صفحه بالایی جابه‌جا می‌شود. در حالت تعادل، نیروی خالص وارد بر صفحه در جهت افقی مساوی صفر است، بنابراین نیرویی مساوی و در خلاف جهت F بر صفحه وارد می‌کند. این نیروی مخالف



شکل ۱-۲ تغییر شکل یک مداد پاک‌کن پلاستیکی که در بین دو صفحه موازی واقع شده و در معرض یک نیروی برشی قرار دارد.

که در سطح مشترک صفحه و قطعه پلاستیکی ایجاد می‌شود، ناشی از اصطکاک بوده و بـه صـورت $F = \tau A$ بیان می‌شود، که τ تنش برشی و A سطح تماس بین صفحه بـالایی و قطعـه پلاسـتیکی است. با حذف نیرو، قطعه پلاستیکی دوباره به موقعیت اصـلی خـود بـر مـی‌گـردد. ایـن پدیـده در جامدات دیگری مانند فولاد، به شرط اینکه نیروی اعمالی از حد الاستیک فولاد تجاوز نکنـد، دیـده می‌شود. اگر این آزمایش با یک سیال انجام شود (برای مثال، با دو صفحه مـوازی بـزرگ کـه درون حجم زیادی از آب قرار داده شوند)، لایه‌ای از سیال که در تماس با صفحه بالایی است (هر چقـدر هم که نیروی F کوچک باشد)، به صورت پیوسته با سرعت صفحه حرکت می‌کند. به علـت وجـود اصطکاک بین لایه‌های سیال سرعت سیال با افزایش عمق کاهش یافته و در صفحه پـایینی بـه صـفر می‌رسد. از استاتیک می‌دانیم که تنش نیرو بر واحد سطح است که از تقسیم نیرو بر سطحی کـه بـر آن عمل می‌کند به‌دست می‌آید. تنش ناشی از مؤلفه عمودی نیرو بر واحد سطح را تـنش عمـودی و تنش ناشی از مؤلفه مماسی را تنش برشی می‌نامند (شکل ۱-۳).

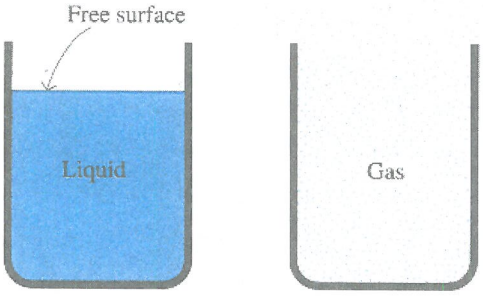
در یک سیال ساکن، مؤلفه عمودی تنش فشار نامیده می‌شود. جـداره‌هـای محـافظ سـیال، تنش برشی را خنثی کرده، و در نتیجـه سـیال سـاکن در حـالتی بـا تـنش برشـی صـفر اسـت. هنگامی‌که دیواره‌ها برداشته شده و یا مخزن نگهدارنده سیال کج شود، تـنش برشـی بـه‌وجـود آمده و مایع در جهت شکل‌گیری سطح آزاد افقی حرکت می‌کند. در یک مایع، ملکول‌ها نسبت به هم حرکت می‌کنند ولی، به‌خاطر نیروهای چسبندگی قوی بین ملکول‌ها حجم آنها تقریباً ثابـت می‌ماند. در نتیجه، مایع شکل محفظه را به‌خود گرفته و در یک مخزن بزرگ بـا وجـود میـدان ثقـل سطح آزادی تشکیل می‌شود. در مقایسه، یک گاز تا حد دیواره‌هـای مخـزن منبسـط شـده و همـه



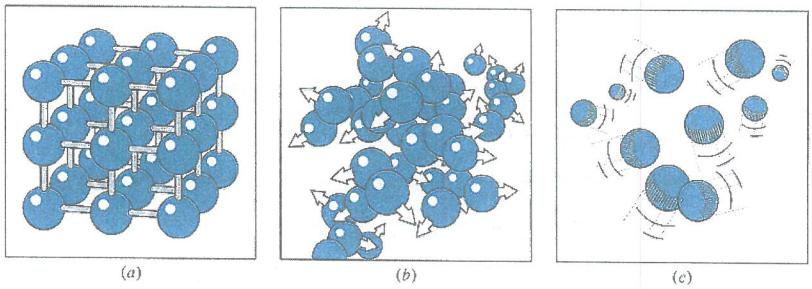
$$\text{Normal stress: } \sigma = \frac{F_n}{dA}$$

$$\text{Shear stress: } \tau = \frac{F_t}{dA}$$

شکل ۱-۳ تنش عمودی و برشی بر روی سطح یک المان سیال. در یک سیال ساکن تنش برشی صفر بوده و فشار تنها تنش عمودی است.



شکل ۱-۴ برخلاف یک مایع، یک گاز تشکیل سطح آزاد نداده و به انبساط خـود ادامـه می‌دهد تا تمام حجم موجود را پر کند.



شکل ۱-۵ وضعیت اتم‌ها در فازهای مختلف: (الف) در یک جامد مولکـول‌هـا وضـعیت نسبتاً ثابتی دارند، (ب) در فاز مایع گروه‌های ملکول‌ها در اطراف یکدیگر حرکت می‌کنند و (ج) در فاز گاز ملکول‌ها به صورت تصادفی به اطراف جابه‌جا می‌شوند.

فضا را پر می‌کند که این ناشی از فاصله زیاد ملکول‌های گاز و ضعیف بودن نیروهای چسبندگی بین ملکول‌هاست. بر خلاف مایعات، گازها قادر به تشکیل سطح آزاد نیستند (شکل ۱-۴). در هر حال سیالات و جامدات در اکثر مواقع قابل تشخیص هستند، اما این تشخیص در بعضی موارد خاص واضح نیست. مثلاً، چون آسفالت در فاصله زمان‌های کوتاه در برابر تنش برشی مقاومت می‌کند، بنابراین شبیه یک جامد ظاهر می‌شود. اما هنگامی‌که این نیروها برای زمان‌های طولانی‌تری اعمال شوند، آسفالت شبیه یک سیال عمل می‌کند. برخی پلاستیک‌ها، سرب و مخلوط دوغاب رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند. این موارد خارج از حوزه این کتاب است. سیالاتی که در این کتاب با آنها سروکار داریم، به‌وضوح به صورت سیال قابل تشخیص هستند.

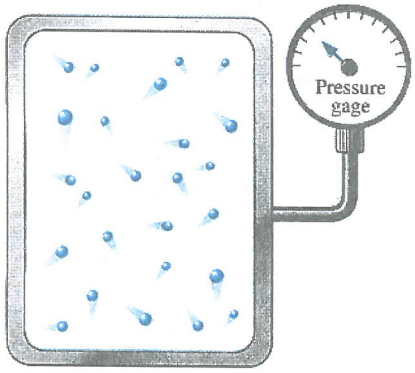
پیوندهای بین ملکولی در جامدات قوی‌ترین و در گازها ضعیف‌ترین هستند. یک دلیل آن این است که در مواد جامد ملکول‌ها به‌طور فشرده در کنار هم قرار دارند، در حالی‌که در گازها ملکول‌ها از یکدیگر فاصله زیادی دارند (شکل ۱-۵).

در مواد جامد ملکول‌ها در یک الگوی تکرار شده در کنار هم قرار می‌گیرند. به علت فاصله کوچک بین ملکول‌ها در یک جامد، نیروی جاذبه شدیدی بین ملکول‌ها وجود دارد، که باعث نگه داشتن ملکول‌ها در یک موقعیت ثابت می‌شود. در فاز مایع فاصله بین ملکولی تفاوت چندانی با فاز جامد نمی‌کند، جز اینکه ملکول‌ها نمی‌توانند نسبت به هم در یک موقعیت ثابت قرار گیرند و به صورت آزادانه در حال چرخش و جابه‌جایی هستند. در مایعات، نیروهای بین ملکولی نسبت به جامدات ضعیف‌تر بوده ولی نسبت به گازها قوی‌تر هستند. به استثنای آب، در هنگام تبدیل جامد به مایع فواصل بین ملکول‌ها افزایش می‌یابد.

در فاز گاز ملکول‌ها از یکدیگر بسیار دورند و نظم ملکولی وجود ندارد. ملکول‌های گاز به صورت اتفاقی حرکت کرده و به صورت پیوسته با یکدیگر و جداره محفظه‌شان برخورد می‌کنند. خصوصاً در چگالی‌های پایین، نیروهای بین ملکولی ضعیف بوده و تصادم تنها عکس‌العمل بین ملکول‌هاست. در فاز گاز، ملکول‌ها نسبت به فاز جامد و مایع سطح انرژی قابل توجهی دارند، بنابراین قبل از میعان یا یخ زدن آنها، گازها باید انرژی قابل ملاحظه‌ای را آزاد کنند.

اغلب از کلمات گاز و بخار به صورت هم معنی استفاده می‌شود. فاز بخار یک ماده زمانی گاز نامیده می‌شود، که بالای دمای بحرانی قرار گرفته باشد. بخار معمولا گازی است که از حالت میعان زیاد دور نیست. هر سیستم واقعی سیال شامل تعداد زیادی ملکول است و خواص سیستم به طور طبیعی به رفتار این ملکول‌ها بستگی دارد. برای مثال فشار گاز در یک مخزن نتیجه انتقال مومنتوم بین ملکول‌ها و جداره‌های مخزن است. در هر حال برای محاسبه فشار درون مخزن نیازی به دانستن چگونگی حرکت ملکول‌ها نیست و تنها کافی است که یک فشارسنج به مخزن متصل کنیم (شکل ۱-۶).

این روش ماکروسکوپیک یا کلاسیک نیازی به دانستن چگونگی رفتار ملکول‌های مجزا ندارد و یک راه مستقیم و آسان برای حل مسائل مهندسی ارائه می‌دهد. روش میکروسکوپیک یا



شکل ۱-۶ در یک مقیاس میکروسکوپی، فشار ناشی از برخورد ملکول‌های منفرد گاز است، با این وجود در مقیاس ماکروسکوپی فشار را با یک فشارسنج می‌توانیم اندازه‌گیری کنیم.

آماری، بر مبنای رفتار میانگین دسته‌های بزرگی از ملکول‌های مجزا بنا می‌شود و در این کتاب از آن تنها در نقش یک ابزار پشتیبانی‌کننده برای درک حقایق استفاده می‌شود.

زمینه‌های کاربرد مکانیک سیالات

مکانیک سیالات به طور گسترده‌ای در فعالیت‌های روزمره و طراحی سیستم‌های پیشرفته مهندسی از جاروبرقی گرفته تا هواپیماهای مافوق صوت به‌کار می‌رود. بنابراین درک صحیحی از اصول اولیه مکانیک سیالات مهم است.

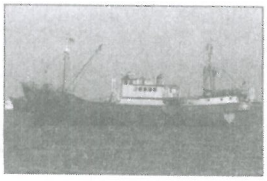
به عنوان شروع، مکانیک سیالات نقشی حیاتی در بدن انسان دارد. قلب به طور ثابت و مداوم خون را به تمام بدن انسان در سیاهرگ‌ها و شریان‌ها پمپ می‌کند و ریه‌ها مکانی برای جریان هوا در جهات مختلف هستند. بدیهی است که تمام قلب‌های مصنوعی، دستگاه‌های تنفسی مصنوعی و سیستم‌های دیالیز براساس دینامیک سیالات طراحی شده‌اند.

یک خانه معمولی نمایشی از کاربردهای مکانیک سیالات است. سیستم‌های لوله‌کشی آب سرد، گاز طبیعی و فاضلاب در یک منزل شخصی و هم‌چنین کل شهر عمدتاً براساس اصول اولیه مکانیک سیالات طراحی شده‌اند. این اصول هم‌چنین برای شبکه‌های کانال‌کشی گرمایشی و سیستم‌های تهویه مطبوع مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یک یخچال که ماده مبرد در لوله‌های آن جریان دارد، کمپرسور ماده مبرد را متراکم کرده و دو مبدل حرارتی هم گرما را از آن جذب و یا دفع می‌کنند، مکانیک سیالات نقش مهمی در طراحی همه این اجزاء دارد. حتی عملکرد شیر آب معمولی بر پایه اصول مکانیک سیالات است.

کاربردهای گسترده این علم را در یک اتومبیل هم می‌توان دید. تمام اجزای مرتبط با انتقال سوخت از مخزن بنزین به سیلندرها- خط سوخت، پمپ سوخت، انژکتورها یا کاربراتورها- به‌علاوه اختلاط سوخت و هوا در داخل سیلندرها و خروج گازهای حاصل از احتراق، با استفاده از مکانیک سیالات تجزیه و تحلیل می‌شوند. مکانیک سیالات در طراحی سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع، ترمزهای هیدرولیکی، فرمان، انتقال اتوماتیک و سیستم‌های روغنکاری، سیستم‌های خنک‌کننده موتور که شامل رادیاتور و پمپ آب است و حتی در تایرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل آیرودینامیکی اتومبیل‌های مدرن امروزی نتیجه مطالعات انجام شده بر روی آنهاست. این مطالعات در جهت به حداقل رساندن نیروی پسا با استفاده از تجزیه و تحلیل جریان روی سطوح آنهاست.

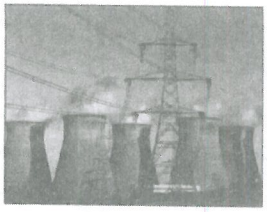
در یک مقیاس گسترده‌تر، در طراحی و تجزیه و تحلیل هواپیماها، قایق‌ها، زیردریایی‌ها، موشک‌ها، موتورهای جت، توربین‌های بادی، ابزارهای پزشکی، خنک سازی قطعات الکترونیکی و انتقال آب، نفت خام و گاز طبیعی، مکانیک سیالات نقش مهمی را ایفا می‌کند. هم‌چنین در طراحی ساختمان‌ها، پل‌ها و حتی تابلوهای اعلانات، برای حصول اطمینان از این‌که آنها در برابر جریان بادهای شدید مقاوم باشند از این اصول استفاده می‌شود. پدیده‌های طبیعی متعددی مانند دوره‌های بارندگی، الگوهای هواشناسی، بالا آمدن سطح آب از زیرزمین و بالارفتن آن در

Natural flows and weather
© Vol. 16/Photo Disc.

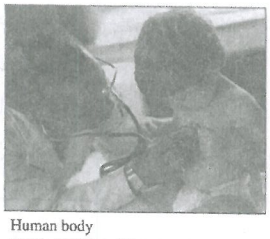


Boats
© Vol. 5/Photo Disc.

Aircraft and spacecraft
© Vol. 1/Photo Disc.



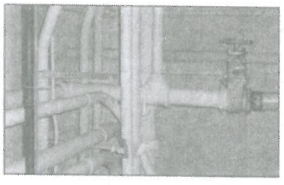
Power plants
© Vol. 57/Photo Disc.



Human body
© Vol. 110/Photo Disc.

Cars
Photo by John M. Cimbala.

Wind turbines
© Vol. 17/Photo Disc.



Piping and plumbing systems
Photo by John M. Cimbala.

Industrial applications
Courtesy UMDE Engineering, Contracting, and Trading. Used by permission.

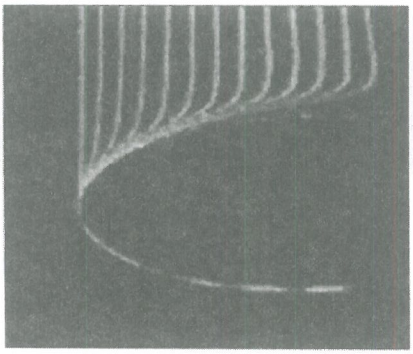
شکل ۱-۷ برخی از حوزه‌های کاربرد مکانیک سیالات.

شاخه‌های درختان، بادها، امواج اقیانوس‌ها و جریان آب در مقیاس‌های وسیع، همه توسط اصول مکانیک سیالات بیان می‌شوند (شکل ۱-۷).

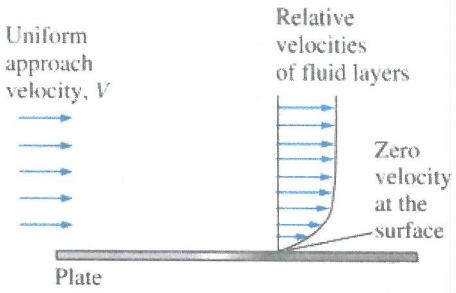
۱-۲ شرط عدم لغزش

جریان سیال اغلب با سطوح جامد احاطه می‌شود و بررسی اثر سطوح جامد روی جریان سیال امر مهمی است. می‌دانیم که جریان آب در یک رودخانه نمی‌تواند از درون صخره‌های بزرگ عبور کند، بلکه از اطراف آنها می‌گذرد. دلیل آن این است که مؤلفه عمودی سرعت آب روی سطح صخره باید صفر باشد و آب هنگام نزدیک شدن به سطح به سکون کامل می‌رسد. چیزی که به طور واضح مشخص نیست این است که آب با هر زاویه‌ای که به صخره برخورد کند کاملاً می‌ایستد، بنابراین مؤلفه مماسی سرعت آب در روی سطح نیز صفر است.

جریان سیال در یک لوله ساکن یا روی یک سطح جامد غیرمتخلخل (نفوذناپذیر برای سیال) را در نظر بگیرید. تمام مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که سیال متحرک وقتی به روی سطح جامد می‌رسد به سکون کامل رسیده و فرض می‌شود که سرعت سیال نسبت به سطح



شکل ۱–۸ توسعه پروفیل سرعت روی یک دماغه که ناشی از حرکت بدون لغزش یک سیال است.

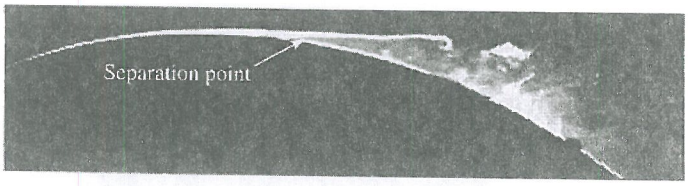


شکل ۱–۹ بر اثر شرط عدم لغزش، سیال روی سطح ساکن به توقف کامل می‌رسد.

صفر است. بنابراین سیال در هنگام تماس مستقیم با یک سطح جامد به علت اثرات لزجت بـه سطح چسبیده و هیچ‌گونه لغزشی وجود نخواهد داشت. این حالت به عنوان شرط عدم لغـزش نامیده می‌شود.

شکل ۱–۸ که از یک فیلم به‌دست آمده است، به‌وضوح توسعه گرادیـان سـرعت را نشـان می‌دهد. این توسعه ناشی از چسبیدن سیال به سطح دماغه یک جسم گرد است. لایـه چسـبیده به سطح، به دلیل نیروهای لزج بین لایه‌های سیال، سرعت لایه مجاور را کم کرده و بـه همـین ترتیب سرعت لایه‌های بعدی کاهش می‌یابد. پس شرط عدم لغزش عامل شکل‌گیـری پروفیـل سرعت است. ناحیه‌ای از جریان که به دیوارها چسبیده و اثـرات لزجـت (و بنـابراین گرادیـان‌هـای سرعت) در آن قابل توجه است را لایه مرزی گوینـد. لزجـت خاصـیتی از سـیال اسـت کـه بـرای شرط عدم لغزش و توسعه لایه مرزی به‌کار می‌رود و در فصل ۲ در مورد آن بحث خواهد شد.

لایه‌ای از سیال که در مجاورت با یک سطح متحـرک اسـت، دارای همـان سـرعت سـطح است. یک نتیجه شرط عدم لغزش این است که همه پروفیل‌های سرعت باید در نقـاط تمـاس بین سیال و سطح جامد نسبت به سطح دارای سرعت صفر باشند (شکل ۱–۹).



شکل ۱-۱۰ جدایی جریان عبوری از روی یک سطح خمیده.

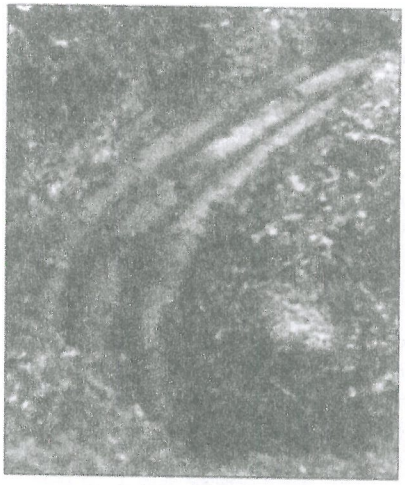
نتیجه دیگر شرط عدم لغزش نیروی پسای سطحی است که نیرویی است که سیال در جهت جریان به سطح اعمال می‌کند.

وقتی که سیال با سرعت زیاد از روی یک سطح خمیده عبور می‌کند، مانند سطح خارجی یک استوانه، در ناحیه پشت استوانه، لایه مرزی، متصل به سطح باقی نمانده و در نقطه‌ای از سطح جدا می‌شود که این فرایند را جدایی جریان (شکل ۱-۱۰) می‌نامند. لازم به ذکر است که شرط عدم لغزش در هر جای سطح حتی پایین دست نقطه جدایی هم به‌کار می‌رود. جدایی جریان به صورت مفصل‌تر در فصل دهم بحث می‌شود.

پدیده مشابهی در مورد دما هم وجود دارد. هنگامی‌که دو سطح غیر همدما با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند، بر اثر انتقال حرارت پس از مدتی دمای نقطه تماس یکسان می‌شود. بنابراین دمای نقطه تماس سیال و سطح جامد مربوطه باید با هم مساوی باشند. این شرط را شرط عدم پرش دمایی گویند.

۱-۳ تاریخچه مختصری از مکانیک سیالات

یکی از اولین مشکلات مهندسی که انسان در احداث شهرها با آن مواجه شد تهیه آب برای مصارف خانگی و آبیاری محصولات کشاورزی بود. زندگی شهری ما فقط با آب فراوان ادامه می‌یابد و از باستان‌شناسی مشخص است که هر تمدن موفقی در تاریخ وابسته به ساخت و نگهداری سیستم‌های آبی بوده است. آبراه‌های رومی‌که برخی از آنها هنوز هم استفاده می‌شوند، بهترین مثال برای این مطلوب است. در هر حال به‌طور یقین مهم‌ترین و قابل تحسین‌ترین فعالیت مهندسی از یک روش فنی در شهر هلینیستیک واقع در ترکیه امروزی شروع شد. در آنجا، از سال ۲۸۳ تا ۱۳۳ قبل از میلاد، نزدیک به ۴۵ کیلومتر خطوط لوله سربی و رسی تحت فشار ساخته شد. (شکل ۱-۱۱، که در فشار بالغ بر ۱٫۷ مگا پاسکال (۱۸۰ متر ارتفاع معادل) کار می‌کردند. متأسفانه در حال حاضر نام اغلب این سازندگان اولیه در دسترس نیست و در تاریخ گم شده‌اند. تئوری اولیه مکانیک سیالات، توسط ارشمیدس ریاضیدان یونانی، (۲۸۵-۲۱۲ قبل از میلاد) به‌وجود آمده است. او برای اولین بار در طی یک آزمایش غیر مخرب قانون شناوری را برای تعیین مقدار طلای موجود در تاج پادشاه هیرو اول به‌کار برد.

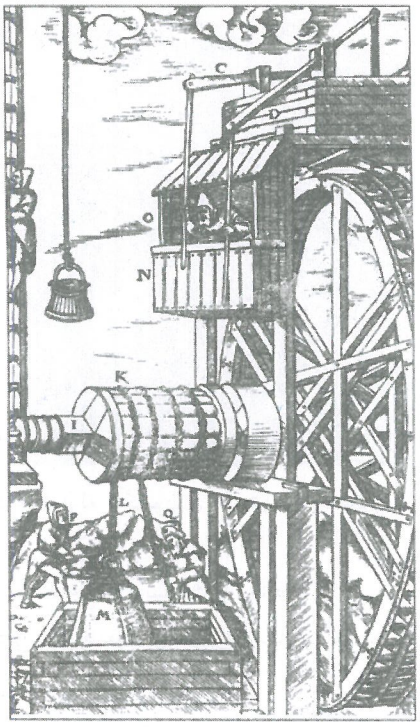


شکل ۱-۱۱ قطعات خط لوله پرگامون ـ قطر هر لوله سفالی بین ۱۳ تا ۱۸ سانتی‌متر بود.

رومی‌ها آبروهای عظیم ساختند و مردم بسیاری از مناطق تصرف شده را از مزایای آب تمیز متمتع کردند، اما به‌طور کلی فهم ضعیفی از تئوری سیالات داشتند. (شاید آنها نمی‌باید در هنگام حمله به سیراکوس، ارشمیدس را می‌کشتند).

در طول قرون وسطی کاربرد ماشین‌های سیالی به کندی اما به‌طور دائمی گسترش یافت. پمپ‌های پیستونی ظریف برای تخلیه آب معادن، آسیاب‌های بادی و آبی برای آسیاب غلات و انجام آهنگری فلزات و سایر کارها مورد استفاده قرار گرفتند. برای اولین بار در تاریخ بشریت کارهای عظیمی بدون استفاده از قدرت ماهیچه‌های شخص یا حیوان انجام شد و این اختراعات بعداً منجر به به‌وجود آمدن انقلاب صنعتی شدند. مجدداً به‌وجود آورندگان این اختراعات نیز ناشناخته‌اند، اما خود اختراعات و این وسایل به‌خوبی توسط چندین نویسنده متخصص از جمله جورجیس اگریکولا (شکل ۱۲-۱) جمع‌آوری و طبقه‌بندی شده‌اند.

در دوران رنسانس پیشرفت سیستم‌ها و ماشین‌های سیالی ادامه یافت، اما مهم‌تر از آن روش‌های علمی‌بود که توسط اروپایی‌ها ارائه و کامل شد. سیمون استیون (۱۶۱۷-۱۵۴۸)، گالیلئو (۱۶۴۲-۱۵۶۴)، آدم ماریوت (۱۶۸۴-۱۶۲۰) و اوانجلستیا توریچلی (۱۶۴۷-۱۶۰۸) از اولین دانشمندانی بودند که روش‌های سیالاتی را به‌کار برده و در مورد توزیع فشار هیدرواستاتیک و خلأ تحقیق کردند. این تحقیقات توسط ریاضیدان برجسته، بلایس پاسکال (۱۶۶۲-۱۶۲۳) جمع‌بندی و اصلاح شد. راهب ایتالیایی، بنتو کاستلی (۱۶۴۴-۱۵۷۷) اولین کسی بود که مقاله‌ای در مورد اصل پیوستگی سیالات منتشر کرد. سر ایزاک نیوتن (۱۷۲۷-۱۶۴۳) در کنار فرمول‌بندی معادلات حرکت برای جامدات، قانون‌های خود را در مورد سیالات نیز به‌کار برد و اینرسی و مقاومت سیال، جت‌های آزاد و لزجت را کشف کرد. این



شکل ۱-۱۲ یک بالابر معدن که با یک چرخ آبی برگشت‌پذیر تجهیز شده بود.

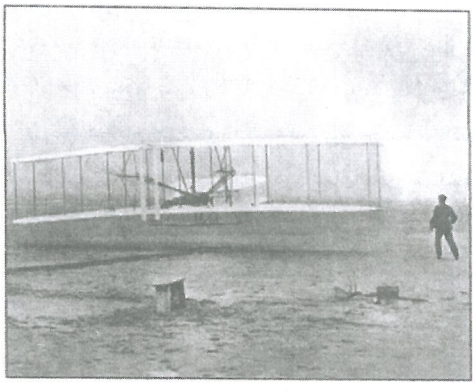
تلاش به‌وسیلهٔ دانیل برنولی (۱۷۸۲-۱۷۰۰) و همکارش لئونارد اویلر (۱۷۸۳-۱۷۰۷) ادامه یافت. آنها معادلات انرژی و مومنتوم را وضع کردند. نوشته کلاسیک برنولی در مورد هیدرودینامیک در سال ۱۷۸۳ را می‌توان اولین کتاب مکانیک سیالات دانست. سرانجام جین دالامبر (۱۷۸۹-۱۷۱۷) ایده شتاب و سرعت اجزاء، بیان دیفرانسیلی معادله پیوستگی و پارادوکس خود در مورد وجود مقاومت صفر در سیال در هنگام حرکت یکنواخت دائمی را بیان کرد.

تا اواخر قرن ۱۸ پیشرفت تئوری مکانیک سیالات به علت طبقه‌بندی ضعیف پارامترها و خواص سیالات، تأثیر اندکی بر روی مهندسی داشت، زیراکه اغلب تئوری‌ها، ضعیف‌تر و خلاصه‌تر از آن بودند که بتوان از آنها برای اهداف طراحی استفاده کرد. این تغییر با پیشرفت مدرسه مهندسی فرانسوی به‌وسیله ریچ دی پرونی ایجاد شد. پرونی (که هنوز برای اندازه‌گیری توان مشهور است) و همکارانش در دانشگاه صنعتی ایکول و ایکول پنتمن و گوس از اولین کسانی بودند که تئوری علمی و محاسباتی را در سر فصل دوره مهندسی گنجاندند که این امر الگویی برای سایر دانشگاه‌های دنیا شد (اکنون شما می‌توانید کسی که مسئول دوران سخت

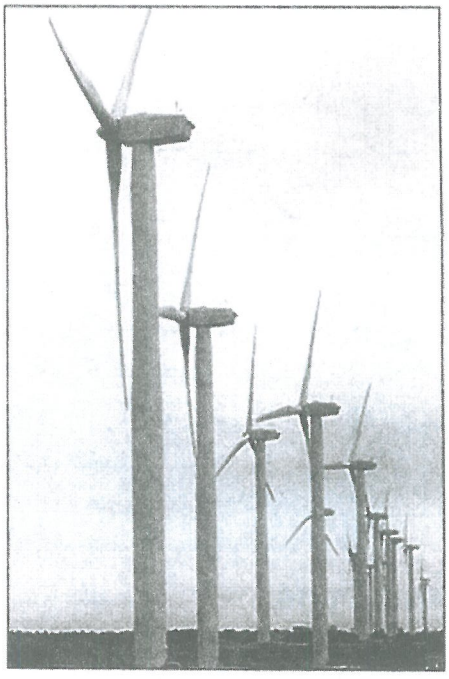
آموزشی شماست را شناسایی کنید!!). آنتونی چزی (۱۷۹۸- ۱۷۱۸)، لوئیس ناویر (۱۸۳۶- ۱۷۸۵)، گاسپارد کوریولیس (۱۸۴۳- ۱۷۹۲)، هنری دارسی (۱۸۵۸- ۱۸۰۳) و بسیاری از محققان برجسته دیگر در زمینه مهندسی از دانشجویان و استادان همین مدارس بوده‌اند.

تا اواسط قرن نوزدهم پیشرفت‌های اساسی در بسیاری از زمینه‌ها رخ داد. جین پوازیه، فیزیکدان آلمانی (۱۸۶۳- ۱۷۹۹)، جریان در لوله‌های موئین را برای سیالات متعددی اندازه گرفت. گاستهیف‌هاگن (۱۸۸۴- ۱۷۹۷) به تفاوت بین جریان آرام و مغشوش در لوله‌ها پرداخت. در انگلیس لرد ازبورن رینولدز (۱۹۱۲- ۱۸۴۲) با ادامه کار در لوله‌ها، عدد بی‌بعدی را معرفی کرد که به نام او معروف شد. همزمان با کارهای قبلی ناویر، جورج استوکس (۱۹۰۳- ۱۸۱۹) معادلات عمومی‌حرکت سیال با اصطکاک را که بعداً بنام هردو معروف شد، تکمیل کرد. ویلیام فرود (۱۸۷۹- ۱۸۱۰) به تنهایی روند کار را ادامه داد و اهمیت آزمایش روی مدل فیزیکی را ثابت کرد. متخصصان پیشتاز امریکایی در زمینه توربین‌ها مانند جیمز فرانکیس (۱۸۹۲- ۱۸۱۵)، لستر پلتون (۱۹۰۸- ۱۸۲۹) و کلمنت هرشل (۱۹۳۰- ۱۸۴۲) مخترع ونتوری متر، نیز از لحاظ تعداد با اروپایی‌ها برابر هستند. اواخر قرن نوزدهم به‌خاطر توسعه تئوری سیالات به‌وسیله دانشمندان ایرلندی و انگلیسی مانند رینولدز، استوکس، ویلیام تامسون، لرد کلوین (۱۹۰۷- ۱۸۲۴) ویلیام اشترات، لرد رایلی (۱۹۱۹- ۱۸۴۲) و سر هوراس لامب (۱۹۳۴- ۱۸۴۹) معروف می‌باشد. این محققان شمار زیادی از مسائل، ازجمله تحلیل ابعادی، جریان غیر چرخشی، حرکت گردابی، کاویتاسیون و امواج را مطالعه کردند. به یک تعبیر کلی‌تر کارهای آنها پیوندهایی بین مکانیک سیالات، ترمودینامیک و انتقال حرارت را نشان می‌داد.

شروع قرن بیستم دو پیشرفت اساسی به دنبال داشت. در سال ۱۹۰۳، برادران خودآموخته رایت (ویلبر ۱۹۱۲-۱۸۶۷ و اورویل ۱۹۴۸- ۱۸۷۱) با استفاده از تئوری و انجام آزمایش هواپیما را ساختند. اختراع ابتدایی آنها کامل بوده و شامل همه جنبه‌های هواپیماهای مدرن بود (شکل ۱-۱۳).



شکل ۱-۱۳ هواپیمای برادران رایت در کیتی هاوک.



شکل ۱-۱۴ مرکز تولید برق از نیروی باد در اوکلاهما نزدیک وودوارد که شامل ۶۸ توربین بادی است که قدرت هر توربین ۵/۱ مگاوات است.

به‌علت مشکل بودن حل معادلات ناویر- استوکس تا این زمان از آنها استفاده اندکی می‌شد. در مقاله‌ای در سال ۱۹۰۴، لودویگ پرانتـل (۱۹۵۳- ۱۸۷۵) نشـان داد کـه جریـان‌هـای سـیال را می‌توان به لایه‌ای نزدیک دیوار، یعنی لایه مرزی، که اثرات اصطکاکی در آنجا قابل توجه است و لایه خارجی که چنین اثراتی قابل صرف‌نظر بوده و معادلات ساده شده اویلر و برنولی در آن قابل اسـتفاده هسـتند، تقسـیم کـرد. دانشـجویان او، تئـودور ون کـارمن (۱۹۵۳- ۱۸۷۵)، پـل بلازیوس (۱۹۷۰- ۱۸۸۳)، جان نیکورادزه (۱۹۷۹- ۱۸۹۴) و دیگران زیربنـای آیرودینامیـک و هیدرولیک را بر اساس آن تئوری به‌وجود آوردند. (در طی جنـگ جهـانی دوم، هـر دو طـرف جنگ از تئوری او سود بردند و درحالی‌که پرانتل در آلمان باقی مانده بود، بهتـرین شـاگردش، تئودور ون کارمن مجارستانی در آمریکا کار می‌کرد.)

از اواسط قرن بیستم به عنوان دورهٔ طلایی پیشرفت‌ها و کاربردهای مکانیک سـیالات مـی‌تـوان نام برد. تئوری‌های موجود برای کارهای در حال انجام، مناسب بودند و خواص سیالات و پارامترهـا به خوبی تعریف شده بودند. این تئوری‌ها دامنه وسیعی از بخش‌های علوم هوایی، شیمیایی، صـنعتی و منابع آب را پوشش می‌دادند که هر یک مکانیک سیالات را به سـمت جدیـدی سـوق مـی‌داد. بـا

توسعه کامپیوترهای دیجیتال در آمریکا در اواخر قرن بیستم تحقیقات و کار در زمینه مکانیک سیالات گسترش فراگیری یافت. توانایی حل مسائل پیچیده بزرگی مانند مدل‌سازی شرایط اقلیمی و آب و هوا و یا بهینه‌سازی طراحی توربین‌ها فوائدی را برای جوامع بشری به‌وجود آورده است، که ایجادکنندگان مکانیک سیالات در قرن هجدهم تصور آن را هم نمی‌کردند (شکل ۱-۱۴).

اصول بیان شده در صفحات آتی، در برگیرندهٔ جریان‌هایی مانند جریانی در یک لحظه، (در مقیاس میکروسکوپی) تا شبیه‌سازی پنجاه ساله جریان در یک رودخانه می‌باشند. اینها واقعاً باعث سردرگمی ذهنی می‌شود.

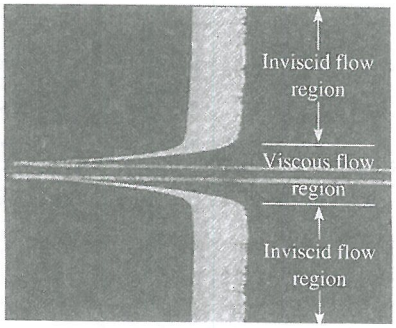
مکانیک سیالات در قرن بیست یکم به کجا خواهد رفت؟ صادقانه بگوییم، حتی یک برآورد محدود به آن سوی عصر حاضر، حماقت محض است. اما، تاریخ به ما چیزی را می‌گوید و آن این است که مهندسان آنچه را می‌دانند، برای استفاده اجتماع به‌کار خواهند برد و آنها در جستجوی آنچه نمی‌دانند هستند و وقت بسیار زیادی صرف این‌کار خواهد شد.

۱-۴ طبقه‌بندی جریان‌های سیال

پیشتر، مکانیک سیالات را به عنوان علمی‌که با رفتار سیالات ساکن و یا متحرک و یا اثرات متقابل سیالات بر جامدات و یا سیالات دیگر در مرزهای مشترک آنها سر و کار دارد، تعریف کردیم. در عمل تنوع وسیعی از مسائل جریان سیال وجود دارد و بر این اساس رسم است که بر اساس بعضی شاخصه‌ها، آنها را در گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی کنیم. روش‌های متعددی برای طبقه‌بندی مسائل مربوط به جریان سیال وجود دارد و در اینجا برخی از طبقه‌بندی‌های کلی را بیان می‌کنیم.

جریان لزج در برابر جریان غیر لزج

هنگامی که دو لایه سیال بر روی هم حرکت می‌کنند، بین آنها نیروی اصطکاکی ایجاد شده و لایه کندتر باعث کاهش سرعت لایه سریع‌تر می‌شود. این مقاومت داخلی در برابر جریان با خاصیت لزجت سیال مشخص می‌شود، که معیاری از چسبندگی درونی سیال است. در مایعات لزجت توسط نیروهای چسبندگی بین ملکول‌ها و در گازها به‌وسیله برخورد ملکول‌ها ایجاد می‌شود. هیچ سیالی با لزجت صفر وجود ندارد و بنابراین در هنگام جریان همه سیالات با درجات مختلف دارای لزجت هستند. جریان‌هایی که اثرات اصطکاکی در آنها قابل توجه است را جریان‌های لزج می‌گویند. در هر حال در بسیاری از جریان‌های عملی، ناحیه‌هایی وجود دارد (معمولاً ناحیه‌هایی که به سطوح جامد نزدیک نیستند) که نیروهای لزجت در مقایسه با نیروهای اینرسی و فشاری کوچک هستند. با صرف نظر از آثار جمله‌های لزجت در چنین ناحیه‌هایی، جریان غیرلزجی به وجود می‌آید که بدون این‌که سبب کاهش دقت مسأله شود، تحلیل آن را ساده‌تر می‌کند.

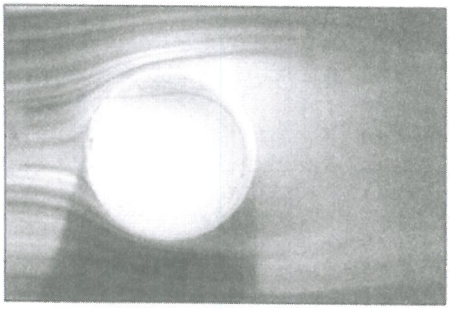


شکل ۱-۱۵ عبور جریان یکنواخت اولیه بر روی یک صفحه تخت و تشکیل نواحی جریان لزج (نزدیک دو سطح صفحه) و ایجاد جریان غیرلزج (دور از صفحه).

در شکل (۱- ۱۵) نواحی لزج و غیر لزج ناشی از عبور جریان یکنواخت از روی یـک صـفحه تخت نشان داده شده است. به‌علت شرط عدم لغزش، سیال از هر دو طرف به صفحه می‌چسبد و لایه مرزی نازکی با اثرات قابل ملاحظه لزجت، در نزدیک صفحه تخت به‌وجود می‌آیـد کـه ناحیهٔ جریان لزج نامیده می‌شود. نواحی جریان در دو سمت صفحه که بـه انـدازه کـافی از آن دور بوده و از حضور صفحه تأثیر نمی‌پذیرند، ناحیهٔ جریان غیرلزج هستند.

جریان داخلی در برابر جریان خارجی

جریان سیال را به دو جریان داخلی و خارجی تقسیم‌بندی می‌کنند. در جریان داخلـی سـیال از داخل مجرایی با جداره‌های صلب عبور کرده و در جریان خارجی هـم سـیال از روی بدنـه‌هـا عبور می‌نماید. به عبارت دیگر عبور جریان یک سیال بدون مـرز از روی سـطحی چـون یـک صفحه، یک سیم یا یک لوله، یک جریان خارجی است. جریان درون یک لوله و یا کانـال اگـر سیال کاملاً با سطوح جامد احاطه شده باشد جریان داخلی است. به طور مثـال، جریـان آب در یک لوله، یک جریان داخلی است و جریان هوا از روی یک توپ یا لوله در هنگـام وزش بـاد، جریان خارجی است (شکل ۱-۱۶).



شکل ۱-۱۶ جریان خارجی بر روی یک توپ تنیس و تشکیل دنباله مغشوش در پشت آن.

اگر فقط کسری از کانال با مایع پرشده و سطح آزادی وجود داشته باشد جریان مایع داخل کانال، از نوع جریان کانال باز است. جریان آب در رودخانه‌ها و نهرهای آبیاری مثال‌هایی از این جریان‌ها هستند. جریان‌های داخلی کاملاً تحت اثر لزجت هستند. در جریان‌های خارجی اثرات لزجت به لایه مرزی نزدیک سطوح جامد و نواحی دنباله در پایین دست اجسام محدود می‌شود.

جریان تراکم پذیر در برابر تراکم ناپذیر

بسته به میزان تغییر چگالی در طول جریان، جریان‌ها به دو دسته تراکم پذیر و تراکم ناپذیر طبقه‌بندی می‌شوند. تراکم ناپذیری یک تقریب است و به جریانی، تراکم ناپذیر گفته می‌شود که چگالی آن تقریباً ثابت بماند. بنابراین حجم هر بخش از سیال در طی حرکت در یک جریان (سیال) تراکم ناپذیر، بدون تغییر می‌ماند.

چگالی مایعات اساساً ثابت است و بنابراین جریان یک مایع به‌طور مشخص تراکم ناپذیر است. پس به مایعات معمولاً مواد تراکم ناپذیر گفته می‌شود. برای مثال، فشار ۲۱۰ اتمسفر نسبت به فشار ۱ اتمسفر، چگالی آب را فقط یک درصد تغییر می‌دهد. در مقایسه، گازها بسیار تراکم پذیر هستند. به عنوان مثال تغییر فشار تنها به میزان ۰٫۰۱ اتمسفر باعث تغییر یک درصدی چگالی هوای اتمسفری می‌شود.

هنگام تحلیل سیستم‌های با سرعت بالا مانند حرکت موشک‌ها و فضاپیماها، سرعت جریان اغلب به صورت زیر برحسب عدد بی‌بعد ماخ تعریف می‌شود:

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{\text{سرعت جریان}}{\text{سرعت صوت}}$$

که c سرعت صوت است و مقدار آن برای هوا در دمای اتاق در سطح دریا، ۳۴۶ متر بر ثانیه است. هنگامی‌که $Ma = ۱$ است جریان را صوتی می‌نامند، هنگامی‌که $Ma < ۱$ است جریان مادون صوت است و هنگامی‌که $Ma > ۱$ است جریان مافوق صوت بوده و هرگاه که $Ma >> ۱$ باشد، جریان فراصوت نامیده می‌شود.

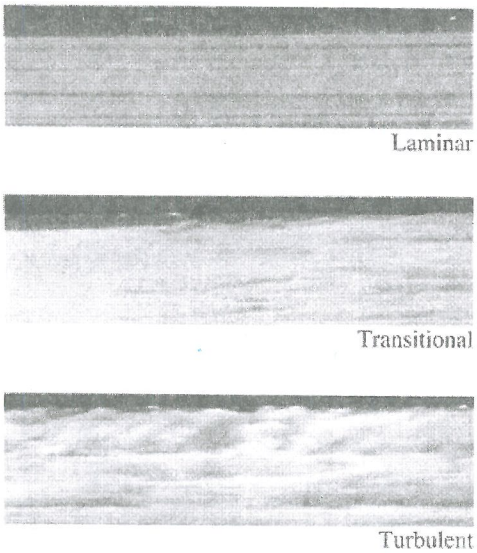
جریان‌های مایع با دقت بسیار بالایی تراکم ناپذیرند، اما میزان تغییر چگالی در جریان گازها بسیار بوده و تقریب حاصل از فرض جریان غیر قابل تراکم برای گازها به عدد ماخ بستگی دارد. اگر تغییرات چگالی گازها حدوداً زیر ۵ درصد باشد که معمولاً در این حالت $Ma < ۰٫۳$ است، جریان گاز را تقریباً به صورت تراکم ناپذیر تخمین می‌زنند. پس از اثرات تراکم‌پذیری هوا در سرعت‌های زیر ۱۰۰ متر بر ثانیه می‌توان صرف‌نظر کرد. توجه کنید که جریان گاز لزوماً جریان تراکم پذیر نیست.

تغییرات اندکی که در چگالی مایعات بر اثر تغییرات بزرگ فشار به‌وجود می‌آید، می‌تواند عواقب مهمی را در بر داشته باشد. به عنوان مثال، اثر ضربه قوچ در یک لولهٔ آب، باعث ایجاد لرزش‌هایی در لوله می‌شود که این اثر در نتیجهٔ انعکاس امواج فشاری ناشی از بسته شدن ناگهانی یک شیر ایجاد می‌شود.

جریان آرام در برابر جریان مغشوش

بعضی از جریان‌ها هموار و منظم بوده و برخی هم نسبتاً بی‌نظم و با هرج و مرج هستند. به حرکت سیال با نظم بالا که با لایه‌های هموار مشخص می‌شود جریان آرام گفته می‌شود. لغت لامینار از حرکت ذرات سیال مجاور هم در لایه‌ها گرفته شده است. جریان سیالات با لزجت بالا مانند روغن‌ها در سرعت‌های پایین عموماً آرام هستند. حرکت سیال با بی‌نظمی بالا که معمولاً در سرعت‌های بالا اتفاق می‌افتد و با نوسان‌های سرعت مشخص می‌شود را جریان مغشوش می‌گویند (شکل ۱- ۱۷).

جریان سیال‌های با لزجت کم، مانند هوا، در سرعت‌های بالا عموماً مغشوش هستند. رژیم جریان، تأثیرات زیادی را در میزان توان لازم برای پمپاژ خواهد داشت. جریانی که مابین جریان آرام و مغشوش در حال تغییر است، جریان گذرا نامیده می‌شود. آزمایش‌های انجام شده به‌وسیله اُزبرن رینولدز در سال ۱۸۸۰ منجر به تعیین عدد بی‌بعد رینولدز، Re، به عنوان یک پارامتر کلیدی برای تعیین رژیم جریان در لوله‌ها شد (فصل ۸).



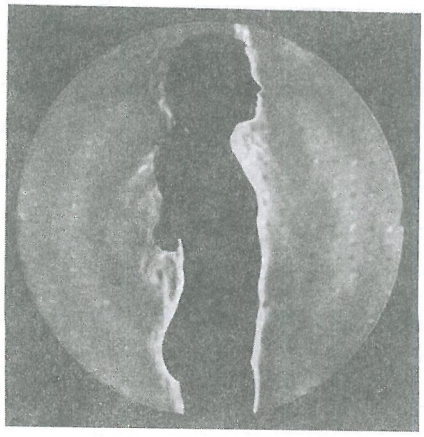
شکل ۱-۱۷ جریان‌های آرام، گذرا و مغشوش.

جریان طبیعی (غیراجباری) در برابر جریان اجباری

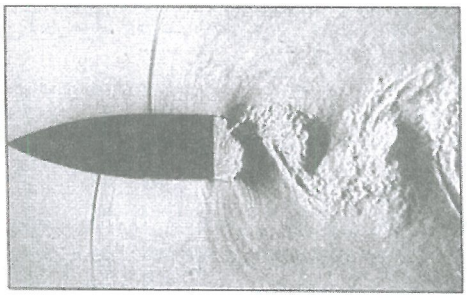
بسته به چگونگی شروع حرکت سیال، جریان سیال را طبیعی یا اجباری می‌گویند. در یک جریان اجباری، سیال توسط یک عامل خارجی مانند پمپ یا فن درون یک لوله یا روی یک سطح جریان می‌یابد. در جریان‌های طبیعی، حرکت سیال ناشی از عوامل طبیعی مانند اثرات شناوری است، که این اثر باعث بالا رفتن سیال گرم‌تر (و در نتیجه سبک‌تر) و پایین آمدن سیال سردتر (و در نتیجه سنگین‌تر) می‌شود (شکل ۱-۱۸). به عنوان مثال در سیستم‌های گرمایش خورشیدی، اثرات ترموسیفونی عموماً جایگزین پمپ می‌شود که این امر با قرار دادن مخزن آبی در بالای کلکتورهای خورشیدی انجام می‌شود.

جریان دائم در برابر جریان غیر دائم

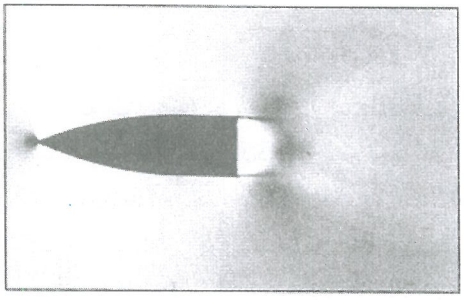
از اصطلاحات دائم و یکنواخت به طور مکرر در مهندسی استفاده می‌شود، و بنابراین فهم صحیح معانی آنها مهم می‌باشد. اصطلاح دائم نشان‌دهندهٔ عدم تغییر در یک نقطه با زمان است. نقطه مقابل دائم واژهٔ غیردائم است. اصطلاح یکنواخت نشان‌دهندهٔ عدم تغییر با مکان در یک ناحیهٔ خاص است. این معانی با استفاده هر روزه شان متداول هستند. (همسردائمی، توزیع یکنواخت و...) از اصطلاحات غیر دائم و گذرا اغلب به صورت یکسان استفاده می‌شود، اما این اصطلاحات هم معنی نیستند. در مکانیک سیالات، غیردائم یک اصطلاح عمومی‌است که برای هر جریانی که دائم نباشد، به‌کار می‌رود، اما عبارت گذرا معمولاً در جریان‌های در



شکل ۱-۱۸ در این تصویر چیلیرن که به دختر با لباس شنا مربوط می‌شود، صعود هوای سبک‌تر و گرم‌تر در نزدیک بدن نشان‌دهنده این است که انسان‌ها و حیوانات خون‌گرم توسط یک لایه حرارتی در حال صعود احاطه شده‌اند.



(a)



(b)

شکل ۱-۱۹ گردابه نوسانی یک بدنه دوکی‌ایرفویل گونه که با ماخ ۰/۶ حرکت می‌کند. تصویر (الف) به یک تصویر لحظه‌ای مربوط است در حالی کـه تصـویر (ب) بـه یـک عکس‌برداری طولانی‌تر مربوط می‌شود.

حال توسعه استفاده می‌شود. برای مثال، هنگامی‌که موتور یک موشـک روشـن مـی‌شـود، اثرات گذرا وجود خواهد داشت (فشار در داخل موشک به‌وجـود آمـده و جریـان شـتاب می‌گیرد و غیره) تا هنگامی‌که موتور به شرایط دائم برسد. اصطلاح پریودیک، به نوعی از جریان‌های غیردائم اطلاق می‌شود که جریان حول یک متوسط دائم نوسان می‌کند.

بسیاری وسایل مانند توربین‌ها، کمپرسورها، دیگ‌ها، کندانسورها و مبدل‌های حرارتی برای مدت زمان طولانی در شرایط یکسان عمل می‌کنند و آنها را در زمره دستگاه‌های جریـان دائـم طبقه‌بندی می‌کنند. (البته توجه کنید که میدان جریان نزدیک تیغه‌های چرخان توربوماشـین‌هـا، غیردائم است، اما هنگامی‌که این وسایل را طبقه‌بندی می‌کنیم به کل میدان جریان نگاه می‌کنـیم و جزئیات در بعضی نقاط اهمیتی ندارند. در طی یک جریان دائم، خواص سیال مـی‌تواننـد در یک وسیله خاص، از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر تغییر کنند، ولی این خواص در یـک نقطـه خـاص ثابت می‌مانند. بنابراین حجم، جرم و میزان انرژی کل یک وسیله در جریان دائم و یا هر مقطـع جریان در شرایط دائم ثابت می‌مانند.

شرایط جریان دائم را می‌توان با تقریب خوبی برای ابزارهایی مانند توربین‌ها، پمپ‌ها، دیگ‌ها، کندانسورها و مبدل‌های حرارتی نیروگاه‌ها یا سیستم‌های تبرید که در شرایط پیوسته کار می‌کنند، به‌کار برد. بعضی دستگاه‌های متناوب مانند موتورهای رفت و برگشتی یا کمپرسورها به علت این‌که جریان در ورود و خروج آنها نوسانی است، شرایط جریان دائم را ارضا نمی‌کنند. در هر حال با این‌که خواص سیال با زمان رفتار متناوب دارد، جریان در این دستگاه‌ها را می‌توان به صورت فرایند جریان دائم با استفاده از متوسط‌گیری زمانی مقادیر این خواص، در نظر گرفت.

برخی مشاهدات جالب جریان سیال در کتاب " آلبوم جریان سیال " نوشتهٔ میلتون ون دایک (۱۹۸۲) ارائه شده‌اند. مثال خوبی از یک میدان جریان غیردائم در شکل (۱-۱۹) از کتاب ون دایک نشان داده شده است.

شکل (۱-۱۹ الف) تصویری لحظه‌ای از یک حرکت با سرعت بالاست که گردابه‌های بزرگ، مغشوش، چرخشی و متغیری را آشکار می‌سازد که از درون دنبالهٔ متناوب نوسانی که پشت یک جسم مایع به وجود آمده، ایجاد می‌شوند. گردابه‌ها باعث ایجاد امواج ضربه‌ای می‌شوند که به‌طور متناوب از بالا و پایین سطوح ایرفویل به صورت دائم به سمت بالا دست جریان می‌روند. شکل (۱-۱۹ ب) میدان جریان مشابهی را نشان می‌دهد، اما فیلم زمان طولانی‌تری را نشان می‌دهد، به‌طوری که تصویر در طی دوازده سیکل، متوسط‌گیری زمانی شده است. میدان جریان متوسط زمانی حاصل به‌علت گم شدن جزئیات نوسانات غیردائم در طول نمایش، دائمی به نظر می‌رسد.

یکی از مهم‌ترین کارهای یک مهندس این است که مشخص کند که آیا تنها مطالعهٔ الگوی جریان دائم متوسط‌گیری زمانی شده برای یک مسأله کافی است یا مطالعهٔ جزئیات الگوی غیردائم هم مورد نیاز است. اگر یک مهندس فقط به خواص کلی میدان جریان (مانند ضریب پسای متوسط، سرعت متوسط و میدان فشار) مانند وضعیت متوسط شکل (۱-۱۹ ب) علاقه‌مند باشد، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی متوسط زمانی یا محاسبات عددی و تحلیلی میدان جریان متوسط می‌توانند کافی باشند. در هر حال اگر مهندسی به جزئیات میدان جریان غیردائم مانند ارتعاشات القایی جریان، نوسانات غیردائمی فشار و یا امواج صوتی ساطع شده از گردابه‌های مغشوش یا امواج ضربه‌ای علاقه‌مند باشد، توصیف متوسط زمانی میدان جریان ناکافی است.

اغلب مثال‌های محاسباتی و تحلیلی ارائه شده در این کتاب با جریان‌های متوسط زمانی و دائم سرو کار دارند. در هر حال در پاره‌ای مواقع به الگوهای جریان غیردائمی مربوطه اشاره خواهد شد.

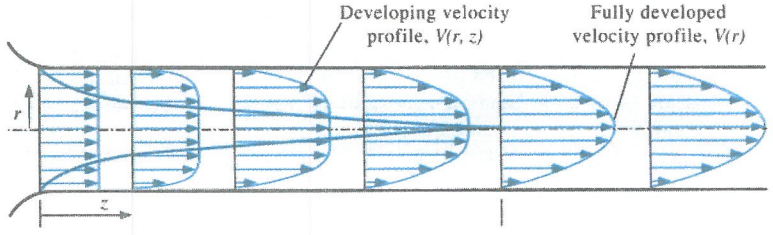
جریان‌های یک، دو و سه بعدی

بهترین شیوه مشخص کردن میدان جریان استفاده از توزیع سرعت است و بنابراین اگر سرعت جریان در یک، دو و یا سه بعد تغییر کند، به آن جریان به ترتیب یک، دو و سه بعدی می‌گویند. یک جریان سیال معمولاً در یک هندسه سه بعدی جاری است و ممکن است که سرعت در هر سه جهت تغییر کند، که به آن جریان سه بعدی گفته می‌شود. [$\vec{V}(x,y,z)$ در مختصات کارتزین و $\vec{V}(r,\theta,z)$ در مختصات استوانه‌ای]. در هر حال تغییرات سرعت در جهات مشخصی می‌تواند نسبت به تغییرات در سایر جهات کوچک بوده و با خطای اندکی از آن صرف نظر کرد. در چنین حالاتی جریان را می‌توان به صورت یک یا دو بعدی مدل کرد که تحلیل آن را ساده‌تر می‌کند.

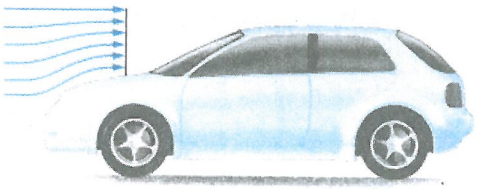
جریان دائم سیال در یک لوله مدور متصل به یک مخزن بزرگ را در نظر بگیرید. به‌علت شرط عدم لغزش سرعت سیال در روی سطح لوله صفر است و در ورودی لوله به‌علت تغییرات سرعت در هر دو جهت r و z جریان دو بعدی است. پروفیل سرعت پس از طی مسافتی از ورودی، (حدود ۱۰ برابر قطر لوله در جریان مغشوش و مقدار کمتری در جریان آرام)، مانند شکل ۱-۲۰ کاملاً توسعه یافته شده و بدون تغییر باقی می‌ماند، که جریان در این ناحیه را جریان کاملاً توسعه یافته گویند (مطابق شکل ۱-۲۰).

چون در جریان توسعه یافته سرعت فقط در جهت r تغییر کرده و در جهت‌های θ و z تغییرات ندارد، جریان توسعه یافته در داخل لولهٔ مدور یک‌بعدی است و حول محور لوله متقارن است.

توجه کنید که ابعاد جریان به انتخاب سیستم مختصات و جهت آن بستگی دارد. به عنوان مثال، در لوله ذکر شده، جریان در مختصات استوانه‌ای یک بعدی بوده و در مختصات کارتزین دو بعدی است که نشان دهندهٔ اهمیت یک سیستم مختصات مناسب برای مسأله است.



شکل ۱-۲۰ توسعه پروفیل سرعت در داخل یک لوله گرد $V=V(r,z)$ و در نتیجه جریانی که در ورودی دو بعدی است با توسعه یافتگی در داخل لوله به یک جریان یک بعدی $V=V(r)$ تبدیل شده و پس از آن بدون تغییر می‌ماند.



شکل ۱-۲۱ به غیر از بالا و پایین آنتن یک خودرو، در بقیه طـول آن جریـان تقریبـاً دو بعدی است.

هم‌چنین توجه کنید حتی در این جریان ساده، به‌علت شرط عدم لغزش، سرعت نمی‌توانـد در یک سطح مقطع لوله، یکنواخت فرض شود. در هر حال در یک ورودی کـاملاً گـرد شـده، پروفیل سرعت می‌تواند تقریباً یکنواخت در نظر گرفته شود، چون سرعت در همهٔ شعاع‌هـا بـه جز نزدیک دیوارها، تقریباً ثابت می‌ماند.

هنگامی‌که نسبت منظری بزرگ است و جریان در طول بعد بزرگ‌تر، تغییرات قابل توجهی نکند، جریان را می‌توان به‌صورت دو بعدی تخمـین زد. بـرای مثـال جریـان هـوا حـول آنـتن اتومبیل به‌جز در نزدیکی انتهای آن می‌تواند دو بعدی در نظر گرفته شود که علت آن این است که طول آنتن در برابر قطر آن بسیار بزرگ‌تر بوده و جریان هـوای برخـوردی بـه آنـتن تقریبـاً یکنواخت است (شکل ۱-۲۱).

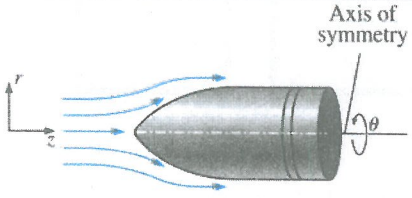
مثال ۱-۱ جریان تقارن محوری حول یک گلوله تفنگ (فشنگ)

حرکت فشنگ را در هوای ساکن در نظر بگیرید. تعیین کنید که آیا جریان هوای متوسط زمانی بر روی فشنگ، در طی پرواز آن، یک، دو و یا سه بعدی است (شکل ۱-۲۲).

حل: باید تعیین کرد که جریان هوا روی فشنگ، یک، دو و یا سه بعدی است.

فرضیات: وزش باد قابل توجه نیست و فشنگ هیچ چرخشی ندارد.

تحلیل: فشنگ دارای محور تقارن است، بنابراین یک جسم تقارن محوری است. جریـان هـوای بالادست فشنگ، موازی این محور است و ما انتظار داریم که جریان هوای متوسط اندازه‌گیـری شده حول این محور، از نظر چرخشی متقارن باشد. به چنـین جریـانی، تقـارن محـوری گفتـه



شکل ۱-۲۲ جریان تقارن محوری بر روی یک گلوله.

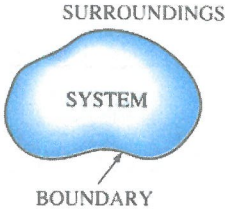
می‌شود. در این حالت، سرعت با فواصل محوری z و شعاعی r تغییر می‌کند، اما با جهت زاویه‌ای θ تغییری نمی‌کند. بنابراین جریان هوای متوسط زمانی روی فشنگ دو بعدی است.

۱-۵ سیستم و حجم معیار

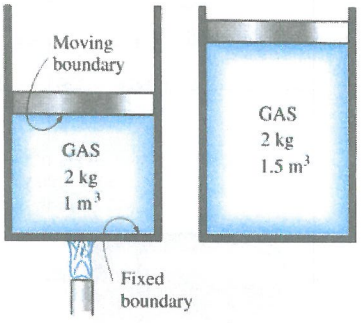
سیستم، مقداری از ماده یا ناحیه‌ای از فضاست که برای مطالعه انتخاب می‌شود. جرم یا ناحیهٔ خارج سیستم، محیط نامیده می‌شود. سطوح واقعی یا مجازی که سیستم را از محیط آن جدا می‌کند، **مرز** نامیده می‌شود(شکل ۱-۲۳). مرز یک سیستم می‌تواند ثابت یا متحرک باشد. توجه کنید که مرز، سطح مشترک بین سیستم و محیط است. از نقطه نظر ریاضی مرز هیچ ضخامتی نداشته و بنابراین نمی‌تواند هیچ جرمی داشته و یا حجمی از فضا را اشغال کند، بسته به این‌که برای مطالعه، جرم یا حجم سیستم ثابت باشد، سیستم‌ها به صورت بسته یا باز مورد توجه قرار می‌گیرند.

سیستم بسته (که معمولاً جرم معیار نامیده می‌شود) شامل مقدار ثابتی از جرم است و هیچ جرمی از مرزهای آن عبور نمی‌کند. اما انرژی، در شکل گرما یا کار از مرز سیستم می‌تواند عبور کند و لازم نیست حجم سیستم بسته ثابت بماند. در حالت خاصی که انرژی هم از مرز عبور نکند، چنین سیستمی را سیستم مجزا شده گویند.

دستگاه سیلندر- پیستون نشان داده شده در شکل ۱-۲۴ را در نظر بگیرید. فرض کنید



شکل ۱-۲۳ سیستم، محیط و مرز

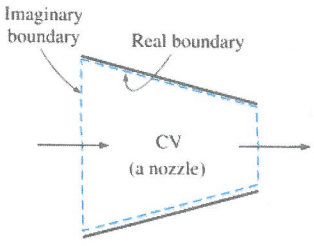


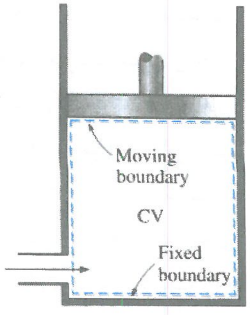
شکل ۱-۲۴ یک سیستم بسته با مرز متحرک

که می‌خواهیم بدانیم که با گرم کردن گاز، چه اتفاقی می‌افتد. چون تمرکز ما بر روی گاز است، گاز، سیستم ما می‌باشد. سطوح داخلی پیستون و سیلندر مرز را تشکیل می‌دهند و چون هیچ جرمی از مرزها عبور نمی‌کند، سیستم بسته است. توجه کنید که انرژی ممکن است از مرز عبور کند و بخشی از مرز (در اینجا سطوح داخلی پیستون) متحرک است. هر چیز خارج از گاز، شامل پیستون و سیلندر، مرز سیستم است. یک سیستم باز که غالباً حجم معیار نامیده می‌شود، منطقهٔ انتخاب شده مناسبی در فضاست. این حجم معیار معمولاً شامل دستگاهی چون یک کمپرسور، توربین یا شیپوره است، که جریان جرم در آن برقرار است.

مطالعه جریان درون این وسائل زمانی به نحو احسن انجام می‌گیرد که ناحیه داخل این دستگاه‌ها به عنوان حجم معیار انتخاب شود. جرم و انرژی، هر دو می‌توانند از مرزهای حجم معیار عبور کنند. شمار متعددی از مسائل مهندسی شامل جریان جرم ورودی و خروجی از یک سیستم هستند، و بنابراین به عنوان حجم‌های معیار، مدل می‌شوند. یک گرم کن آب، رادیاتور اتومبیل، توربین و یک کمپرسور، همگی شامل جریان جرم هستند و باید به‌جای استفاده از جرم‌های معیار (سیستم بسته) به صورت حجم‌های معیار تحلیل شوند. در حالت کلی هر ناحیه دلخواهی را در فضا می‌توان به عنوان حجم معیار انتخاب کرد. قاعده خاصی برای انتخاب حجم معیار وجود ندارد، اما انتخاب صحیح، مطمئناً تحلیل ما را ساده‌تر می‌کند. به عنوان مثال اگر جریان هوا در درون یک شیپوره را تحلیل کنیم، ناحیه درون شیپوره انتخاب خوبی برای حجم معیار است.

همانند یک شیپوره، اندازه و شکل حجم معیار می‌تواند ثابت بوده و یا مانند شکل ۱-۲۵، شامل مرزهای متحرک باشد. در هر حال بیشتر حجم معیارها مرزهای ثابتی دارند و شامل هیچ مرز متحرکی هم نیستند. حجم معیار علاوه بر تبادل جرم ممکن است همانند جرم معیار دارای تبادل کار و گرما هم باشد.





شکل ۱-۲۵ یک حجم معیار می‌تواند شامل مرزهای ثابت، متحرک، واقعی و تصوری باشد.

۶-۱ اهمیت ابعاد و واحدها

هر کمیت فیزیکی به‌وسیله ابعادی مشخص می‌شود. مقادیر نسبت داده شده به ابعاد، واحد نامیده می‌شوند. بعضی ابعاد اصلی مانند جرم m، طول L، زمان t و دما T به عنوان ابعاد اولیه یا پایه انتخاب می‌شوند، در حالی‌که ابعاد دیگری مانند سرعت V، انرژی E و حجم $\forall$ که از ابعاد اولیه نشات می‌گیرند، ابعاد ثانویه یا ابعاد مشتق شده نامیده می‌شوند.

در طی سالیان متمادی، سیستم واحدهای مختلفی ایجاد شده است. با وجود تلاش‌های زیاد جامعهٔ علمی و مهندسی، که برای سوق دادن جهان به سمت استفاده از سیستم واحدی یگانه در جهان صورت گرفته است، هنوز هم در جهان به طور عمومی از دو مجموعه واحدها استفاده می‌شود: سیستم انگلیسی که با عنوان سیستم سنتی ایالات متحده (*USCS*) شناخته می‌شود و دیگری سیستم متریک (*SI*) (سیستم ابعاد بین المللی) که با عنوان سیستم بین المللی شناخته شده است. *SI* یک سیستم ساده و منطقی است که بر اساس رابطه دهدهی بین واحدهای مختلف استوار است و در اغلب ملل صنعتی، از جمله انگلیس، برای کارهای علمی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در هر حال سیستم انگلیسی هیچ پایهٔ سیستماتیک و ظاهری ندارد و ابعاد مختلف در این سیستم تقریباً به صورت دلخواه به یکدیگر مرتبط شده‌اند ($۴\,qt = ۱\,gal,\ ۱\,mile = ۵۲۸۰\,ft, ۱۲\,in = ۱\,ft$)، که این امر موجب می‌شود که یادگیری این سیستم سخت و گیج کننده شود. ایالات متحده تنها کشور صنعتی است که هنوز به طور کامل واحدهای آن به سیستم متریک تبدیل نشده‌اند.

تلاش‌های سیستماتیک برای توسعه یک سیستم واحد قابل قبول جهانی به سال ۱۷۹۰ بر می‌گردد، زمانی‌که انجمن ملی فرانسه، آکادمی‌علوم فرانسه را موظف به ایجاد چنین سیستمی کرد. اولین سیستم متریک سریعاً در فرانسه گسترش یافت، ولی تا سال ۱۸۵۷، زمانی‌که ۱۷ کشور، از جمله ایالات متحده، پیمان معاهده متریک را امضا کردند، این سیستم جهانی نشده بود. در این پیمان بین المللی، متر و گرم به عنوان واحدهای متریک طول و جرم انتخاب شدند و یک کنفرانس عمومی اندازه‌گیری و اوزان (*CGPM*) بنیان‌گذاری شد که هر ۶ سال یک‌بار باید تشکیل جلسه می‌داد. در سال ۱۹۶۰، *CGPM*، *SI* را که بر مبنای شش کمیت اصلی بود و واحدهای آنها در سال ۱۹۵۴ در دهمین کنفرانس اندازه‌گیری و اوزان انتخاب شده بودند، معرفی کرد. متر(m) برای طول، کیلوگرم (kg) برای جرم، ثانیه (sec) برای زمان، آمپر(A) برای جریان الکتریکی، درجه کلوین ($^{\circ}K$) برای دما و شمع (cd) برای شدت روشنایی (مقدار نور). در سال ۱۹۷۱، *CGPM*، هفتمین کمیت اصلی و واحد آن را اضافه کردند: مول (mol) که واحدی برای مقدار ماده است.

جدول ۱-۱ هفت کمیت اصلی و واحدهای آن در سیستم *SI*

Dimension	Unit
Length	meter (m)
Mass	kilogram (kg)
Time	second (s)
Temperature	kelvin (K)
Electric current	ampere (A)
Amount of light	candela (cd)
Amount of matter	mole (mol)

براساس طرح علامت‌گذاری که در سال ۱۹۶۷ ارائه شد، علامت درجه به صورت رسمی از واحد دمای مطلق برداشته شد و علامت همهٔ آحاد، حتی اگر از نام‌های خاص مشتق شده بودند، بدون حروف بزرگ نوشته شدند (جدول ۱-۱)، اما علامت اختصاری واحدها، اگر واحد از یک نام خاص به‌دست آمده باشد، به صورت حروف بزرگ نوشته می‌شود.

به عنوان مثال، واحد *SI* برای نیرو، که بعد از سر ایزاک نیوتن (۱۷۲۳-۱۶۴۷) نام‌گذاری شد، *newton* است (نه *Newton*) و مخفف آن *N* است. هم‌چنین اسم کامل واحد ممکن است جمع بسته شود اما علامت اختصاری آن جمع بسته نمی‌شود. به عنوان مثال، طول یک شیء 5*m* یا 5*meters* باشد اما نمی‌تواند 5*ms* یا 5*meter* باشد. سرانجام در مخفف ساختن یک واحد از هیچ تکراری استفاده نمی‌شود، مگر این‌که این واحدها در انتهای جمله ظاهر شوند. به عنوان مثال مخفف صحیح متر، *m* است (نه .*m*).

به نظر می‌رسد که تمایل به سمت سیستم متریک در ایالات متحده از سال ۱۹۶۸ آغاز شده است، زمانی که کنگره در پاسخ به آنچه در سایر نقاط جهان در حال رخ دادن بود، لایحهٔ مطالعهٔ سیستم متریک را تصویب کرد. با تصویب لایحهٔ تبدیل متریک در سال ۱۹۷۵، کنگره، ارتقاء داوطلبانه تبدیل به سیستم متریک را بسط داد. در سال ۱۹۸۸ توسط کنگره بودجه‌ای به این امر اختصاص یافت که سیستم واحدهای تمام مؤسسات تا سپتامبر ۱۹۹۲ باید به سیستم متریک تغییر یابد. در هر حال این الزام بدون هیچ طرحی برای آینده برداشته شد.

صنایعی که به شدت به تجارت بین المللی وابسته بودند (مانند صنایع خودروسازی، نوشابه‌سازی و کارخانه‌های مشروب سازی) به دلایل اقتصادی (داشتن طرح جهانی یکسان، تعداد اندازه‌های کمتر، ابداعات کمتر و غیره) سریعاً به استفاده از سیستم متریک روی آوردند.

امروزه تقریباً همهٔ اتومبیل‌هایی که در ایالات متحده تولید می‌شوند، بر اساس سیستم متریک هستند. احتمالاً اغلب دارندگان اتومبیل ممکن است این مسأله را تا زمانی که بخواهند یک پیچ متریک را با آچار سر پیچ اینچی باز کنند، درک نکنند. اغلب صنایع با مقاومت در برابر این

جدول ۱-۲ پیشوندهای استاندارد در واحدهای *SI*

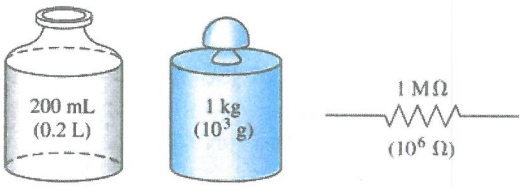
Multiple	Prefix
10^{12}	tera, T
10^{9}	giga, G
10^{6}	mega, M
10^{3}	kilo, k
10^{2}	hecto, h
10^{1}	deka, da
10^{-1}	deci, d
10^{-2}	centi, c
10^{-3}	milli, m
10^{-6}	micro, μ
10^{-9}	nano, n
10^{-12}	pico, p

تغییر، باعث کندشدن فرایند تبدیل شدند. در حال حاضر ایالات متحده یک جامعه دو سیستمی است و این موضوع تا زمانی که مرحله انتقال به سیستم متریک کامل شود به همین صورت باقی خواهد ماند. این موضوع یک بار اضافی بر دوش دانشجویان مهندسی تحمیل می‌کند، زیرا که از آنها انتظار می‌رود که اطلاعات خود را در مورد سیستم انگلیسی حفظ کنند، در حالی‌که یادگیری، تفکر و کار آنها روی سیستم *SI* است. در این مقطع، چون مهندسین در دورهٔ انتقال از سیستم انگلیسی به سیستم *SI* به سر می‌برند، در این کتاب از هر دو سیستم آحاد استفاده می‌شود، در حالی‌که تأکید ویژه‌ای روی سیستم *SI* است.

همان‌طور که قبلا ذکر شد، سیستم *SI* بر یک رابطهٔ دهدهی بین واحدها استوار شده است. فهرست پیشوندهای مورد استفاده برای بیان مضرب‌های واحدهای مختلف در جدول (۱-۲) ارائه شده‌اند. آنها برای همهٔ واحدها استاندارد هستند و به‌علت استفادهٔ گستردهٔ آنها، به دانشجویان توصیه می‌شود آنها را به‌خاطر بسپارند.

برخی از واحدهای SI و سیستم انگلیسی

در سیستم *SI* واحد جرم، طول و زمان به ترتیب کیلوگرم (*kg*)، متر(*m*) و ثانیه(*s*) است. واحدهای معادل در سیستم انگلیسی پوند- جرم (*lbm*)، فوت (*ft*) و ثانیه(*s*) هستند. علامت پوند،*lb*، مخفف شدهٔ لغت *libra* است که یک واحد وزن روم باستان بود. انگلیسی‌ها این علامت را حتی بعد از رفع اشغال انگلیس توسط رومی‌ها در سال ۴۱۰ نگه داشتند.



شکل ۱-۲۶ در همه شاخه‌های مهندسی از واحدهای *SI* استفاده می‌کنند.

جرم و طول در این دو سیستم به وسیله روابط زیر به هم تبدیل می‌شوند:

$$۱\ lbm = ۰/۴۵۳۵۹\ kg$$
$$۱\ ft = ۰/۳۰۴۸\ m$$

در سیستم انگلیسی، نیرو معمولاً به صورت یکی از ابعاد اصلی مورد توجه قرار می‌گیرد و یک واحد مشتق شده نیست. این کار منشأ سردرگمی و خطاست که استفاده از ثابت ابعادی (g_c) در بسیاری از فرمول‌ها را ضروری می‌سازد. برای اجتناب از این دردسر، نیرو را به صورت یکی از ابعاد ثانویه مورد توجه قرار می‌دهیم که واحد آن از قانون دوم نیوتن به‌دست می‌آید، یعنی:

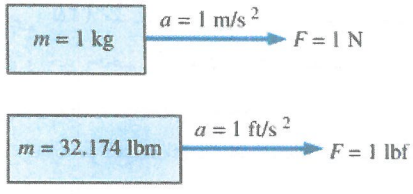
شتاب × جرم = نیرو

یا

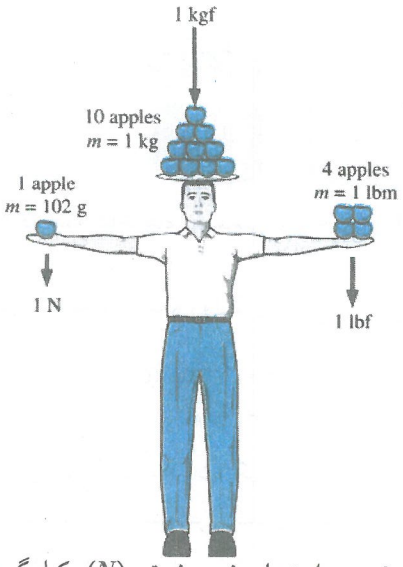
$$F = ma \qquad (۱-۱)$$

در سیستم *SI* واحد نیرو، نیوتن است (N) که نیروی لازم برای شتاب دادن جرم $۱\ kg$ به میزان $۱ m/s^۲$ می‌باشد. در سیستم انگلیسی، واحد نیرو، پوند-نیرو (lbf) است که نیرویی است که به جرم $۳۲/۱۷۴\ lbm$ ($۱ slug$) شتاب $۱ ft/s^۲$ می‌دهد (شکل ۱-۲۷).
که

$$۱N = ۱kg.m/s^۲$$
$$۱lbf = ۳۲/۱۷۴\ lbm.ft/s^۲$$



شکل ۱-۲۷ تعریف واحدهای نیرو



شکل ۱-۲۸ نمایش مقادیر نسبی واحدهای نیرو، نیوتن (N)، کیلوگرم نیرو (kgf) و پوند نیرو (lbf).

همان‌گونه که در شکل ۱-۲۸ نشان داده شده است، نیروی $1N$، تقریباً معادل وزن یک سیب کوچک ($m=102g$) است، در حالی‌که نیروی $1\ lbf$ تقریباً معادل وزن چهار سیب متوسط ($m_{total}=454g$) است.

واحد متعارف دیگر نیرو که در بسیاری از کشورهای اروپایی استفاده می‌شود، کیلوگرم-نیرو (kgf) است، که وزن یک کیلوگرم جرم در سطح دریاست ($1kgf=9.807\ N$).

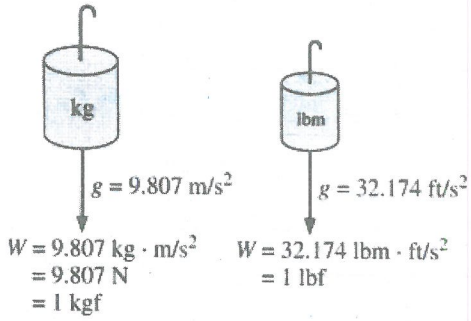
اصطلاح وزن اغلب به صورت اشتباه، مخصوصاً به‌وسیله توزین کننده‌ها، برای بیان جرم استفاده می‌شود. بر خلاف جرم، وزن W، نیرو است. وزن، نیروی جاذبه اعمالی از طرف زمین به یک جسم است و مقدار آن طبق معادله‌ای مبتنی بر قانون دوم نیوتن تعیین می‌شود،

$$W=mg \qquad (N) \tag{۱-۲}$$

که m جرم جسم، g شتاب ثقل موضعی (g مساوی $9.807\ m/s^2$ یا $32.174\ ft/s^2$ در سطح دریا و عرض جغرافیایی 45°) است. یک ترازوی خانگی معمولی نیروی ثقل وارد به جسم را اندازه می‌گیرد. وزن واحد حجم یک ماده وزن مخصوص γ نامیده می‌شود که از رابطه $\gamma=\rho g$ به‌دست می‌آید که ρ چگالی است.

جرم یک جسم بدون توجه به موقعیت آن در هر نقطه از جهان ثابت باقی می‌ماند، اما وزن آن با تغییر شتاب ثقل تغییر می‌کند. وزن یک جسم در قله یک کوه به‌علت کم شدن g با

شکل ۱-۲۹ شخصی که بر روی سطح زمین ۱۵۰ lbf وزن دارد، در سطح کره ماه ۲۵ lbf وزن خواهد داشت.



شکل ۱-۳۰ وزن واحد جرم در سطح دریا

ارتفاع، کمتر می‌شود. وزن یک فضانورد در سطح ماه حدود یک ششم وزن آن در سطح زمین است (شکل ۱-۲۹).

در سطح دریا، مطابق آنچه در شکل ۱-۳۰ بیان شده است، جرم ۱ kg وزنی معادل ۹٫۸۰۷ N را داراست. در هر حال جرم ۱ lbm وزنی معادل ۱ lbf را داراست، که با به اشتباه انداختن مردم باعث می‌شود که پوند- جرم و پوند- نیرو را یکی بدانند و به‌جای هر دو از پوند (lb) استفاده می‌کنند که منشأ بزرگ خطا در سیستم انگلیسی است.

می‌دانیم که نیروی جاذبه وارد بر یک جرم، ناشی از جاذبه بین اجرام است و بنابراین با مقدار جرم‌ها متناسب بوده و با مجذور فاصله بین آنها رابطه عکس دارد. بنابراین شتاب ثقل g در یک مکان به چگالی موضعی پوسته زمین، فاصله تا مرکز کره زمین و تا حدودی به موقعیت

ماه و خورشید بستگی دارد. مقدار g از $۹/۸۲۹۵ m/s^۲$ در فاصله ۴۵۰۰ متر زیر سطح دریا تا $۷/۳۲۱۸ m/s^۲$ در فاصله ۱۰۰,۰۰۰ متری بالای سطح دریا تغییر می‌کند. در هر حال در ارتفاعات تا ۳۰۰۰۰ متر تغییرات g از مقدار آن در سطح دریا کمتر از یک درصد است. بنابراین در اغلب کارهای تجربی، برای شتاب ثقل، مقدار ثابت $۹/۸۱ m/s^۲$ فرض می‌شود. جالب توجه است که در زیر سطح دریا، مقدار g با فاصله از سطح دریا افزایش می‌یابد و به مقدار ماکزیمم خود در ۴۵۰۰ متری می‌رسد و سپس شروع به کاهش می‌کند.(فکر می‌کنید که مقدار g در مرکز زمین چقدر است؟)

دلیل اصلی سردرگمی میان جرم و وزن این است که معمولاً جرم به صورت غیر مستقیم با اندازه‌گیری نیروی ثقل وارده معین می‌شود. در این روش، از اثرات دیگر مانند اثر شناوری هوا و حرکت سیال صرف‌نظر می‌شود. این امر مشابه تعیین فاصله ستاره‌ها با اندازه‌گیری تغییر رنگ آنها و یا تعیین ارتفاع هواپیما به‌وسیله اندازه‌گیری فشار بارومتر است. هر دوی آنها اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم هستند. روش صحیح اندازه‌گیری مستقیم جرم، مقایسه آن با یک جرم مشخص است. در هر حال این روش مشکل و طاقت فرسا بوده و اغلب برای کالیبراسیون و اندازه‌گیری فلزات با ارزش استفاده می‌شود.

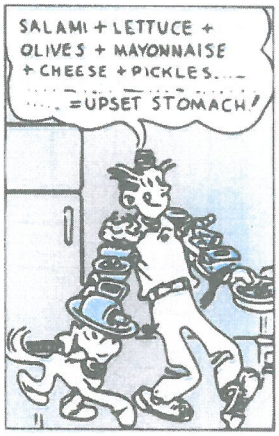
کار که شکلی از انرژی است به صورت ساده، نیرو ضربدر جابه‌جایی تعریف می‌شود. بنابراین واحد آن نیوتن ـ متر $(N.m)$ است، که ژول (J) نامیده می‌شود:

$$۱J = ۱N.m \qquad (۳-۱)$$

معمول‌ترین واحد برای انرژی در سیستم SI کیلوژول است ($۱kJ = ۱۰^۳ J$). در سیستم انگلیسی، واحد انرژی Btu است، (واحد گرمای انگلیسی) که انرژی مورد نیاز برای افزایش دمای $۱lbm$ آب در دمای $۶۸^\circ F$ به اندازه $۱^\circ F$ است. در سیستم متریک مقدار انرژی لازم برای افزایش دمای $۱g$ آب در دمای $۱۴/۵^\circ C$ به اندازهٔ $۱^\circ C$ را کالری می‌نامند و $۱cal = ۴/۱۸۶۸ J$. مقادیر کیلو ژول و Btu تقریباً یکسان هستند. $(۱Btu = ۱/۰۵۵۱kJ)$

همگنی ابعادی

همه ما از دوران مدرسه به یاد داریم که سیب‌ها و پرتقال‌ها با یکدیگر قابل جمع نیستند، اما گاهی اوقات ما آن را انجام می‌دهیم (البته، به اشتباه). در مهندسی همه معادلات باید از نظر ابعادی هماهنگ باشند. یعنی، همه عبارات در یک معادله باید دارای واحدهای یکسان باشند (شکل ۱-۳۱). اگر در مرحله‌ای از یک تجزیه و تحلیل ببینیم که داریم دو کمیت با واحدهای متفاوت را با هم جمع می‌کنیم، مسلماً در یکی از مراحل قبلی مرتکب اشتباهی شده‌ایم، پس وارسی واحدها ابزار ارزشمندی برای کشف اشتباهات است.



شکل ۱-۳۱ برای برقراری همگنی ابعادی، تمام جمله‌های یک معادله باید دارای واحد مشابهی باشند.

مثال ۱-۲ پیدا کردن خطاهای ناشی از ناسازگاری ابعادی

در طی حل یک مسأله، شخصی با معادله زیر مواجه شده است:

$$E = ۲۵\,kJ + ۷\,kJ/kg$$

که E انرژی کل می‌باشد و واحد آن کیلو ژول است. تعیین کنید که چگونه خطا را تصحیح کنیم و در مورد عامل ایجاد آن بحث کنید.

حل: در طول تحلیل، رابطه‌ای با واحدهای ناسازگار حاصل شده است. هدف تصحیح مسأله و تعیین علت احتمالی ایجاد خطاست.

تجزیه و تحلیل: دو عبارت در سمت راست، واحدهای یکسان ندارند، پس نمی‌توانند با هم جمع شده و انرژی کل را بدهند. با ضرب عبارت آخر در جرم، کیلوگرم مخرج حذف شده و کل معادله از لحاظ ابعادی همگن می‌شود، یعنی هر جمله معادله واحد یکسانی پیدا می‌کند.

بحث: واضح است که این خطا ناشی از فراموش کردن ضرب جمله آخر در جرم بوده که در مرحله قبل‌تر رخ داده است.

همه ما از تجارب خود می‌دانیم که اگر واحدها در حل یک مسأله به دقت رعایت نشوند، باعث دردسرهای فراوانی می‌شوند. در هر حال، با قدری توجه و مهارت، واحدهای مناسب را می‌توان به‌کار برد. از آنها می‌توان برای چک کردن فرمول‌ها و یا برای به‌دست آوردن فرمول‌ها مطابق مثال زیر استفاده کرد.

مثال ۱-۳ به‌دست آوردن فرمول‌ها با توجه به ملاحظات مربوط به واحدها

مخزنی حاوی روغن با چگالی $\rho = 850\, kg/m^3$ است. اگر حجم مخزن $\forall = 2\, m^3$ باشد، مقدار جرم موجود در آن را به‌دست آورید.

حل: حجم مخزن روغن داده شده است و جرم روغن باید تعیین شود.

فرضیات: روغن ماده‌ای تراکم ناپذیر است و بنابراین چگالی آن ثابت است.

تجزیه و تحلیل: طرحی از سیستم در شکل ۱-۳۲ نشان داده شده است.

فرض کنید فرمولی را که جرم، چگالی و حجم را به‌هم ارتباط می‌دهد، فراموش کرده‌ایم. با این وجود می‌دانیم واحد جرم کیلوگرم است، یعنی، در نهایت با انجام محاسبات می‌باید واحد جرم را کیلوگرم به‌دست آوریم. با قرار دادن اطلاعات در یک کادر، داریم:

$$\rho = 850\, kg/m^3 \qquad \text{و} \qquad \forall = 2\, m^3$$

واضح است که با ضرب دو کمیت می‌توان m^3 را حذف کرد و با kg به مسأله خاتمه داد. بنابراین فرمولی که به‌دنبال آن می‌گردیم به صورت زیر است:

$$m = \rho \forall$$

بنابراین

$$m = (850\ kg/m^3)(2\, m^3) = 1700\, kg$$

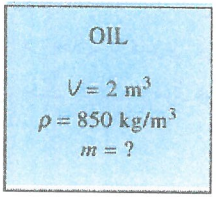
بحث: توجه کنید که این روش ممکن است برای فرمول‌های پیچیده کار نکند.

دانشجو باید به‌خاطر داشته باشد که فرمول‌هایی که از لحاظ ابعادی همگن نیستند، به‌طور قطع غلط هستند، اما فرمولی که از لحاظ ابعادی همگن است، لزوماً صحیح نمی‌باشد.

نسبت‌های تبدیل واحد

همان‌طور که همهٔ ابعاد غیر اصلی می‌توانند از ترکیبات مناسب ابعاد اولیه به‌وجود آیند، همهٔ واحدهای غیر اصلی (ثانویه) نیز می‌توانند از ترکیب واحدهای اولیه تشکیل شوند. به عنوان مثال واحدهای نیرو به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$N = kg\frac{m}{s^2} \qquad \text{و} \qquad lbf = 32.174\, lbm\frac{ft}{s^2}$$



شکل ۱-۳۲ تصویری برای مثال ۱-۳

این دو واحد را می‌توان به صورت راحت‌تر، توسط نسبت‌های تبدیل واحد بیان کرد:

$$\frac{lbf}{۳۲٫۱۷۴\, lbm\,.ft/s^۲}=۱ \qquad \text{و} \qquad \frac{N}{kg.m/s^۲}=۱$$

نسبت‌های تبدیل واحد به طور مشابه مساوی ۱ و بدون واحد شدند، بنابراین چنین نسبت‌هایی (یا عکس آنها) به صورت مناسبی در هر محاسبه‌ای، برای تبدیل صحیح واحدها مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دانشجویان توصیه می‌شود که در هنگام تبدیل واحدها از نسبت تبدیل‌های واحد، مانند آنچه در بالا گفته شد استفاده نمایند. بعضی کتاب‌ها ثابت ثقل قدیمی(g_c) را به صورت $g_c = ۳۲٫۱۷۴\ lbm.ft/lbf.s^۲ = kg.m/N.s^۲ = ۱$ در نظر گرفته و برای تطبیق واحدهای نیرو، در معادلات قرار می‌دهند. این شیوه کار منجر به سردرگمی‌غیرلازم می‌شود و به شدت توسط نویسندگان حاضر از آن پرهیز می‌شود. توصیه می‌کنیم که دانشجویان از نسبت‌های تبدیل واحد استفاده کنند.

مثال ۱-۴ وزن یک پوند- جرم

با استفاده از نسبت‌های تبدیل واحد، نشان دهید که وزن lbm ۱ روی سطح زمین معادل lbf ۱ است (شکل ۱-۳۳).

حل: جرم lbm ۱ در معرض جاذبه استاندارد زمین قرار دارد و وزن آن باید به lbf تعیین شود.

فرضیات: شرایط در سطح دریا استاندارد فرض شود.

خواص: ثابت ثقل $g = ۳۲٫۱۷۴\ ft/s^۲$ است.

تجزیه و تحلیل: برای محاسبهٔ نیروی وزن، با معلوم بودن جرم و شتاب، قانون دوم نیوتن را به‌کار می‌بریم. وزن هر جسم، مساوی حاصل ضرب جرم آن در مقدار شتاب جاذبه محلی

شکل ۱-۳۳ جسمی به جرم lbm ۱ دارای وزن blf ۱ است.

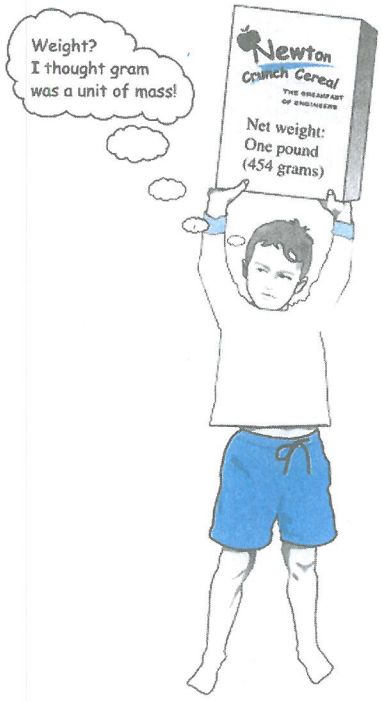
است. بنابراین:

$$W = mg = (۱ lbm)(۳۲٫۱۷۴ ft/s^۲)\left(\frac{۱ lbf}{۳۲٫۱۷۴ lbm.ft/s^۲}\right) = ۱ lbf$$

بحث: جرم یک جسم صرف‌نظر از موقعیت مکانی آن همواره ثابت است. در هر حال در سیارات دیگر که شتاب ثقل متفاوت است، وزن $۱ lbm$ با آنچه اینجا محاسبه می‌شود، فرق دارد.

هنگامی‌که شما یک جعبه ذرت پرک شده برای صبحانه می‌خرید، ممکن است نوشته روی آن بگوید: وزن خالص یک پوند (۴۵۴ گرم). (شکل ۱-۳۴ را ببینید). از نظر فنی معنی نوشته این است که وزن غله داخل جعبه روی زمین $۱ lbf$ است که جرم آن $۴۵۳٫۶ mg$ $(۰٫۴۵۳۶ kg)$ می‌باشد. با استفاده از قانون دوم نیوتن، وزن واقعی روی زمین در سیستم متریک به صورت زیر است:

$$W = mg = (۴۵۳٫۶ g)(۹٫۸۱ m/s^۲)\left(\frac{۱ N}{۱ kg.m/s^۲}\right)\left(\frac{۱ kg}{۱۰۰۰ g}\right) = ۴٫۴۹ N$$



شکل ۱-۳۴ ابهام در سیستم واحدهای متریک

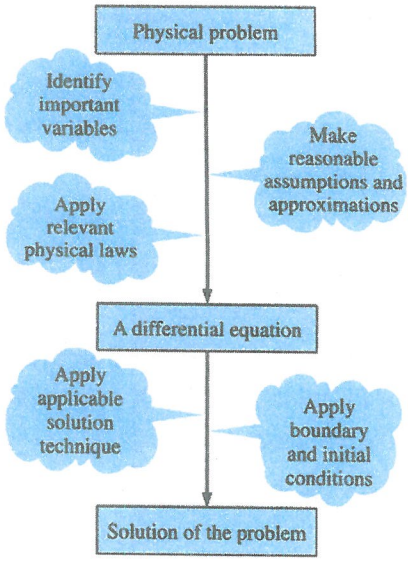
۱-۷ مدل‌سازی ریاضی مسائل مهندسی

یک دستگاه یا فرایند مهندسی به صورت تجربی (آزمایش و اندازه‌گیری‌ها) یا به صورت تحلیلی (تجزیه و تحلیل و محاسبات) می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد. مزیت روش تجربی این است که ما با یک سیستم فیزیکی واقعی سروکار داریم و کمیت مطلوب با در نظر گرفتن محدودیت‌های خطای آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شود. در هر حال این روش گران، وقت‌گیر و غالباً غیر عملی است. گذشته از این، سیستم مورد مطالعه حتی ممکن است وجود هم نداشته باشد. به عنوان مثال سیستم‌های گرمایش و لوله کشی کلی یک ساختمان، اغلب قبل از این‌که ساختمان ساخته شود، براساس مشخصات داده شده باید انتخاب شوند. مزایای روش تحلیلی (که شامل روش عددی هم است)، سریع و ارزان بودن آن است، اما نتایج به‌دست آمده، به‌علت فرضیات، تخمین‌ها و ایده‌آل‌سازی‌های انجام گرفته در تجزیه و تحلیل دقت روش تجربی را ندارند. در مطالعات مهندسی، معمولاً سازشی بدین صورت انجام می‌گیرد که ابتدا با روش‌های تحلیلی بررسی‌های لازم را در حد ممکن انجام داده و سپس آزمایش‌های لازم را جهت تکمیل نتایج انجام می‌دهیم.

مدل‌سازی در مهندسی

توصیف اکثر مسائل علمی‌شامل معادلاتی است که تغییرات مربوط به بعضی از متغیرهای کلیدی را به دیگر متغیرها مربوط می‌کند. معمولاً انتخاب گام‌های کوچک‌تر مرتبط با پارامترهای در حال تغییر، توصیف دقیق‌تر و عام‌تری را به دنبال خواهد داشت. در حالت حدی، با تغییرات دیفرانسیلی یا بی‌نهایت کوچک متغیرها، معادلات دیفرانسیلی را به‌دست می‌آوریم که با بیان نرخ متغیرها به صورت مشتقات، فرمول‌های ریاضی دقیقی برای اصول و قوانین فیزیکی ایجاد می‌شود. بنابراین از معادلات دیفرانسیلی برای بررسی طیف وسیعی از مسائل مهندسی و علوم استفاده می‌شود (شکل ۱-۳۵). گرچه، بسیاری از مسائلی که در عمل با آنها مواجه می‌شویم را بدون استفاده از معادلات دیفرانسیل و پیچیدگی مرتبط با آنها می‌توان حل کرد.

مطالعه پدیده فیزیکی شامل دو مرحله مهم است. در مرحله اول، همه متغیرهای مؤثر بر پدیده شناسایی می‌شوند، سپس فرضیات و تخمین‌های مستدل اتخاذ شده و وابستگی متغیرها به هم مورد مطالعه قرار می‌گیرد. قوانین و اصول فیزیکی مرتبط فراخوانده شده و مسأله به صورت ریاضی فرمول‌بندی می‌شود. معادلات خود، نشان دهنده درجه وابستگی بعضی متغیرها به یکدیگر و اهمیت نسبی جمله‌های مختلف می‌باشند. در مرحله دوم، با استفاده از روش مناسبی مسأله را حل کرده و نتایج مورد تفسیر قرار می‌گیرند.



شکل ۱-۳۵ مدل‌سازی ریاضی یک مسأله فیزیکی

در واقع بسیاری از فرایندهایی که به نظر می‌رسد که در طبیعت به صورت اتفاقی و بدون هیچ نظمی روی می‌دهند، با بعضی قوانین فیزیکی قابل مشاهده یا غیرقابل مشاهده قابل تبیین هستند. خواه ما به این قوانین توجه کنیم یا نه، آنها روی پدیده‌هایی که به نظر حوادث معمولی می‌آیند، قابل اعمال بوده و با آنها سازگاری دارند.

اغلب این قوانین توسط دانشمندان به خوبی فهمیده و تعریف شده‌اند. این امر پیش‌بینی مسیر یک واقعه قبل از وقوع آن و یا مطالعه جنبه‌های مختلف یک حادثه به صورت ریاضی و بدون انجام آزمایش‌های وقت‌گیر و گران را محقق می‌سازد. این همان قدرت عملیاتی تحلیلی است که باید مدنظر قرار داد. با تلاش اندک و استفاده از مدل ریاضی مناسب و واقعی می‌توان نتایج بسیار دقیقی برای مسائل تجربی با معنی به‌دست آورد. تهیه چنین مدل‌هایی احتیاج به دانش مناسب از پدیده طبیعی و قوانین مربوط به همراه یک قضاوت صحیح دارد. یک مدل غیر واقعی، به‌وضوح نتایج غیرقابل قبول و غیر دقیقی به‌ما خواهد داد.

یک تحلیل‌گر در هنگام کار روی یک مسأله مهندسی، خود را در موقعیتی می‌بیند که باید بین یک مدل خیلی دقیق و پیچیده و یک مدل ساده اما نه چندان دقیق، یکی را انتخاب کند. انتخاب درست به امکانات موجود بستگی دارد. انتخاب درست، معمولاً ساده‌ترین مدلی است که منجر به نتایج رضایت‌بخشی می‌شود. هم‌چنین توجه به شرایط کاری واقعی در هنگام انتخاب تجهیزات مهم است.

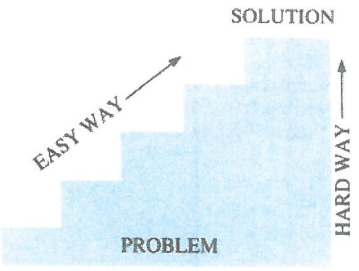
معمولاً انتخاب مدل‌های دقیق اما پیچیده کار دشواری نیست. ولی چنین مدل‌هایی اگر خیلی مشکل و حل آنها وقت‌گیر باشد، برای تجزیه و تحلیل، استفاده چندانی ندارند. حداقل لازم در یک مدل این است که مدل باید گویای مسأله فیزیکی مورد نظر باشد. در دنیا مسائل واقعی بسیاری وجود دارند که با یک مدل ساده تحلیل می‌شوند، اما همواره این را باید در نظر داشت که نتایج به‌دست آمده از یک تحلیل با توجه به فرضیات انتخاب شده، بهترین جواب‌ها هستند. بنابراین، نتایج حاصل نباید برای شرایطی که فرضیات آنها متفاوت است به‌کار روند. نتایج حلی که با طبیعت فیزیکی مسأله سازگار نباشد، نشان دهندهٔ خام بودن بیش از حد مدل ریاضی مربوطه است. در چنین حالتی از یک مدل واقعی‌تر باید استفاده کرد که یک یا تعدادی از فرضیات سؤال برانگیز آن حذف شوند. البته این منجر به مسأله پیچیده‌ای می‌شود که حل آن نیز دشوار خواهد شد. بنابراین حل هر مسأله با توجه به زمینه و فرمول‌بندی آن باید مورد توجه قرار گیرد.

۱-۸ روش‌های حل مسأله

اولین گام در یادگیری هر علمی، درک پایه‌های آن علم و به‌دست آوردن اطلاعات کلی و جامع در مورد آن است. قدم بعدی، کسب مهارت از طریق آزمودن این اطلاعات است. این امر با حل مسائل بی شمار دنیای واقعی تحقق می‌یابد. حل چنین مسائلی، مخصوصاً موارد پیچیده آن، نیاز به یک روش سیستماتیک دارد. با استفاده از روش گام به گام، یک مهندس قادر است تا یک مسأله پیچیده را به یک سری مسائل ساده کاهش دهد (شکل ۱-۳۶). هنگامی‌که یک مسأله خاص را حل می‌کنید، توصیه می‌کنیم که با اشتیاق همه این مراحل را دنبال کنید، این به شما کمک می‌کند که از بعضی از ناکاستی‌های معمول مرتبط با حل مسأله پرهیز کنید.

مرحلهٔ ۱ : بیان مسأله

با بیان خودتان، صورت مسأله، اطلاعات کلیدی داده شده و کمیت‌های مورد نیاز را به اختصار بیان کنید. این شما را مطمئن می‌کند که پیش از شروع حل، مسأله و اهداف آن را بفهمید.



شکل ۱-۳۶ یک روش گام به گام می‌تواند حل یک مسأله را به شدت آسان نماید.

مرحلهٔ ۲ : ترسیم

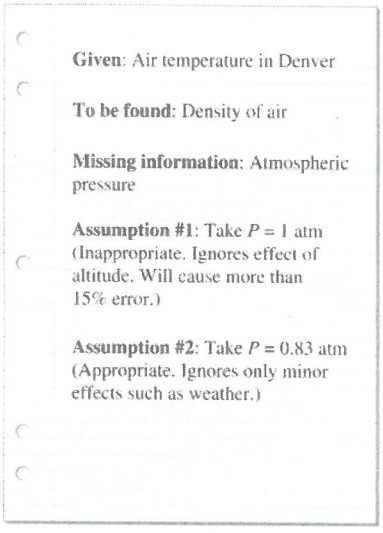
یک تصویر واقعی از مسأله فیزیکی رسم کنید و اطلاعات مربوطه را روی شـکل نشـان دهیـد. لازم نیست که شکل رسم شده بسیار ماهرانه باشد، بلکه باید شبیه سیستم واقعی بوده و مـوارد کلیدی را در بر گیرد. هرگونه تبادل جرم و انـرژی بـا محـیط را نشـان دهیـد. فهرسـت کـردن اطلاعات روی شکل به شما کمک می‌کند که کل مسأله را یک‌باره ببینید، هم‌چنین خواصـی را که در یک فرایند ثابت هستند چک کنید، (مانند دما در طی یک فراینـد دمـا ثابـت) و آنهـا را روی شکل نشان دهید.

مرحلهٔ ۳ : فرضیات و تخمین‌ها

تمام فرضیات مناسب و تخمین‌هایی که مسأله را ساده‌تر کرده و حل آن‌را میسر می‌سازد، ذکـر کنید. فرضیات سؤال برانگیز را توجیه کنید. مقادیر مناسبی برای کمیت‌های نامعلوم مـورد نیـاز فرض کنید. برای مثال، اگر فشار هوا معلوم نباشد، آن را $1 atm$ می‌توان در نظر گرفت. در هـر حال در هنگام تجزیه و تحلیل، باید توجه داشت که فشار اتمسـفر بـا افـزایش ارتفـاع کـاهش می‌یابد. برای مثال در دنور(ارتفاع $1610 m$)، فشار اتمسفر، به $0.83 atm$ کاهش می‌یابد (شکل ۱-۳۷).

مرحلهٔ ۴ : قوانین فیزیکی

تمام قوانین و اصول اساس فیزیکی مرتبط با مسأله (ماننـد قـانون بقـای جـرم) را نوشـته و بـا استفاده از فرضیات به‌کار رفته، آنها را به ساده‌ترین شکل ممکن در آورید. در هر حال ناحیه‌ای



شکل ۱-۳۷ فرضیات انجام شده در حل یک مسأله مهندسی باید معقول و منطقی باشند.

که قانون فیزیکی برای آن به‌کار می‌رود باید در ابتدا کاملاً مشخص شود. برای مثال افزایش سرعت آب خروجی از شیپوره را با به‌کاربردن قانون بقای جرم بین ورودی و خروجی آن می‌توان تحلیل کرد.

مرحلهٔ ۵ : خواص

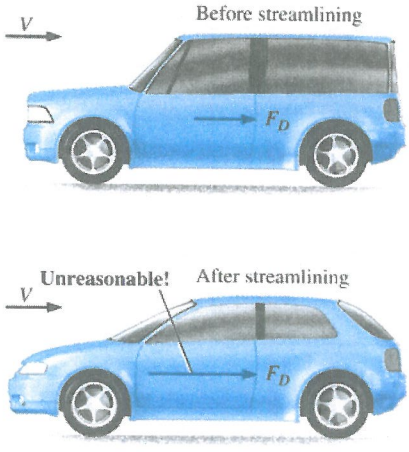
از جداول و روابط مربوط به خواص، خواص نامعلومی‌که برای حل مسأله در حالات مشخص لازم است را به‌دست آورید. این خواص را به طور جداگانه فهرست‌بندی کنید و منابع مورد نیاز را در صورت در دسترس بودن مشخص کنید.

مرحلهٔ ۶ : محاسبات

کمیت‌های معلوم را در روابط ساده شده جایگزین کنید تا مجهولات به‌دست آیند. توجه ویژه به واحدها داشته و به حذف واحدها هم توجه کرده و به‌یاد داشته باشید که کمیت با بعد بدون واحد بی‌معنی است. تمام اعداد بعد از ممیز ظاهر شده در صفحه نمایش ماشین حساب را در نظر نگیرید، زیرا اینها دلیل بر دقت بالا نیستند و نتایج به‌دست آمده را تا چند رقم اعشار معین گرد کنید.

مرحلهٔ ۷ : استدلال، تأیید و بحث

مطمئن شوید که نتایج حاصل منطقی و قابل قبول‌اند و اعتبار فرضیات قابل بحث را تأیید کنید. برای نتایج نامعقول محاسبات را تکرار کنید. به عنوان مثال، تحت شرایط یکسان، نیروی پسای آیرودینامیکی وارده به یک اتومبیل نباید بعد از خط جریانی کردن شکل (دوکی کردن) اتومبیل افزایش یابد (شکل ۱–۳۸).



شکل ۱–۳۸ نتایج حاصل از یک تحلیل مهندسی را از نقطه‌نظر منطقی بودن باید چک کرد.

هم‌چنین، اهمیت جواب‌های حاصل را ارزیابی نموده و در مورد آنها بحث کنید. نتیجه‌گیری‌ها و پیشنهاداتی که از آن نتایج به‌دست می‌آیند را بیان کنید. روی محدودیت‌هایی که برای به‌دست آمدن نتایج مورد استفاده قرار گرفته است تأکید کرده و در مورد هرگونه سوء تفاهم ممکن و استفاده از نتایج در موقعیت‌هایی که فرضیات به‌کار برده شده صحیح نمی‌باشد، هشدار دهید. برای مثال اگر برای تجهیز یک خط لوله، از لوله‌ای با قطر زیاد استفاده می‌کنید که هزینه اضافی لوله‌های بزرگ‌تر در حدود ۵۰۰۰ دلار است و هزینه‌های پمپاژ سالیانه با استفاده از لوله‌های قطور ۳۰۰۰ دلار تنزل می‌یابد، این امر حاکی از آن است که با استفاده از لوله‌های با قطر زیاد مابه‌التفاوت هزینه آن در کمتر از دوسال از طریق مصرف کمتر برق جبران می‌شود. البته در این تجزیه و تحلیل فقط هزینه‌های مرتبط با لوله بزرگ‌تر برای خط لوله لحاظ شده است.

به یاد داشته باشید که راه‌حل‌هایی که شما به معلمتان می‌دهید و یا هر تحلیل مهندسی که به دیگران ارائه می‌کنید، نوعی از یک ارتباط است. بنابراین، سادگی، پاکیزگی، سازماندهی و شمای ظاهری برای کارایی حداکثر، دارای بیشترین درجه اهمیت است. علاوه بر این، آراستگی به عنوان یک ابزار تصحیح کننده مهم عمل کرده و از خطاها و ناسازگاری‌ها جلوگیری می‌کند. بی‌دقتی و حذف مراحل برای صرفه‌جویی در وقت، در نهایت به هزینه زمانی بیشتر منجر شده و نگرانی‌های غیر لازم را همراه دارد.

از دیدگاه بیان شده در اینجا، در مسائل حل شده و حل المسائل این کتاب، بدون بیان صریح آنها استفاده شده است. برای بعضی مسائل، ممکن است بعضی مراحل غیر ضروری باشد. به عنوان مثال، اغلب فهرست کردن خواص به‌صورت مجزا، لازم نیست. با این وجود، بیش از این بر اهمیت روش منظم و منطقی برای حل مسأله تأکید نمی‌کنیم. اغلب دشواری‌هایی که در حل مسائل با آن مواجه می‌شویم، ناشی از کمبود اطلاعات نیست، بلکه بیشتر به ضعف برنامه‌ریزی مربوط است. به شما شدیداً توصیه می‌شود که مراحل یاد شده را در حل مسائل تا زمانی که شخصاً راه خاص خود را پیدا نکرده‌اید، مورد استفاده قرار دهید.

۱-۹ بسته‌های نرم افزاری مهندسی

شاید تعجب کنید که چرا به مطالعه عمیق و گسترده اصول علم مهندسی دیگری می‌پردازیم. با این همه، تقریباً تمام مسائلی که در عمل پیش می‌آیند را با استفاده از تعدادی نرم افزار تجاری می‌توان حل کرد. این نرم‌افزارها نه تنها نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند، بلکه خروجی‌های آنها در شکل‌های رنگی قابل ارائه هستند. امروزه، حل مسائل مهندسی بدون استفاده از این نرم افزارها، تقریباً غیر قابل تصور است. این قدرت محاسباتی فوق‌العاده‌ای که با فشار یک دکمه در اختیار ماست، همراه با سود و زیان است. مطمئناً این

نرم‌افزارها، مسائل را برای مهندسین ساده و سریع حل می‌کنند. اما از یک طرف دریچه‌ای برای سوء استفاده و گمراهی باز می‌کنند. این بسته‌های نرم افزاری، اگر در دست افراد بی‌سواد قرار گیرند، مانند خطر سلاح‌های پیشرفتهٔ خطرناکی است که در دست سربازان آموزش ندیده قرار گیرند.

فکر این‌که یک نفر بدون آموزش صحیح اصولی که یک مهندس آموزش دیده است، بتواند از این بسته‌های نرم افزاری استفاده کند، مانند فکر این است که یک نفر آچار به‌دست بتواند از یک آچار مانند یک مکانیک اتومبیل استفاده کند. اگر این موضوع که دانشجویان مهندسی احتیاج به همهٔ دوره‌های اساسی که می‌گذرانند ندارند و می‌توانند هر چیزی را به آسانی و به سرعت توسط کامپیوترها حل کنند، صحیح باشد، این نیز صحیح است که کارفرمایان احتیاج به مهندسین با حقوق بالا ندارند. چون هر کسی که بتواند از یک برنامه پردازش لغت استفاده کند، باید بتواند از این بسته‌های نرم افزاری هم استفاده کند. در هر حال آمارها نشان می‌دهد که با وجود در دسترس بودن این بسته‌های قدرتمند، احتیاج به مهندسین رو به افزایش است. همیشه باید به یاد داشته باشیم که همه توان محاسباتی و نرم افزاری مهندسی موجود امروزی تنها نوعی ابزار هستند و ابزارها هنگامی‌که در دست کاردان‌ها قرار گیرند، مفید هستند. داشتن بهترین برنامه پردازشگر لغات، یک نویسنده خوب را ایجاد نمی‌کند، اما مطمئناً کار یک نویسنده خوب را بسیار آسان‌تر کرده و حاصل کار او را پربارتر می‌کند (شکل ۱-۳۹) . وجود ماشین‌های حساب جدید، به این معنی نیست که دیگر فرزندان ما نیازی به یادگیری جمع و تفریق ندارند، همین‌طور وجود بسته‌های نرم افزاری پزشکی پیچیده، به معنای نفی آموزش در دانشکده‌های پزشکی نیست.

شکل ۱-۳۹ یک نرم‌افزار مربوط به نوشتن، هرگز فرد را یک نویسنده خوب نمی‌کند، بلکه یک نویسنده خوب را یک نویسنده کارآمد می‌نماید.

به همین ترتیب وجود نرم افزاری مهندسی، جایگزین تعلیم مهندسی سنتی نمی‌شود. آنها با ایجاد یک حرکت در دوره‌های آموزشی از ریاضی به فیزیک باعث ساده‌سازی می‌شوند. یعنی در کلاس درسی وقت بیشتری صرف جنبه‌های فیزیکی مسأله با جزئیات بیشتر خواهد شد و زمان کمتری صرف تبیین روندهای حل مکانیکی می‌شود.

تمام ابزارهای قدرتمند و شگفت انگیز موجود، بار اضافی را بر دوش مهندسین امروزی گذاشته‌اند. آنها باید علاوه بر فهمیدن اصول، دارای احساس لازم روی یک پدیده فیزیکی بوده و توانایی قرار دادن اطلاعات در یک چشم‌انداز صحیح را داشته و درست مانند یک پیشینگان ایجاد قضاوت مهندسی صحیح بنماید. در هر حال، آنها با استفاده از مدل‌های واقعی‌تر، به‌خاطر داشتن ابزارهای قدرتمند امروزی این کار را باید بهتر انجام دهند. در گذشته مهندسین باید به محاسبات دستی، خط‌کش‌های محاسبه و بعداً ماشین‌های حساب دستی و کامپیوترها اتکاء می‌کردند. امروزه آنها به بسته‌های نرم افزاری اعتماد می‌کنند. دسترسی آسان به چنین قدرتی و امکان این‌که به‌سادگی دچار سوء فهم و سوء تعبیر شویم که تبعات زیان‌باری دارد ما را بیشتر از هر زمانی ملزم به یادگیری صحیح اصول مهندسی می‌کند.

در این کتاب، تلاش مضاعفی برای تأکید بر فهم فیزیکی و پدیده‌های طبیعی شده و از پرداختن به جزئیات ریاضی روند حل خودداری می‌کنیم.

حل‌کنندهٔ معادله مهندسی (EES)

EES برنامه‌ای است که سیستم‌های جبری خطی یا غیرخطی یا معادلات دیفرانسیل را به صورت عددی حل می‌کند. این نرم افزار، کتابخانهٔ بزرگی بر مبنای توابع خواص ترمودینامیکی به اضافه توابع ریاضی را داراست و به کاربر اجازه تکمیل کردن اطلاعات اضافی خواص را می‌دهد. برخلاف بعضی بسته‌های نرم افزاری، *EES* نمی‌تواند مسائل مهندسی را حل کند و تنها معادلاتی را که توسط کاربر به آن داده شده‌اند حل می‌کند. بنابراین، کاربر باید مسأله را فهمیده و با استفاده از قوانین و روابط فیزیکی مربوطه، مسأله را فرموله کند. *EES* با حل ساده معادلات ریاضی حاصله، وقت و تلاش قابل توجهی از کاربر را حفظ می‌کند. این امر، این امکان را به‌وجود می‌آورد که مسائل مهندسی را که نمی‌توان به صورت دستی حل کرد، به سرعت حل نموده و بتوان روی پارامترهای آن مطالعه نمود. *EES* هنوز هم یکی از قدرتمندترین برنامه‌هایی است که مانند آنچه در مثال ۱-۵ نشان داده می‌شود، به آسانی قابل استفاده است. استفاده و توانایی‌های *EES* در پیوست ۳ روی *DVD* ضمیمه، تشریح شده است.

مثال ۱-۵ حل سیستم معادلات با *EES*

تفاضل دو عدد ۴ و جمع مربعات آنها، مساوی مجموع آنها به اضافه ۲۰ است. این دو عدد را به‌دست آورید.

حل: برای تفاضل و مجموع مربعات دو عدد، روابط داده شده است. این اعداد را باید تعیین کرد.

تجزیه و تحلیل: با کلیک مضاعف روی آیکون برنامه *EES* شروع می‌کنیم. یک فایل جدید باز کرده و روی صفحه خالی که ظاهر می‌شود، موارد زیر را تایپ می‌کنیم:

$$x - y = ۴$$

$$x^{۲} + y^{۲} = x + y + ۲۰$$

که بیان ریاضی دقیق مسأله بیان شده با اعداد مجهول x,y است. حل این سیستم دو معادله غیر خطی با دو مجهول، با یک کلیک تنها روی آیکون ماشین حساب روی *taskbar* به‌دست می‌آید. که می‌دهد:

$$x = ۵ \quad \text{و} \quad y = ۱$$

بحث: توجه کنید که مسأله را شبیه آنچه در کاغذ بوده فرموله کردیم و *EES* ترتیب تمام جزئیات ریاضی مسأله را داد. هم‌چنین توجه کنید که معادلات می‌توانند خطی یا غیر خطی باشد و آنها می‌توانند به هر صورتی با مجهولات در هر طرف ظاهر شوند. حل‌کننده‌ای مانند *EES* به کاربر اجازه می‌دهد تا روی فیزیک مسأله تمرکز نموده و دغدغه پیچیدگی‌های ریاضی مرتبط با حل سیستم معادلات را نداشته باشد.

فلوئنت

فلوئنت، یک برنامه دینامیک سیال محاسباتی (*CFD*) است که به‌طور گسترده در کاربردهای مدل‌سازی مسائل جریان استفاده می‌شود. گام اول در تجزیه و تحلیل، پیش پردازش است که شامل تهیه یک مدل یا وارد کردن مدل از یک برنامه *CAD* است که شامل به‌کار بردن یک شبکه مبتنی بر حجم محدود و وارد کردن اطلاعات آن است. هنگامی‌که مدل عددی آماده شد، فلونت محاسبات لازم را انجام داده و نتایج دلخواه را تولید می‌کند. مرحلهٔ نهایی، تجزیه و تحلیل پس از پردازش است که شامل سازماندهی و تفسیر اطلاعات و تصاویر است. نرم افزارهایی که برای کاربردهای خاصی چون خنک‌کاری مدارهای الکترونیک، سیستم‌های تهویه مطبوع و مخلوط کردن به‌کار می‌روند، وجود دارند. فلوئنت می‌تواند جریان‌های زیر صوتی و فرا صوتی، جریان‌های دائم و گذرا، جریان‌های آرام و مغشوش، جریان‌های نیوتنی و غیر نیوتنی، جریان‌های یک یا چند فازی، واکنش‌های شیمیایی شامل احتراق، جریان در محیط‌های متخلخل، انتقال حرارت و ارتعاشات القایی را بررسی کند. اغلب حل‌های عددی ارائه شده در این کتاب با استفاده از فلوئنت به‌دست آمده و مبحث *CFD* با جزئیات بیشتر در فصل ۱۵ تشریح شده است.

۱-۱۰ دقت، تمرکز و ارقام با معنی

در محاسبات مهندسی، اطلاعات موجود، با تعداد معینی رقم با معنی که معمولاً سه رقم است شناخته می‌شوند. در نتیجه، نتایج حاصل نمی‌توانند بیشتر از این ارقام با معنی، دقت داشته باشند. ارائه نتایج با تعداد ارقام با معنی بیشتر، نشان دهنده دقت بیش از حد است که باید از آن اجتناب کرد. صرف نظر از سیستم آحاد به‌کار گرفته شده، مهندسین باید از سه اصل اساسی دقت، تمرکز و ارقام با معنی که استفاده صحیح از این اعداد را فراهم می‌کند، آگاه باشند. این موارد برای اندازه‌گیری‌های مهندسی به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

خطای دقت (بی‌دقتی) : اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار صحیح است. در حالت کلی، دقت مجموعه‌ای از مقادیر اندازه‌گیری شده، به میزان نزدیکی مقدار متوسط آنها با مقدار واقعی مربوط است. دقت معمولاً با خطاهای ثابت و قابل تکرار همراه است.

خطای تمرکز : این خطا اختلاف بین یک مقدار خوانده شده را با مقادیر متوسط خوانده‌ها می‌دهد. در حالت کلی، دقت یک مجموعه اندازه‌گیری به میزان ظرافت وضوح و تکرارپذیری وسیله اندازه‌گیزی مربوط می‌شود. عموماً این دقت تمرکز با خطاهای اتفاقی و غیرقابل تکرار مرتبط است.

ارقام با معنی: ارقامی هستند که مربوط بوده و دارای معنی هستند.

یک اندازه‌گیری یا محاسبه می‌تواند بدون اینکه دقیق باشد، ریزه‌کاری زیادی در آن به‌کار برده شده باشد و یا برعکس. به عنوان مثال، فرض کنید که سرعت صحیح باد، ۲۵ متر بر ثانیه است. دو وسیله اندازه‌گیری A و B هر کدام ۵ سرعت باد را می‌خوانند:

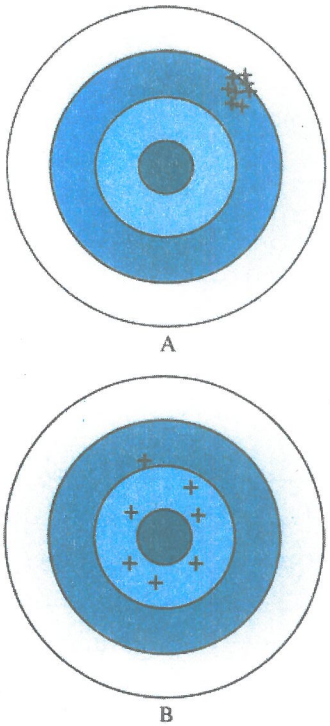
وسیله اندازه‌گیری A : ۲۵٫۵، ۲۵٫۶۹، ۲۵٫۵۲، ۲۵٫۵۸، ۲۵٫۶۱ متر بر ثانیه

متوسط همهٔ خوانده‌ها : ۲۵٫۵۸ متر بر ثانیه

وسیله اندازه‌گیری B : ۲۶٫۳، ۲۴٫۵، ۲۳٫۹، ۲۶٫۸، ۲۳٫۶ متر بر ثانیه

متوسط همهٔ خوانده‌ها : ۲۵٫۲ متر بر ثانیه

به‌وضوح، وسیله اندازه‌گیری A از تمرکز بیشتری برخوردار است، زیرا که هیچ‌کدام از خوانده‌ها بیشتر از ۰٫۱۱ با مقدار متوسط اختلاف ندارند. با وجود این، میانگین، ۲۵٫۵۸ است که ۰٫۵۸ از مقدار صحیح سرعت باد بزرگ‌تر است و خطای مبنا، که خطای ثابت یا سیستماتیک نامیده می‌شود را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، وسیله اندازه‌گیری B از تمرکز بالایی برخوردار نیست، چون که خوانده‌هایش از مقدار متوسط به مقدار زیادی نوسان می‌کنند. اما متوسط آن بسیار به مقدار صحیح نزدیک‌تر است. بنابراین، وسیله اندازه‌گیری B حداقل برای این مجموعه خوانده‌ها، حتی با وجود دقت متمرکز کمتر، دقیق‌تر است. تمرکز و دقت را با شلیک یک تفنگ به هدف (مانند آنچه در شکل ۱-۴۰ رسم شده است) می‌توان تشریح کرد.



شکل ۱-۴۰ نمایش دقت در مقایل تمرکز، پرتاب A دارای تمرکز بالا و دقت کم است، در حالی که پرتابگر B دارای دقت بالا ولی تمرکز کم است.

شلیک کننده A از تمرکز بالایی برخوردار است. اما خیلی دقیق نیست، در حالی‌که شلیک کننده B، دقت متوسط بهتری داشته ولی تمرکز کمتری دارد.

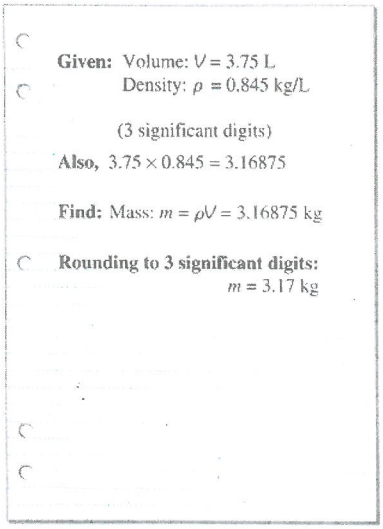
اکثر مهندسان اهمیتی به تعداد ارقام با معنی در محاسبات نمی‌دهند. حداقل ارقام بـا معنـی در یک عدد، دقت اندازه‌گیری یا محاسبه را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، نتیجه‌ای بـه صـورت ۱٫۲۳ (سه رقم با معنی) نشان می‌دهد که نتیجه تا یک رقم در دومین یکان اعشاری دقیق است، یعنی، عدد بین ۱٫۲۲ و ۱٫۲۴ است. بیان این عـدد بـا تعـداد ارقـام بیشـتری موجـب گمراهـی می‌شود. تعداد ارقام با معنی، هنگامی‌که عدد به شـکل نمـایی نوشـته شـود بـه آسـانی معلـوم می‌شوند. تعداد ارقام با معنی را به آسانی می‌توان شمرد، که این شمارش شـامل صـفرهـا هـم می‌شود. تعدادی مثال در جدول ۱-۳ نشان داده شده است.

جدول ۱-۳ ارقام با معنی

Number	Exponential Notation	Number of Significant Digits
12.3	1.23×10^{1}	3
123,000	1.23×10^{5}	3
0.00123	1.23×10^{-3}	3
40,300	4.03×10^{4}	3
40,300.	4.0300×10^{4}	5
0.005600	5.600×10^{-3}	4
0.0056	5.6×10^{-3}	2
0.006	$6. \times 10^{-3}$	1

به هنگام انجام محاسبات یا تبدیل چندین پارامتر مختلف، میزان دقت کلی با میزان دقت کمترین پارامتر برابر است. به عنوان مثال، فرض کنید با ضرب A و B، C را به‌دست آورده‌ایم. اگر A=۲٫۳۶۰۱ (پنج رقم با معنی) و B=۰٫۳۴ (دو رقم با معنی) آنگاه C=۰٫۸۰، (تنها دو رقم با معنی در نتیجه نهایی به‌کار رفته است). توجه کنید که اغلب دانشجویان به نوشتن C=۰٫۸۰۲۴۳۴ با شش رقم بامعنی وسوسه می‌شوند. زیرا که آن رقم بعد از ضرب دوعدد در صفحهٔ نمایش ماشین حساب ظاهر می‌شود.

اجازه دهید این مثال ساده را به دقت تجزیه و تحلیل کنیم. فرض کنید که مقدار دقیق B برابر ۰٫۳۳۵۰۱ است که به‌وسیله ابزار اندازه‌گیری ۰٫۳۴ خوانده می‌شود. هم‌چنین فرض کنیم A دقیقاً ۲٫۳۶۰۱ است که به‌وسیله یک ابزار دقیق‌تر اندازه‌گیری شده است. در این حالت $C = A \times B =$ ۰٫۷۹۰۶۶ پنج رقم با معنی دارد. توجه کنید که جواب اول C=۰٫۸۰ توسط یک رقم در مکان اعشاری دوم قطع شده است. اگر B=۰٫۳۴۴۹۹ باشد و توسط وسیله‌ای ۰٫۳۴ خوانده شود، حاصل‌ضرب A و B، ۰٫۸۱۴۲۱ با پنج رقم با معنی است. جواب اصلی ما ۰٫۸۰ با یک عدد در دومین مکان اعشاری قطع شده است. در اینجا نکته مهم این است که ۰٫۸(با دو رقم با معنی) بهترین جوابی است که می‌توان از این ضرب انتظار داشت، چون اصلاً یکی از مقادیر دارای دو رقم با معنی است. روش دیگر نگاه کردن به این موضوع این است که به جز اولین دو رقم در جواب، بقیه ارقام بی‌معنی هستند. به عنوان مثال، اگر ۲٫۳۶۰۱ ضربدر ۰٫۳۴ مساوی با ۰٫۸۰۲۴۳۴ باشد چهار رقم آخر بی معنی هستند. همان‌طور که نشان داده شد، نتیجه نهایی می‌تواند بین ۰٫۷۹و ۰٫۸۱ قرار گیرد و ارقام آن‌سوی دو رقم با معنی نه تنها با معنی نیستند بلکه گمراه کننده هم هستند، چون آنها به خواننده، دقت بیشتری از آنچه واقعاً است را می‌رسانند. به عنوان مثالی دیگر، به مخزنی به حجم ۳٫۷۵ لیتر که با بنزین با چگالی ۰٫۸۴۵ kg/L پر شده است، توجه کرده و جرم آن را مشخص کنید. احتمالاً اولین



شکل ۱-۴۱ نتایجی که مرتبه دقت آن بیشتر از مرتبه دقت اطلاعات داده شده است، گویای یک تمرکز مصنوعی است.

فکری که به ذهن شما می‌آید این است که با ضرب حجم و چگالی جرم ۳٫۱۶۸۷۵ کیلوگرم را به‌دست آورید، که به‌طور اشتباه نشان می‌دهد که جرم به‌دست آمده تا شش رقم با معنی دقیق است. به هر حال، در واقع، جرم نمی‌تواند بیشتر از سه رقم با معنی دقیق باشد چون هم حجم و هم چگالی هردو تا سه رقم با معنی دقیق هستند. بنابراین، نتیجه باید تا سه رقم با معنی گرد شود و جرم به‌جای آنچه که صفحه ماشین حساب نمایش می‌دهد، $3{,}17\,kg$ باید گزارش شود. (شکل ۱-۴۱).

نتیجه $3{,}16875\,kg$ تنها در صورتی صحیح است که حجم و چگالی به ترتیب $3{,}75000\,L$ و $0{,}845000\,kg/L$ می‌بودند. مقدار $3{,}75\,L$ نشان می‌دهد که ما مطمئن هستیم که حجم تا $0{,}01\,L$ دقیق است و نمی‌تواند ۳٫۷۴ یا ۳٫۷۶ لیتر باشد. در هر حال، حجم می‌تواند ۳٫۷۴۶، ۳٫۷۵۰، ۳٫۷۵۳ و غیره باشد، چون همه آنها به ۳٫۷۵ گرد می‌شوند. شما باید آگاه باشید که بعضی اوقات، به‌طور آگاهانه، خطاهای کوچکی را وارد می‌کنیم تا از زحمت یافتن اطلاعات بسیار دقیق، پرهیز کنیم. به عنوان مثال، هنگامی‌که با آب مایع سروکار داریم، مقدار $1000\,kg/m^3$ را برای چگالی به‌کار می‌بریم که این مقدار چگالی آب خالص در دمای صفر درجه است. استفاده از این مقدار در $75^\circ C$ منجر به خطای ۲٫۵ درصد می‌شود، چون چگالی در این دما $975\,kg/m^3$ است. مواد معدنی و ناخالصی‌های موجود در آب نیز سر منشأ خطای اضافی هستند. نباید هیچ محدودیتی در گرد کردن نتایج نهایی به تعداد قابل قبول عدد با معنی نمود. گذشته از این، داشتن حداقل چند درصد عدم اطمینان در نتایج تجزیه و

تحلیل مهندسی، معمولاً امری عادی بوده و یک استثنا نیست. هنگام نوشتن نتایج میانی در یک محاسبه، توصیه می‌شود که برای جلوگیری از رشد خطاهای ناشی از گرد کردن، چندین رقم اضافی را نگه دارید. خواننده باید به‌خاطر بسپارد که تعداد معین ارقام بامعنی برای دقت نتیجه، لزوماً نشان دهنده تعداد ارقام دقت کل نمی‌باشد. به‌عنوان مثال وجود خطای مبنا در یک نمونه، عمدتاً دقت کل جواب را حتی با بی‌معنی کردن آخرین رقم با معنی و کاهش عدد کلی ارقام قابل اعتماد به یکی، کاهش می‌دهند.

مقادیری که به طریق تجربی تعیین می‌شوند، در معرض خطاهای اندازه‌گیری هستند و چنین خطاهایی در نتایج به‌دست آمده منعکس می‌شوند. به عنوان مثال، اگر چگالی ماده‌ای دارای ۲ درصد عدم قطعیت باشد، جرم محاسبه شده با این چگالی هم ۲ درصد عدم قطعیت را خواهد داشت.

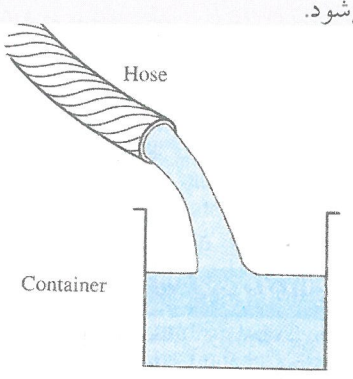
سرانجام، هنگامی‌که تعداد ارقام با معنی نامشخص باشد، استاندارد قابل قبول مهندسی، سه رقم بامعنی است. بنابراین، اگر طول لوله‌ای ۴۰ متر باشد برای استفاده از سه رقم با معنی در نتایج نهایی، آن را ۴۰٫۰ فرض میکنیم.

مثال ۱-۶ ارقام بامعنی و دبی جریان

جنیفر در حال انجام آزمایشی است که از آب سرد یک لوله آب پاش باغ استفاده می‌کند. برای محاسبه دبی آب، او مدت زمان پرشدن مخزن را اندازه می‌گیرد (شکل ۱-۴۲). حجم آب جمع شده $\forall = 1{,}1\,gal$ در بازه زمانی $\Delta t = 45{,}62$ است که توسط یک کرنومتر اندازه‌گیری می‌شود. دبی حجمی آب درون لوله آب پاش بر حسب متر مکعب بر دقیقه را محاسبه کنید.

حل: با استفاده از اندازه‌گیری حجم و بازه زمانی، می‌بایست دبی حجمی جریان تعیین شود.

فرضیات: ۱- جنیفر اندازه‌گیری را صحیح انجام می‌دهد، طوری که حجم اندازه‌گیری شده تا دو رقم با معنی دقیق است در حالی‌که بازه زمانی تا چهار رقم با معنی دقیق است. ۲- آبی از مخزن به بیرون پاشیده نمی‌شود.



شکل ۱-۴۲ تصویری برای مثال ۱-۶ که گویای اندازه‌گیری دبی حجمی است.

تجزیه و تحلیل: دبی حجمی جریان $\dot{V}$ حجم جابه‌جا شده بر واحد زمان است و به صورت زیر بیان می‌شود:

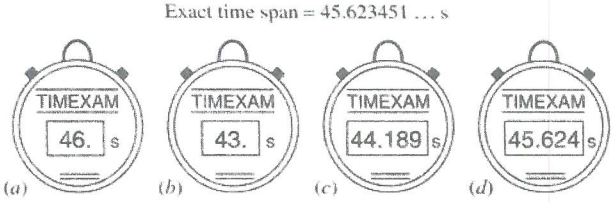
$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

با جایگذاری مقادیر اندازه‌گیری شده، دبی حجمی جریان به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$\dot{V} = \frac{۱/۱ gal}{۴۵/۶۲ s}\left(\frac{۳/۷۸۵ \times ۱۰^{-۳} m^۳}{۱ gal}\right)\left(\frac{۶۰ s}{۱ \min}\right) = ۵/۵ \times ۱۰^{-۳} m^۳ / \min$$

بحث: به‌خاطر اینکه نمی‌توانیم به دقت بیشتری نسبت به آنچه هست مطمئن باشیم، نتیجه نهایی بر حسب دو رقم با معنی مرتب شده است. اگر این یک مرحله میانی برای محاسبات بعدی باشد، برای جلوگیری از جمع شدن خطای ناشی از گرد کردن، چند رقم مازاد با معنی در نظر گرفته می‌شود. در چنین حالتی، دبی حجمی جریان به صورت $\dot{V} = ۵/۴۷۵۹ \times ۱۰^{-۳} m^۳ / \min$ نوشته می‌شود. بر اساس اطلاعات داده شده، نمی‌توانیم در مورد دقت نتیجه حاصل چیزی بگوییم، چون هیچ اطلاعاتی در مورد خطاهای سیستماتیک در اندازه‌گیری حجم یا زمان نداریم.

هم‌چنین به‌خاطر داشته باشیم که دقت با تمرکز خوب ضمانتی برای دقت بالا نیست. به عنوان مثال، اگر باطری‌های کرنومتر ضعیف باشند، دقت آن کاملاً کاهش می‌یابد، در حالی‌که هنوز هم آنچه که نمایش داده می‌شود تا چهار رقم بامعنی دقیق است. در عمل اغلب دقت در ارتباط با وضوح نمایش صفحه وسیله اندازه‌گیری هم مطرح می‌شود. به عنوان مثال، یک ولت متر دیجیتال که روی صفحه نمایش پنج رقم را نشان می‌دهد نسبت به یک ولت متر که روی صفحه نمایش خود سه رقم را نشان می‌دهد، دقیق‌تر است. در هر حال تعداد ارقام نمایش داده شده هیچ ارتباطی به دقت اندازه‌گیری کلی ندارند. یک وسیله می‌تواند هنگامی‌که خطاهای مبنا قابل توجهی دارد، بدون این‌که دارای دقت بالایی باشد، تمرکز خوبی داشته باشد. به همین ترتیب یک وسیله با تعداد ارقام نمایش کم نسبت به وسیله‌ای با تعداد ارقام بیشتر می‌تواند دقیق‌تر باشد (شکل ۱-۴۳).



شکل ۱-۴۳ دقت وسیله دارای تعداد زیادی درجه نمایش (کرنومتر *c*) از ابزاری با ارقام نمایش کمتر (کرنومتر *a*) کمتر است. در مورد کرنومترهای *b* و *d* چه می‌گویید.

خلاصه

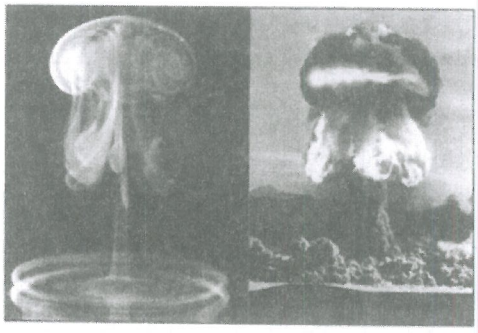
در این فصل برخی از مفاهیم پایه مکانیک سیالات معرفی شدند. ماده در فاز گاز یا مایع را به عنوان سیال می‌شناسند. مکانیک سیالات علمی‌است که با رفتار سیالات ساکن یا متحرک و هم‌چنین اندرکنش سیالات در برخورد با جامدات و سیالات دیگر سروکار دارد. جریان سیال روی سطح، یک جریان خارجی است و جریان سیال در یک لوله یا کانال، اگر سیال کاملاً به‌وسیله سطوح جامد محصور شود جریان داخلی است. جریان سیال بسته به تغییرات چگالی سیال در طی جریان می‌تواند به جریان تراکم پذیر یا تراکم‌ناپذیر تقسیم شود. چگالی مایعات به طور عام ثابت بوده و بنابراین جریان مایعات معمولاً تراکم‌ناپذیر است. واژه دائم نشان‌دهنده عدم تغییر با زمان است. متضاد دائم جریان غیردائم یا گذراست. واژه یکنواخت نشان‌دهنده عدم تغییر با مکان در یک ناحیه مشخص است. هنگامی‌که تغییرات سرعت فقط در یک بعد است، جریان را یک بعدی گویند. سیال در تماس مستقیم با یک سطح به سطح می‌چسبد و هیچ لغزشی وجود ندارد. به این شرط عدم لغزش گویند که منجر به شکل‌گیری لایه مرزی روی سطوح جامد می‌شود.

یک سیستم با جرم ثابت را سیستم بسته گویند و سیستمی‌که انتقال جرم از مرزهای آن وجود دارد را سیستم باز یا حجم معیار گویند. تعداد زیادی از وسایل مهندسی شامل ورود و خروج جرم هستند و بنابراین به صورت حجم معیار مدل می‌شوند.

در محاسبات مهندسی باید توجه ویژه‌ای به واحد کمیت‌ها نمود تا از خطاهای ناشی از ناسازگاری واحدها جلوگیری کرده و یک روش سیستماتیک را دنبال کرد. هم‌چنین شایان ذکر است که اطلاعات داده شده تا تعداد مشخصی رقم با معنی دقیق بوده و نتایج حاصل نمی‌توانند تا ارقام بامعنی بیشتری دقیق باشند. اطلاعات داده شده در مورد واحدها و ابعاد، شیوه حل مسأله، میزان دقت، تمرکز و ارقام بامعنی در تمام این کتاب رعایت خواهد شد.

کاربرد: وجه اشتراک انفجار هسته‌ای و قطره‌های باران چیست؟
نویسنده مهمان: لرنز سیگردسون، آزمایشگاه دینامیک سیال گردابه‌ای، دانشگاه آلبرتا

چرا دو تصویر شکل (۱-۴۴) شبیه هم هستند؟ شکل (۱-۴۴ ب) آزمایش هسته‌ای بالای سطح زمینی که به‌وسیله مؤسسه انرژی آمریکا در سال ۱۹۵۷ انجام شده را نشان می‌دهد. انفجار هسته‌ای یک چتر انفجاری با قطری در حدود ۱۰۰ متر ایجاد کرده است. انبساط آن قدر سریع است که الگوی جریان تراکم‌پذیر روی می‌دهد که به صورت یک موج ضربه‌ای کروی در حال انبساط است. شکل (۱-۴۴ الف) یک حادثه بی‌آزار روزمره است که یک تصویر برعکس شده از یک قطره آب رنگ شده بعد از افتادن داخل یک استخر آب است که از زیر سطح استخر به



(a) (b)

شکل ۱-۴۴ مقایسه ساختار گردابه‌ای ناشی از: (الف) برخورد یک قطره آب به یک سطح استخر(به صورت وارونه شده که توسط پیک و سیگاردسون در سال ۱۹۹۴ نشان داده شده است. (ب) آزمایش یک بمب اتمی بر روی سطح زمین در نوادا در سال ۱۹۵۷(وزارت انرژی امریکا) . قطره آب توسط یک قطره چکان به قطر $۲/۶\ mm$ ریخته شده و توسط یک لامپ فلورسنت $۵۰\ ms$ پس از رها شدن از فاصله $۳۵\ mm$ روشن شده است. قطر در لحظه برخورد به سطح آب تقریباً کروی بود. از تفسیر مربوط به برخورد یک اشعه لیزر با قطره جهت شروع اندازه‌گیری زمان سنجش قطره رها شده استفاده می‌شود. جزئیات چگونگی اندازه‌گیری قطر توسط پیک و سیگاردسون در سال ۱۹۹۴ و پیک و همکاران در سال ۱۹۹۵ داده شده است.

ردیاب‌های مرتبط به بمب اتمی عمدتاً گرما و غبار است. حرارت در این حالت به خصوص ناشی از یک گوی آتش بود که به اندازه‌ای قوی بود که می‌توانست از محل ابتدای آویزان بودن بمب تا سطح زمین برسد. بنابراین شرایط هندسی اولیه ردیاب، کره‌ای بود که با زمین برخورد می‌کرد. (الف) تصویر از پیک و سیگاردسون مجله فیزیک سیالات شماره۶ (۲) بخش ۱ صفحه ۵۶۴ سال ۱۹۹۴ (ب) تصویر از وزارت انرژی آمریکا – تصویر از لورانس سیگاردسون.

آن نگاه شده است. این تصویر می‌تواند افتادن قطره‌ای که از قاشق شما در یک فنجان قهوه بوده و یا پاشش مجدد قطره‌های باران پس از برخورد آنها به سطح آب یک دریاچه باشد. چرا چنین تشابه قویی بین این وقایع کاملاً متفاوت وجود دارد؟ کاربرد اصول پایه‌ای مکانیک سیالات که در این کتاب یاد می‌گیرید به درک بیشتر پاسخ این مسأله کمک خواهد کرد در هر حال یک نفر می‌تواند بسیار عمیق‌تر هم برود.

آب چگالی بیشتری نسبت به هوا دارد (فصل ۲)، بنابراین هنگام سقوط در هوا و قبل از برخورد به سطح آب، به قطره نیروی شناوری منفی وارد می‌شود (فصل ۳). چتر انفجاری گاز داغ نسبت به هوای سردی که آن را احاطه کرده است، غلظت کمتری دارد و بنابراین نیروی شناوری مثبت ایجاد شده و چتر را به سمت بالا می‌برد. هم‌چنین موج ضربه‌ای (فصل ۱۲) که

از سطح زمین منعکس می‌شود نیروی رو به بالای مثبتی را به چتر انفجاری وارد می‌سازد. ساختار اولیه در بالای هر تصویر حلقه ورتکس نامیده می‌شود. این حلقه یک گردباد کوچکی است با گردابه متمرکز (فصل ۴) که انتهای گردباد به دور خود جمع شده و بسته می‌شود، قوانین سینماتیک (فصل ۴) به ما می‌گویند که این حلقه گردابه سیال را به سمت بالای صفحه حمل می‌کنند. این مورد در هر دو حالت از طریق نیروهای وارده اعمال قانون بقای مومنتوم در تحلیل حجم معیار مربوطه به‌دست می‌آید(فصل ۵). شخص می‌تواند این مسأله را با روش تحلیل دیفرانسیلی مورد بررسی قرار دهد(فصل‌های ۹و ۱۰) و با دینامیک سیال محاسباتی (فصل ۱۵) حل نماید. اما چرا شکل پدیده در هر دو حالت مشابه هم است؟ این در صورتی ممکن است که تشابه هندسی و سینماتیکی (فصل ۷) برقرار بوده و یا اگر روش‌های مشاهده جریان در آنها یکسان باشند (فصل ۴)، تعقیب غیرفعالی گرما و غبار در حالت انفجار و نوار فلورسنت در مورد قطره آب، همان گونه که در زیر شکل توضیح داده شده، مشابه هستند. اطلاعات بیشتر در خصوص سینماتیک و دینامیک گردابه می‌تواند تشابه ساختار این گردابه‌ها را روشن‌تر کند که این موضوع توسط سیگاردسن (۱۹۹۷) و پک و سیگاردسون (۱۹۹۴) تشریح شده‌اند. به خوشه‌های آویزان در زیر حلقه اصلی و ساقه آن و حلقه پایینی توجه نمایید. بین این ساختار و ساختارهای مشابه در اغتشاش، تشابهی وجود دارد. مقایسه یک قطره و چتر انفجار نشان می‌دهند که چگونه ساختارهای مغشوش ایجاد و گسترش می‌یابند. از چه راه‌هایی از مکانیک سیالات باید استفاده کرد تا بتوانند این تشابه را بهتر تشریح کنند؟

مسائل

مقدمه، تقسیم‌بندی و سیستم

۱-۱ جریان‌های داخلی، خارجی و کانال باز را تعریف کنید.

۱-۲ سیال تراکم‌ناپذیر و جریان تراکم ناپذیر را تعریف کنید. آیا با جریان یک سیال تراکم پذیر لزوما به صورت تراکم پذیر باید رفتار کرد؟

۱-۳ شرط عدم لغزش چیست؟ علت آن چیست؟

۱-۴ جریان اجباری چیست؟ تفاوت آن با جریان‌های طبیعی کدامست؟ جریان به‌وجود آمده توسط باد جریان اجباری است یا طبیعی؟

۱-۵ لایه مرزی چیست؟ علت توسعه لایه مرزی کدامست؟

۱- ۶ تفاوت میان روش‌های کلاسیک و آماری چیست؟

۱-۷ فرایند جریان دائم چیست؟

۱-۸ تنش، تنش عمودی، تنش برشی و فشار را تعریف کنید.

۱-۹ سیستم، محیط و مرز را تعریف کنید.

۱-۱۰ چه موقع یک سیستم، سیستم بسته و چه موقع حجم معیار است؟

جرم، نیرو و واحدها

۱-۱۱ تفاوت بین پوند جرم و پوند نیرو چیست؟

۱-۱۲ تفاوت بین کیلوگرم جرم و کیلوگرم نیرو چیست؟

۱-۱۳ نیروی خالص وارد به یک اتومبیل در سرعت ثابت $۷۰ km/h$ (الف) روی جاده مسطح و (ب) در یک سربالایی چقدر است؟

۱-۱۴ یک مخزن پلاستیکی سه کیلوگرمی به حجم $۰/۲ m^3$ با آب مایع پرشده است. چگالی آب را $۱۰۰۰ kg/m^3$ فرض کنید و وزن سیستم حاصله را محاسبه کنید.

۱-۱۵ جرم و وزن هوای محبوس شده در اتاقی به ابعاد $۶m \times ۶m \times ۸m$ را تعیین کنید. فرض کنید که چگالی هوا $۱/۱۶ kg/m^3$ است. جواب‌ها: $۳۲۷۷N$, $۳۳۴/۱kg$

۱-۱۶ در عرض جغرافیایی ۴۵°، شتاب ثقل تابعی از ارتفاع z بالای سطح دریاست، که به صورت $g = a - bz$ نشان داده می‌شود، که در آن $a = ۹/۸۰۷ m/s^2$ و $b = ۳/۳۲ \times ۱۰^{-۶} s^{-۲}$ است. ارتفاعی از سطح دریا را مشخص کنید که در آن، وزن جسم یک درصد کاهش می‌یابد. جواب: $۲۹۵۳۹m$

۱-۱۷ فضانوردی به جرم $۱۵۰ lbm$ در سطح ماه با دو ترازو خود را وزن کرد. یکی از ترازوها یک ترازوی فنری و ترازوی دیگر از نوع میله‌ای بود که جرم‌ها را مقایسه می‌کند. در ماه شتاب ثقل محلی را $g = ۵/۴۸ ft/s^2$ در نظر بگیرید. وزن فضانورد را (الف) با ترازوی فنری و (ب) با ترازوی میله‌ای تعیین کنید. جواب‌ها:
(الف) $۲۵/۵ lbf$ و (ب) $۱۵۰ lbf$

۱-۱۸ شتاب یک هواپیمای مافوق صوت اغلب بر حسب g بیان می‌شود (برحسب مضرب‌های شتاب ثقل استاندارد). نیروی رو به بالای خالصی را که به یک شخص به جرم $۹۰ kg$ که در یک هواپیمای با شتاب $۶g$ حرکت می‌کند، وارد می‌شود، را برحسب نیوتن به‌دست آورید.

۱-۱۹ قطعه سنگی به جرم $۵kg$ با نیروی $۱۵۰N$ در محلی که شتاب ثقل آن $۹/۷۹ m/s^2$ است، رو به بالا پرتاب می‌شود. شتاب قطعه سنگ را برحسب m/s^2 به‌دست آورید.

۱-۲۰ مسأله ۱-۱۹ را با استفاده از نرم افزار EES (یا هر نرم‌افزار دیگری) حل کنید. کل حل را که شامل نتایج عددی با واحدهای مناسب است، چاپ کنید.

۱-۲۱ مقدار شتاب ثقل g با ارتفاع، از $۹/۸۰۷ m/s^2$ در سطح دریا تا $۹/۷۶۷ m/s^2$ در ارتفاع $۱۳۰۰۰ m$ جایی‌که اغلب هواپیماهای مسافربری پرواز می‌کنند، کاهش می‌یابد. درصد کاهش وزن یک هواپیما در ارتفاع $۱۳۰۰۰ m$ را نسبت به وزن آن در سطح دریا محاسبه کنید.

مدلسازی و حل مسائل مهندسی

۱-۲۲ تفاوت بین دقت و تمرکز چیست؟ آیا یک اندازه‌گیری می‌تواند دارای تمرکز بوده ولی دقت لازم را نداشته باشد؟ توضیح دهید.

۱-۲۳ تفاوت بین روش تحلیلی و آزمایشگاهی در مسائل مهندسی چیست؟ در مورد مزایا و معایب هر روش بحث کنید.

۱-۲۴ اهمیت مدلسازی در مهندسی چیست؟ مدل‌های ریاضی برای فرایندهای مهندسی، به چه صورت آماده و مهیا می‌شوند؟

۱-۲۵ هنگام مدلسازی در یک فرایند مهندسی، انتخاب صحیح بین یک مدل ساده اما خام و یک مدل پیچیده اما دقیق چیست؟ آیا یک مدل پیچیده لزوماً به‌خاطر دقت بیشتر انتخاب بهتری است؟

۱-۲۶ در مطالعه یک مسأله فیزیکی معادلات دیفرانسیل چگونه به‌وجود می‌آیند؟

۱-۲۷ ارزش بسته‌های نرم افزاری در (الف) آموزش مهندسی و (ب) کارهای عملی مهندسی چگونه است؟

۱-۲۸ ریشه حقیقی مثبت معادله زیر را با استفاده از نرم افزار *EES* به‌دست آورید.

$$۲x^{۳} - ۱۰x^{۰/۵} - ۳x = -۳$$

۱-۲۹ سیستم دو معادله و دو مجهول زیر را با نرم افزار *EES* حل کنید.

$$x^{۳} - y^{۲} = ۷/۷۵$$
$$۳xy + y = ۳/۵$$

۱-۳۰ سیستم سه معادله و سه مجهول زیر را با نرم افزار *EES* حل کنید.

$$۲x - y + z = ۵$$
$$۳x^{۲} + ۲y = z + ۲$$
$$xy + ۲z = ۸$$

۱-۳۱ سیستم سه معادله و سه مجهول زیر را با نرم افزار *EES* حل کنید.

$$x^{۲}y - z = ۱$$
$$x - ۳y^{۰/۵} + xz = -۲$$
$$x + y - z = ۲$$

مسائل مروری

۱-۳۲ وزن اجسام بر اثر تغییرات شتاب ثقل g با ارتفاع، از یک مکان تا مکان دیگر تغییر می‌کند. برای در نظر گرفتن این تغییرات، با استفاده از رابطه مسأله ۱-۱۶ وزن یک فرد

به جرم $80\,kg$ را در سطح دریا $z=0$، در دنور $z=1610\,m$ و در بالای قله اورست $z=8848\,m$ به‌دست آورید.

۱-۳۳ فردی برای خرید یک بسته گوشت برای شام خود به فروشگاهی می‌رود. او قطعه گوشتی به جرم $12-oz$ $(1lbm=16\,oz)$ به ارزش $3/15$ $ را برمی‌دارد. سپس او به یک فروشگاه بین المللی رفته و قطعه گوشتی به وزن $320\,g$ با کیفیتی مشابه به ارزش $2/80$ $ می‌یابد. کدام قطعه گوشت برای خرید بهتر است؟

۱-۳۴ نیروی ایجاد شده توسط یک موتور جت برای حرکت رو به جلوی هواپیما، نیروی رانش نامیده می‌شود. نیروی رانش ایجاد شده توسط موتور بویینگ ۷۷۷ حدود $85000\,lbf$ است. این نیروی رانش را برحسب N و kgf بیان کنید.

مسائل طراحی و آزمایش

۱-۳۵ مقاله‌ای در مورد وسائل مختلف اندازه‌گیری جرم و حجم که در طول تاریخ به‌کار رفته بنویسید. هم‌چنین توسعه واحدهای جدید برای جرم و حجم را توضیح دهید.

مراجع و متون پیشنهادی

1. American Society for Testing and Materials. *Standards for Metric Practice.* ASTM E 380-79, January 1980.
2. C. T. Crowe, J. A. Roberson, and D. F. Elger. *Engineering Fluid Mechanics,* 7th ed. New York: Wiley, 2001.
3. R. W. Fox and A. T. McDonald. *Introduction to Fluid Mechanics,* 5th ed. New York: Wiley. 1999.
4. G. M. Homsy, H. Aref, K. S. Breuer, S. Hochgreb, J. R. Koseff, B. R. Munson, K. G. Powell, C. R. Robertson, and S. T. Thoroddsen. *Multi-Media Fluid Mechanics* (CD). Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
5. M. Van Dyke. *An Album of Fluid Motion.* Stanford, CA: The Parabolic Press, 1982.