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

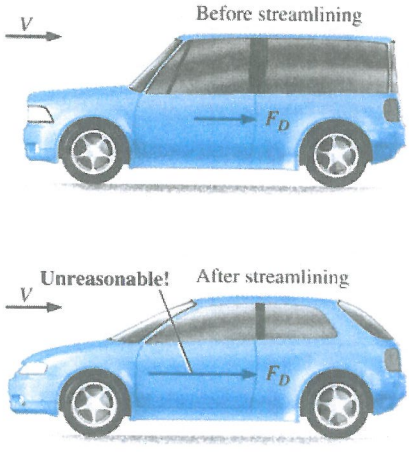
از جداول و روابط مربوط به خواص، خواص نامعلومی‌که برای حل مسأله در حالات مشخص لازم است را به‌دست آورید. این خواص را به طور جداگانه فهرست‌بندی کنید و منابع مورد نیاز را در صورت در دسترس بودن مشخص کنید.

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:

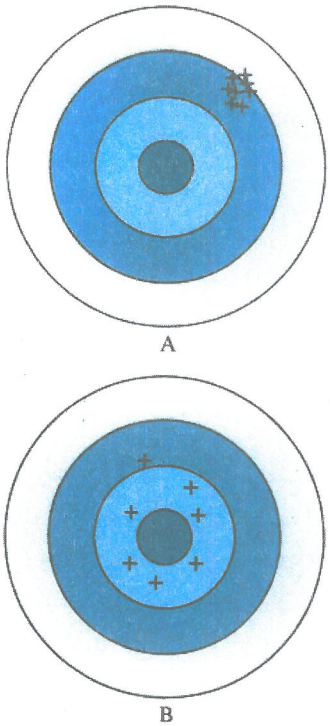
وسیله اندازه‌گیری A : ۲۵٫۵، ۲۵٫۶۹، ۲۵٫۵۲، ۲۵٫۵۸، ۲۵٫۶۱ متر بر ثانیه

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.

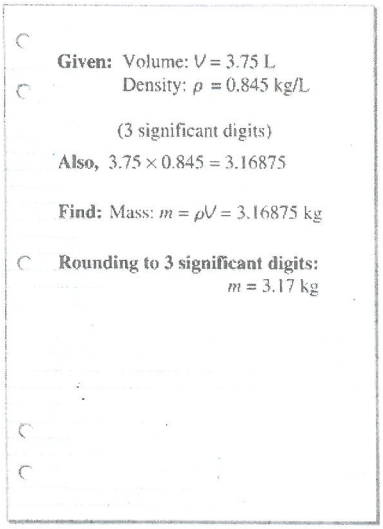
اکثر مهندسان اهمیتی به تعداد ارقام با معنی در محاسبات نمی‌دهند. حداقل ارقام بـا معنـی در یک عدد، دقت اندازه‌گیری یا محاسبه را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، نتیجه‌ای بـه صـورت ۱٫۲۳ (سه رقم با معنی) نشان می‌دهد که نتیجه تا یک رقم در دومین یکان اعشاری دقیق است، یعنی، عدد بین ۱٫۲۲ و ۱٫۲۴ است. بیان این عـدد 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.

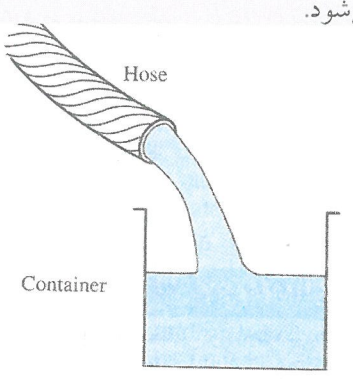
سرانجام، هنگامی‌که تعداد ارقام با معنی نامشخص باشد، استاندارد قابل قبول مهندسی، سه رقم بامعنی است. بنابراین، اگر طول لوله‌ای ۴۰ متر باشد برای استفاده از سه رقم با معنی در نتایج نهایی، آن را ۴۰٫۰ فرض میکنیم.

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:

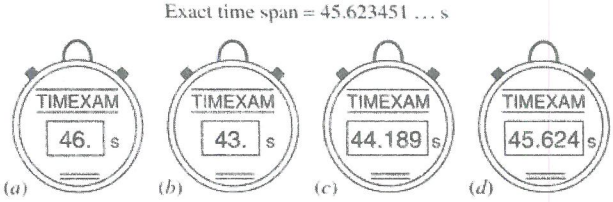
$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

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

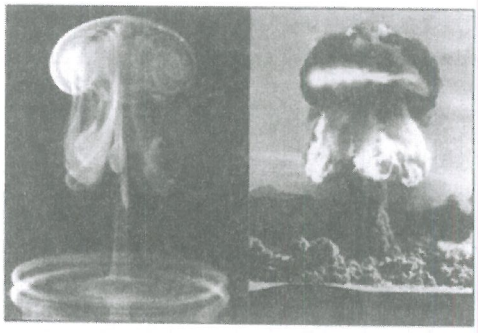
در این فصل برخی از مفاهیم پایه مکانیک سیالات معرفی شدند. ماده در فاز گاز یا مایع را به عنوان سیال می‌شناسند. مکانیک سیالات علمی‌است که با رفتار سیالات ساکن یا متحرک و هم‌چنین اندرکنش سیالات در برخورد با جامدات و سیالات دیگر سروکار دارد. جریان سیال روی سطح، یک جریان خارجی است و جریان سیال در یک لوله یا 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.