

فصل اول مقدمه

۱.۱ نکات مقدماتی

مکانیک سیالات، مطالعه سیالات در حال حرکت (دینامیک سیالات) یا در حالت سکون (استاتیک سیالات) است. گازها و مایعات هر دو به عنوان سیالات طبقه‌بندی می‌شوند و تعداد کاربردهای مهندسی سیالات بسیار زیاد است: تنفس، جریان خون، شنا، پمپ‌ها، فن‌ها، توربین‌ها، هواپیماها، کشتی‌ها، رودخانه‌ها، آسیاب‌های بادی، لوله‌ها، موشک‌ها، کوه‌های یخ، موتورهای، فیلترها، جت‌ها و آب‌پاش‌ها، تنها چند نمونه از این کاربردها هستند. وقتی در مورد آن فکر می‌کنید، تقریباً همه چیز در این سیاره یا سیال است یا در داخل یا نزدیکی یک سیال حرکت می‌کند.

جوهره موضوع جریان سیال، سازشی خردمندانه بین نظریه و آزمایش است. از آنجایی که جریان سیال شاخه‌ای از مکانیک است، مجموعه‌ای از قوانین اساسی مستند را برآورده می‌کند و بنابراین بحث‌های نظری زیادی در مورد آن در دسترس است. با این حال، این نظریه اغلب ناامیدکننده است زیرا عمدتاً در موقعیت‌های ایده‌آل اعمال می‌شود که ممکن است در مسائل عملی نامعتبر باشند. دو مانع اصلی برای یک نظریه کاربردی، هندسه و ویسکوزیته هستند. معادلات اساسی حرکت سیال (فصل ۴) برای اینکه تحلیلگر بتواند به پیکربندی‌های هندسی دلخواه حمله کند، بسیار دشوار هستند. بنابراین اکثر کتاب‌های درسی بر روی صفحات تخت، لوله‌های دایره‌ای و سایر هندسه‌های آسان تمرکز دارند. می‌توان تکنیک‌های عددی کامپیوتری را در هندسه‌های پیچیده به کار برد و اکنون کتاب‌های درسی تخصصی برای توضیح تقریب‌ها و روش‌های جدید دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در دسترس هستند [۱-۴]. این کتاب نتایج نظری بسیاری را ارائه می‌دهد در حالی که محدودیت‌های آنها را در نظر می‌گیرد.

مانع دوم برای یک نظریه کاربردی، عملکرد ویسکوزیته است که فقط در جریان‌های ایده‌آل خاص می‌توان از آن صرف نظر کرد (فصل ۸). اولاً، ویسکوزیته دشواری معادلات اساسی را افزایش می‌دهد، اگرچه تقریب لایه مرزی که توسط لودویگ پранتل در سال ۱۹۰۴ (فصل ۷) یافت شد، تحلیل‌های جریان ویسکوز را تا حد زیادی ساده کرده است. ثانیاً، ویسکوزیته تأثیر بی‌ثبات‌کننده‌ای بر همه سیالات دارد و در سرعت‌های بسیار کم، منجر به یک پدیده نامنظم و تصادفی به نام آشفتگی می‌شود. نظریه جریان آشفته خام است و به شدت توسط آزمایش پشتیبانی می‌شود (فصل ۶)، با این حال می‌تواند به عنوان یک تخمین مهندسی کاملاً قابل استفاده باشد. این کتاب درسی فقط همبستگی‌های تجربی استاندارد را برای جریان میانگین زمانی آشفته معرفی می‌کند. در همین حال، متون پیشرفته‌ای در مورد آشفتگی میانگین زمانی و مدل‌سازی آشفتگی [۵، ۶] و در مورد شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) جدیدتر و کامپیوتری-محور آشفتگی نوسانی [۷، ۸] وجود دارد.

بنابراین، برای مسائل جریان سیال، نظریه وجود دارد، اما در همه موارد باید با آزمایش پشتیبانی شود. اغلب داده‌های تجربی منبع اصلی اطلاعات در مورد جریان‌های خاص، مانند نیروی پسا و نیروی بالابر اجسام غوطه‌ور (فصل ۷) را فراهم می‌کنند. خوشبختانه، مکانیک سیالات موضوعی بسیار بصری است که ابزار دقیق خوبی دارد [۹-۱۱]، و استفاده از تحلیل ابعادی و مفاهیم مدل‌سازی (فصل ۵) گسترده است. بنابراین، آزمایش، مکملی طبیعی و آسان برای نظریه است. باید در نظر داشته باشید که نظریه و آزمایش باید در تمام مطالعات مکانیک سیالات دست در دست هم پیش بروند.

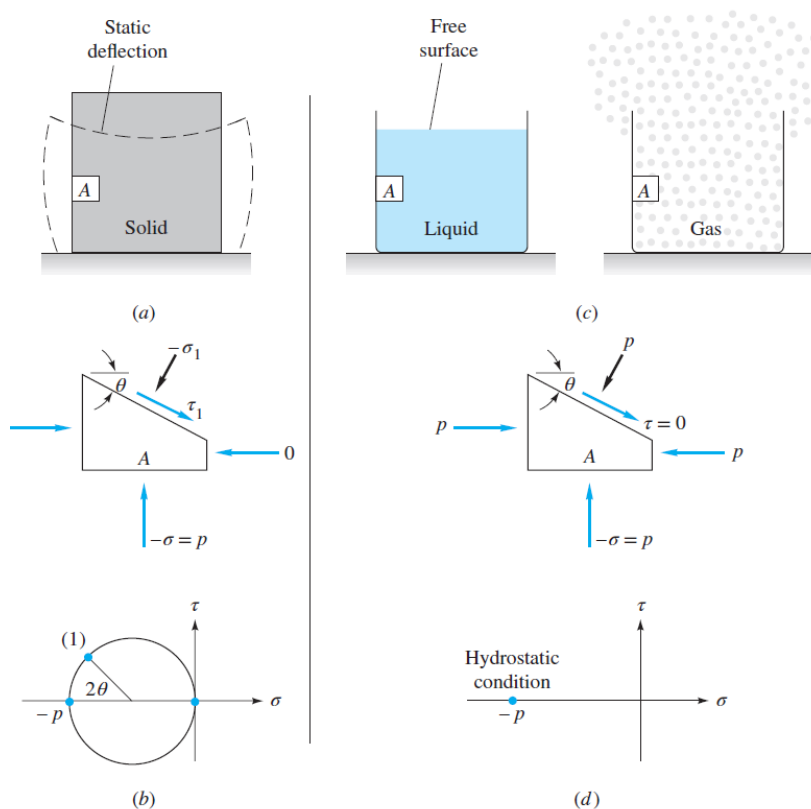
۱.۲ مفهوم سیال

از دیدگاه مکانیک سیالات، تمام مواد فقط از دو حالت تشکیل شده‌اند، سیال و جامد. تفاوت بین این دو برای افراد غیرمتخصص کاملاً واضح است و درخواست از یک فرد غیرمتخصص برای بیان این تفاوت به زبان ساده، تمرین جالبی است. تمایز فنی در واکنش این دو به تنش برشی یا مماسی اعمال شده نهفته است. یک جامد می‌تواند با انحراف استاتیکی در برابر تنش برشی مقاومت کند؛ اما یک سیال نمی‌تواند. هر تنش برشی اعمال شده بر یک سیال، هر چقدر هم کوچک، منجر به حرکت آن سیال خواهد شد. سیال تا زمانی که تنش برشی اعمال می‌شود، به طور مداوم حرکت می‌کند و تغییر شکل می‌دهد. به عنوان یک نتیجه، می‌توانیم بگوییم که یک سیال در حالت سکون باید در حالت تنش برشی صفر باشد، حالتی که اغلب در تحلیل سازه‌ای به آن شرایط تنش هیدرواستاتیک گفته می‌شود. در این شرایط، دایره مور برای تنش به یک نقطه کاهش می‌یابد و هیچ تنش برشی در هیچ صفحه‌ای که از المان تحت تنش عبور می‌کند، وجود ندارد.

با توجه به این تعریف از سیال، هر فرد غیرمتخصصی می‌داند که دو دسته سیال وجود دارد، مایعات و گازها. باز هم این تمایز، تمایزی فنی در مورد تأثیر نیروهای چسبندگی است. یک مایع، که از مولکول‌های نسبتاً فشرده با نیروهای چسبندگی قوی تشکیل شده است، تمایل دارد حجم خود را حفظ کند و اگر از بالا محصور نشده باشد، در میدان گرانشی یک سطح آزاد تشکیل می‌دهد. جریان‌های سطح آزاد تحت تأثیر اثرات گرانشی هستند و در فصل‌های ۵ و ۱۰ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از آنجایی که مولکول‌های گاز با نیروهای چسبندگی ناچیز، در فواصل زیادی از هم قرار گرفته‌اند، یک گاز می‌تواند تا زمانی که با دیوارهای محصورکننده برخورد کند، آزادانه منبسط شود. یک گاز حجم مشخصی ندارد و وقتی بدون محصور شدن به حال خود رها شود، اتمسفری را تشکیل می‌دهد که اساساً هیدرواستاتیک است. رفتار هیدرواستاتیک مایعات و گازها در فصل ۲ بررسی شده است. گازها نمی‌توانند سطح آزاد تشکیل دهند و بنابراین جریان‌های گاز به ندرت به اثرات گرانشی غیر از شناوری مربوط می‌شوند.

شکل ۱.۱ یک بلوک جامد را نشان می‌دهد که بر روی یک صفحه صلب قرار دارد و تحت فشار وزن خود است. این بلوک جامد به صورت یک انحراف استاتیکی، که به صورت یک خط چین بسیار اغراق‌آمیز نشان داده شده است، فرو می‌رود و در برابر برش بدون جریان مقاومت می‌کند. نمودار جسم آزاد عنصر A در کنار بلوک نشان می‌دهد که برشی در بلوک در امتداد صفحه‌ای که با زاویه θ از A بریده شده است، وجود دارد. از آنجایی که طرفین بلوک بدون تکیه‌گاه هستند، عنصر A در سمت چپ و راست دارای تنش صفر و در بالا و پایین دارای تنش فشاری $\sigma = -p$ است. دایره مور به یک نقطه کاهش نمی‌یابد و تنش برشی غیر صفر در بلوک وجود دارد.

در مقابل، مایع و گاز در حالت سکون در شکل ۱.۱ برای حذف تنش برشی به دیواره‌های نگهدارنده نیاز دارند. دیواره‌ها تنش فشاری $-p$ را اعمال می‌کنند و دایره مور را به نقطه‌ای با برش صفر در همه جا کاهش می‌دهند. - یعنی شرایط هیدرواستاتیک. مایع حجم خود را حفظ می‌کند و یک سطح آزاد در ظرف تشکیل می‌دهد. اگر دیواره‌ها برداشته شوند، برش در مایع ایجاد می‌شود و یک پاشش بزرگ ایجاد می‌شود. اگر ظرف کج شود، برش دوباره ایجاد می‌شود، امواج تشکیل می‌شوند و سطح آزاد به دنبال یک پیکربندی افقی می‌گردد و در صورت لزوم از لبه بیرون می‌زند. در همین حال، گاز مه‌پاش شده و از ظرف خارج می‌شود و تمام فضای موجود را پر می‌کند. عنصر A در گاز نیز هیدرواستاتیک است و تنش فشاری $-p$ را بر روی دیواره‌ها اعمال می‌کند.



شکل ۱.۱ یک جسم جامد در حالت سکون می‌تواند در برابر برش مقاومت کند. (الف) انحراف استاتیکی جسم جامد؛ (ب) تعادل و دایره مور برای المان جامد A. یک سیال نمی‌تواند در برابر برش مقاومت کند. (ج) دیواره‌های نگهدارنده مورد نیاز است؛ (د) تعادل و دایره مور برای المان سیال A. در بحث قبلی، تصمیمات روشنی در مورد جامدات، مایعات و گازها گرفته شد. اکثر

مسائل مکانیک سیالات مهندسی با این موارد واضح سروکار دارند - یعنی مایعات رایج مانند آب، روغن، جیوه،

بنزین و الکل و گازهای رایج مانند هوا، هلیوم، هیدروژن و بخار، در محدوده دما و فشار رایج خود. با این حال، موارد مرزی زیادی وجود دارد که باید از آنها آگاه باشید. برخی از مواد ظاهراً "جامد" مانند آسفالت و سرب برای مدت کوتاهی در برابر تنش برشی مقاومت می‌کنند، اما در واقع به آرامی تغییر شکل می‌دهند و در مدت طولانی رفتار سیال مشخصی از خود نشان می‌دهند. سایر مواد، به ویژه مخلوط‌های کلوئیدی و دوغاب، در برابر تنش‌های برشی کوچک مقاومت می‌کنند، اما در تنش‌های بزرگ "تسلیم" می‌شوند و مانند مایعات شروع به جریان یافتن می‌کنند. کتاب‌های درسی تخصصی به این مطالعه تغییر شکل و جریان عمومی‌تر، زمینه‌ای به نام رئولوژی [۱۶]، اختصاص داده شده‌اند. همچنین، مایعات و گازها می‌توانند در مخلوط‌های دو فازی، مانند مخلوط‌های بخار-آب یا آب با حباب‌های هوای محبوس، همزمان وجود داشته باشند. کتاب‌های درسی تخصصی، تجزیه و تحلیل چنین جریان‌های چند فازی را ارائه می‌دهند [۱۷]. در نهایت، در برخی موقعیت‌ها، تمایز بین مایع و گاز محو می‌شود. این مورد در دماها و فشارهای بالاتر از نقطه بحرانی یک ماده، که در آن فقط یک فاز واحد وجود دارد و عمده‌تاً شبیه گاز است، صدق می‌کند. با افزایش فشار بسیار بالاتر از نقطه بحرانی، ماده گاز مانند آنقدر متراکم می‌شود که شباهتی به مایع پیدا می‌کند و تقریب‌های ترمودینامیکی معمول مانند قانون گاز کامل نادرست می‌شوند. دما و فشار بحرانی آب $T_c = 647$ کلوین و $p_c = 219$ اتمسفر (اتم‌سفر) هستند، به طوری که مسائل معمول مربوط به آب و بخار زیر نقطه بحرانی قرار دارند. هوا، که ترکیبی از گازها است، نقطه بحرانی مشخصی ندارد، اما جزء اصلی آن، نیتروژن، $T_c = 126$ کلوین و $p_c = 34$ اتمسفر دارد. بنابراین، مسائل معمول مربوط به هوا در محدوده دمای بالا و فشار پایین قرار دارند که در آن هوا به طور مشخص و قطعی یک گاز است. این متن منحصراً به مایعات و گازهای قابل شناسایی می‌پردازد و موارد مرزی که قبلاً مورد بحث قرار گرفته است، خارج از محدوده ما خواهد بود.

۱.۳ سیال به عنوان یک پیوستار

ما قبلاً از اصطلاحات فنی مانند فشار و چگالی سیال بدون بحث دقیق در مورد تعریف آنها استفاده کرده‌ایم. تا آنجا که می‌دانیم، سیالات تجمع مولکول‌ها هستند که برای گاز از هم فاصله زیادی دارند و برای مایع از هم فاصله کمی دارند. فاصله بین مولکول‌ها در مقایسه با قطر مولکولی بسیار زیاد است. مولکول‌ها در یک شبکه ثابت نیستند، بلکه آزادانه نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند. بنابراین چگالی سیال یا جرم در واحد حجم، معنای دقیقی ندارد زیرا تعداد مولکول‌هایی که یک حجم معین را اشغال می‌کنند، به طور مداوم تغییر می‌کند. اگر حجم واحد در مقایسه با مثلاً مکعب فاصله مولکولی بزرگ باشد، این اثر بی‌اهمیت می‌شود، زمانی که تعداد مولکول‌های درون حجم با وجود تبادل عظیم ذرات در مرزها تقریباً ثابت می‌ماند. با این حال، اگر حجم واحد انتخاب شده خیلی بزرگ باشد، ممکن است تغییر قابل توجهی در تجمع توده‌ای ذرات وجود داشته باشد. این وضعیت در شکل ۱.۲ نشان داده شده است، که در آن «چگالی» محاسبه شده از جرم مولکولی δm

در یک حجم معین δV در مقابل اندازه واحد حجم رسم شده است. یک حجم محدود δV^* وجود دارد که در زیر آن تغییرات مولکولی و در بالای آن تغییرات کل ممکن است مهم باشند. چگالی ρ یک سیال به بهترین شکل به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^*} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1.1)$$

حجم محدودکننده δV^* برای همه مایعات و برای گازها در فشار اتمسفر حدود 10^{-9} میلی‌متر مکعب است. به عنوان مثال، 10^{-9} میلی‌متر مکعب هوا در شرایط استاندارد تقریباً شامل 3×10^7 مولکول است که برای تعریف چگالی تقریباً ثابت طبق معادله (۱.۱) کافی است. اکثر مسائل مهندسی مربوط به ابعاد فیزیکی بسیار بزرگتر از این حجم محدودکننده هستند، به طوری که چگالی اساساً یک تابع نقطه‌ای است و می‌توان خواص سیال را به صورت متغیر پیوسته در فضا، همانطور که در شکل ۱.۲ نشان داده شده است، در نظر گرفت. چنین سیالی، پیوسته نامیده می‌شود، به این معنی که تغییر خواص آن آنقدر هموار است که می‌توان از حساب دیفرانسیل و انتگرال برای تجزیه و تحلیل ماده استفاده کرد. فرض می‌کنیم که حساب پیوسته برای همه تحلیل‌های این کتاب معتبر است. باز هم دو حالت مرزی برای گازها وجود دارد. یکی در فشارهای بسیار پایین است که فاصله مولکولی و میانگین مسیر آزاد mfp با اندازه فیزیکی سیستم قابل مقایسه یا بزرگتر از آن هستند. کاربردهای آن شامل مهندسی خلاء، تحلیل آیروترمال و طراحی فضاپیماها، ماهواره‌ها، موشک‌ها و غیره است که در ارتفاعات بالا پرواز می‌کنند. اثرات غیرپیوسته نیز زمانی که مقیاس‌های طول سیستم به ابعاد میکروسکوپی کوچک کاهش می‌یابند، قابل توجه می‌شوند. کاربردهایی با مقیاس‌های طول میکروسکوپی از زمان ظهور سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) و نانودستگاه‌ها، که در آن‌ها طول مشخصه سیستم به بزرگی زیر میکرون یا نانومتر کاهش می‌یابد، به طور فزاینده‌ای رایج شده‌اند. هر دو مورد مستلزم آن است که تقریب پیوستار به نفع یک نظریه مولکولی جریان گاز رقیق کنار گذاشته شود [۱۸]. در اصل، همه مسائل مکانیک سیالات را می‌توان از دیدگاه مولکولی بررسی کرد، اما در اینجا چنین تلاشی انجام نخواهد شد. توجه داشته باشید که استفاده از حساب پیوستار، امکان جهش‌های ناپیوسته در خواص سیال در سطح آزاد یا سطح مشترک سیال یا در موج ضربه‌ای در یک سیال تراکم‌پذیر را منتفی نمی‌کند (فصل ۹). حساب ما در تحلیل جریان سیال باید به اندازه کافی انعطاف‌پذیر باشد تا شرایط مرزی ناپیوسته را در نظر بگیرد.

۱.۴ ابعاد و واحدها

بعد، معیاری است که یک متغیر فیزیکی به صورت کمی با آن بیان می‌شود. واحد، روش خاصی برای اتصال یک عدد به بعد کمی است. بنابراین طول، بُعدی است که با متغیرهایی مانند فاصله، جابجایی، عرض، انحراف

و ارتفاع مرتبط است، در حالی که سانتی‌متر و اینچ هر دو واحدهای عددی برای بیان طول هستند. بُعد، مفهومی قدرتمند است که در مورد آن ابزاری عالی به نام تحلیل ابعادی توسعه داده شده است (فصل ۵)، در حالی که واحدها، کمیت عددی هستند که مشتری به عنوان پاسخ نهایی می‌خواهد.

در سال ۱۸۷۲، یک نشست بین‌المللی در فرانسه، معاهده‌ای به نام کنوانسیون متریک را پیشنهاد کرد که در سال ۱۸۷۵ توسط ۱۷ کشور از جمله ایالات متحده امضا شد. این معاهده نسبت به سیستم‌های بریتانیایی پیشرفتی محسوب می‌شد، زیرا استفاده از مبنای ۱۰، پایه و اساس سیستم اعداد ما است که از کودکی توسط همه آموخته شده است. مشکلات همچنان پابرجا بود، زیرا حتی کشورهای متریک در استفاده از کیلوپوندها به جای دین یا نیوتن، کیلوگرم به جای گرم یا کالری به جای ژول، متفاوت بودند. برای استانداردسازی سیستم متریک، کنفرانس عمومی اوزان و مقیاس‌ها، که در سال ۱۹۶۰ با حضور ۴۰ کشور برگزار شد، سیستم بین‌المللی واحدها (SI) را پیشنهاد کرد. اکنون ما در حال گذراندن یک دوره دردناک گذار به SI هستیم، تعدیلی که ممکن است سال‌های بیشتری طول بکشد تا تکمیل شود. جوامع حرفه‌ای در این مسیر پیشگام بوده‌اند. از اول ژوئیه ۱۹۷۴، واحدهای SI توسط تمام مقالات منتشر شده توسط انجمن مهندسان مکانیک آمریکا الزامی شده‌اند و یک کتاب درسی وجود دارد که SI را توضیح می‌دهد [۱۹]. متن حاضر از واحدهای SI به همراه واحدهای گرانشی بریتانیایی (BG) استفاده خواهد کرد.

ابعاد اولیه

در مکانیک سیالات تنها چهار بعد اولیه وجود دارد که می‌توان تمام ابعاد دیگر را از آنها استخراج کرد: جرم، طول، زمان و دما. این ابعاد و واحدهای آنها در هر دو سیستم در جدول ۱.۱ آورده شده است. توجه داشته باشید که واحد کلونین از هیچ نماد درجه‌ای استفاده نمی‌کند. پرانتزهای اطراف نمادی مانند $\{M\}$ به معنای "بعد" جرم است. سایر متغیرها در مکانیک سیالات را می‌توان بر حسب $\{M\}$ ، $\{L\}$ ، $\{T\}$ و $\{\Theta\}$ بیان کرد. به عنوان مثال، شتاب دارای ابعاد $\{LT^{-2}\}$ است. مهمترین این ابعاد ثانویه، نیرو است که طبق قانون دوم نیوتن مستقیماً با جرم، طول و زمان مرتبط است. نیرو برابر است با نرخ زمانی تغییر تکانه یا برای جرم ثابت.

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1.2)$$

از این رو می‌بینیم که از نظر بُعدی، $\{F\} = \{MLT^{-2}\}$.

سیستم بین‌المللی (SI)

استفاده از ثابت تناسب در قانون نیوتن، معادله (۱.۲)، با تعریف دقیق واحد نیرو بر حسب واحدهای پایه، اجتناب می‌شود. در سیستم SI، واحدهای پایه کیلوگرم {M}، متر {L} و ثانیه {T} هستند. ما ۱ نیوتن نیرو را برابر با $1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$ تعریف می‌کنیم.

نیوتن نیروی نسبتاً کوچکی است، تقریباً به اندازه وزن یک سیب (۰.۲۲۵ پوند-نیرو). علاوه بر این، واحد پایه دما {Θ} در سیستم SI، درجه کلوین، K است. آنها به عنوان سیستم ابعاد MLTΘ شناخته می‌شوند. استفاده از این واحدهای SI (کیلوگرم، متر، ثانیه، کلوین) نیازی به ضریب تبدیل در معادلات ما نخواهد داشت.

سیستم گرانشی بریتانیا (BG)

در سیستم BG، همچنین با تعریف دقیق واحد نیرو بر حسب واحدهای پایه، از ثابت تناسب در معادله (۱.۲) اجتناب می‌شود. در سیستم BG، واحدهای پایه عبارتند از پوند-نیرو {F}، فوت {L} و ثانیه {T}. ما ۱ پوند نیرو را برابر با ۱ پوند-نیرو = ۱ اسلاگ · ۱ فوت بر مجذور ثانیه تعریف می‌کنیم. یک پوند-نیرو ≈ 4.4482 نیوتن است و تقریباً وزن چهار سیب را نشان می‌دهد. ما از اختصار lbf برای پوند-نیرو و lbm برای پوند-جرم استفاده خواهیم کرد. اسلاگ جرم نسبتاً سنگینی است که برابر با ۳۲.۱۷۴ پوند-نیرو می‌باشد. واحد پایه دما {Θ} در سیستم BG، درجه رانکین، R° است. به یاد داشته باشید که اختلاف دما ۱ کلوین = ۱.۸ R° است. آنها به عنوان سیستم ابعاد FLTΘ شناخته می‌شوند. استفاده از این واحدهای BG (پوند، فوت، ثانیه، درجه سانتیگراد) نیازی به ضریب تبدیل در معادلات ما نخواهد داشت.

سیستم‌های واحد دیگر

سیستم‌های واحد دیگری هنوز مورد استفاده هستند. حداقل یکی از آنها نیازی به ثابت تناسب ندارد: سیستم CGS (دین، گرم، سانتی‌متر مربع، ثانیه، کلوین). با این حال، واحدهای CGS برای اکثر کاربردها بسیار کوچک هستند (۱ دین = ۱۰-۵ نیوتن) و در اینجا استفاده نخواهند شد.

در ایالات متحده آمریکا، برخی هنوز از سیستم مهندسی انگلیسی (پوند نیرو، پوند جرم، فوت، ثانیه، درجه رانکین) استفاده می‌کنند، که در آن واحد جرم پایه، پوند جرم است. قانون نیوتن (۱.۲) باید بازنویسی شود:

$$\mathbf{F} = \frac{m\mathbf{a}}{g_c}, \quad \text{where} \quad g_c = 32.174 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbm}}{\text{lbf} \cdot \text{s}^2}$$

ثابت تناسب، g_c، هم بُعد دارد و هم مقدار عددی آن برابر با ۱.۰ نیست. متن حاضر فقط از سیستم‌های SI و BG استفاده می‌کند و مسائل یا مثال‌هایی را در سیستم مهندسی انگلیسی حل نمی‌کند. از آنجا که آمریکایی‌ها

هنوز از آنها استفاده می‌کنند، چند مسئله در متن با واحدهای واقعاً نامناسب بیان خواهند شد: جریب، گالن، اونس یا مایل. تکلیف شما تبدیل این واحدها و حل آنها در سیستم‌های SI یا BG خواهد بود.

اصل همگنی ابعادی در مهندسی و علوم، همه معادلات باید از نظر ابعادی همگن باشند، یعنی هر عبارت افزایشی در یک معادله باید ابعاد یکسانی داشته باشد. به عنوان مثال، معادله تراکم‌ناپذیر برنولی را در نظر بگیرید که قرار است در سراسر این متن مورد مطالعه و استفاده قرار گیرد:

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gZ = \text{constant}$$

هر یک از عبارات این معادله باید ابعاد فشار $\{ML^{-1}T^{-2}\}$ را داشته باشند. ما همگنی ابعادی این معادله را به تفصیل در مثال ۱.۳ بررسی خواهیم کرد.

Table 1.2 Secondary Dimensions in Fluid Mechanics

Secondary dimension	SI unit	BG unit	Conversion factor
Area $\{L^2\}$	m^2	ft^2	$1 m^2 = 10.764 ft^2$
Volume $\{L^3\}$	m^3	ft^3	$1 m^3 = 35.315 ft^3$
Velocity $\{LT^{-1}\}$	m/s	ft/s	$1 ft/s = 0.3048 m/s$
Acceleration $\{LT^{-2}\}$	m/s^2	ft/s^2	$1 ft/s^2 = 0.3048 m/s^2$
Pressure or stress $\{ML^{-1}T^{-2}\}$	$Pa = N/m^2$	lbf/ft^2	$1 lbf/ft^2 = 47.88 Pa$
Angular velocity $\{T^{-1}\}$	s^{-1}	s^{-1}	$1 s^{-1} = 1 s^{-1}$
Energy, heat, work $\{ML^2T^{-2}\}$	$J = N \cdot m$	$ft \cdot lbf$	$1 ft \cdot lbf = 1.3558 J$
Power $\{ML^2T^{-3}\}$	$W = J/s$	$ft \cdot lbf/s$	$1 ft \cdot lbf/s = 1.3558 W$
Density $\{ML^{-3}\}$	kg/m^3	$slugs/ft^3$	$1 slug/ft^3 = 515.4 kg/m^3$
Viscosity $\{ML^{-1}T^{-1}\}$	$kg/(m \cdot s)$	$slugs/(ft \cdot s)$	$1 slug/(ft \cdot s) = 47.88 kg/(m \cdot s)$
Specific heat $\{L^2T^{-2}\Theta^{-1}\}$	$m^2/(s^2 \cdot K)$	$ft^2/(s^2 \cdot ^\circ R)$	$1 m^2/(s^2 \cdot K) = 5.980 ft^2/(s^2 \cdot ^\circ R)$

فهرستی از برخی متغیرهای ثانویه مهم در مکانیک سیالات، به همراه ابعاد مشتق شده از ترکیب چهار بعد اصلی، در جدول ۱.۲ ارائه شده است. فهرست کامل‌تری از ضرایب تبدیل در پیوست C آمده است.

مثال ۱.۱

وزن جسمی در معرض گرانش استاندارد زمین $g = 32.174 ft/s^2$ ، $g = 1000$ پوند-نیرو است. (الف) جرم آن بر حسب کیلوگرم چقدر است؟ (ب) وزن این جسم بر حسب نیوتن چقدر خواهد بود اگر در معرض شتاب استاندارد ماه $g = 1.62 m/s^2$ قرار گیرد؟ (ج) اگر نیروی خالص 400 پوند-نیرو بر روی ماه یا زمین به آن وارد شود، جسم با چه سرعتی شتاب می‌گیرد؟

Solution

We need to find the (a) mass; (b) weight on the moon; and (c) acceleration of this body. This is a fairly simple example of conversion factors for differing unit systems. No property data is needed. The example is too low level for a sketch.

Part (a)

Newton's law (1.2) holds with known weight and gravitational acceleration. Solve for m :

$$F = W = 1000 \text{ lbf} = mg = (m)(32.174 \text{ ft/s}^2), \quad \text{or} \quad m = \frac{1000 \text{ lbf}}{32.174 \text{ ft/s}^2} = 31.08 \text{ slugs}$$

Convert this to kilograms:

$$m = 31.08 \text{ slugs} = (31.08 \text{ slugs})(14.5939 \text{ kg/slug}) = 454 \text{ kg} \quad \text{Ans. (a)}$$

Part (b)

The mass of the body remains 454 kg regardless of its location. Equation (1.2) applies with a new gravitational acceleration and hence a new weight:

$$F = W_{\text{moon}} = mg_{\text{moon}} = (454 \text{ kg})(1.62 \text{ m/s}^2) = 735 \text{ N} = 165 \text{ lbf} \quad \text{Ans. (b)}$$

Part (c)

This part does not involve weight or gravity or location. It is simply an application of Newton's law with a known mass and known force:

$$F = 400 \text{ lbf} = ma = (31.08 \text{ slugs}) a$$

Solve for

$$a = \frac{400 \text{ lbf}}{31.08 \text{ slugs}} = 12.87 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \left(0.3048 \frac{\text{m}}{\text{ft}} \right) = 3.92 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \text{Ans. (c)}$$

Comment (c): This acceleration would be the same on the earth or moon or anywhere.

بسیاری از داده‌های موجود در مقالات علمی با واحدهای نامناسب یا محرمانه‌ای گزارش شده‌اند که فقط برای برخی صنایع، تخصص‌ها یا کشورها مناسب هستند. مهندس باید قبل از استفاده از این داده‌ها، آنها را به سیستم SI یا BG تبدیل کند. این امر مستلزم اعمال سیستماتیک ضرایب تبدیل، مانند مثال زیر است.

EXAMPLE 1.2

Industries involved in viscosity measurement [27, 29] continue to use the CGS system of units, since centimeters and grams yield convenient numbers for many fluids. The absolute viscosity (μ) unit is the *poise*, named after J. L. M. Poiseuille, a French physician who in 1840 performed pioneering experiments on water flow in pipes; 1 poise = 1 g/(cm·s). The kinematic viscosity (ν) unit is the *stokes*, named after G. G. Stokes, a British physicist who in 1845 helped develop the basic partial differential equations of fluid momentum; 1 stokes = 1 cm²/s. Water at 20°C has $\mu \approx 0.01$ poise and also $\nu \approx 0.01$ stokes. Express these results in (a) SI and (b) BG units.

Solution

Part (a)

- *Approach:* Systematically change grams to kg or slugs and change centimeters to meters or feet.
- *Property values:* Given $\mu = 0.01$ g/(cm·s) and $\nu = 0.01$ cm²/s.
- *Solution steps:* (a) For conversion to SI units,

$$\begin{aligned}\mu &= 0.01 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} = 0.01 \frac{\text{g}(1 \text{ kg}/1000 \text{ g})}{\text{cm}(0.01 \text{ m}/\text{cm})\text{s}} = 0.001 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \\ \nu &= 0.01 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} = 0.01 \frac{\text{cm}^2(0.01 \text{ m}/\text{cm})^2}{\text{s}} = 0.000001 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{Ans. (a)}\end{aligned}$$

Part (b)

- For conversion to BG units

$$\begin{aligned}\mu &= 0.01 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} = 0.01 \frac{\text{g}(1 \text{ kg}/1000 \text{ g})(1 \text{ slug}/14.5939 \text{ kg})}{(0.01 \text{ m}/\text{cm})(1 \text{ ft}/0.3048 \text{ m})\text{s}} = 0.0000209 \frac{\text{slug}}{\text{ft} \cdot \text{s}} \\ \nu &= 0.01 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} = 0.01 \frac{\text{cm}^2(0.01 \text{ m}/\text{cm})^2(1 \text{ ft}/0.3048 \text{ m})^2}{\text{s}} = 0.0000108 \frac{\text{ft}^2}{\text{s}} \quad \text{Ans. (b)}\end{aligned}$$

- *Comments:* This was a laborious conversion that could have been shortened by using the direct viscosity conversion factors in App. C or the inside front cover. For example, $\mu_{\text{BG}} = \mu_{\text{SI}}/47.88$.

مثال ۱.۲

صنایعی که در اندازه‌گیری ویسکوزیته [۲۷، ۲۹] فعالیت دارند، همچنان از سیستم واحدهای CGS استفاده می‌کنند، زیرا سانتی‌متر و گرم اعداد مناسبی را برای بسیاری از مایعات ارائه می‌دهند. واحد ویسکوزیته مطلق (μ) پواز است که به نام J. L. M. Poiseuille پزشک فرانسوی که در سال ۱۸۴۰ آزمایش‌های پیشگامانه‌ای روی جریان آب در لوله‌ها انجام داد، نامگذاری شده است. ۱ پواز = ۱ گرم بر (سانتی‌متر در ثانیه). واحد ویسکوزیته سینماتیک (ν) استوکس است که به نام G. G. Stokes، فیزیکدان بریتانیایی که در سال ۱۸۴۵

به توسعه معادلات دیفرانسیل جزئی اساسی تکانه سیال کمک کرد، نامگذاری شده است. ۱ استوکس = ۱ سانتی‌متر مربع بر ثانیه. آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد دارای $\mu \approx 0.01$ پواز و همچنین $\nu \approx 0.01$ استوکس است. این نتایج را در واحدهای (الف) SI و (ب) BG بیان کنید.

ما توصیه خود را تکرار می‌کنیم: در مواجهه با داده‌هایی با واحدهای غیرمعمول، آنها را فوراً به واحدهای SI یا BG تبدیل کنید زیرا (۱) حرفه‌ای‌تر است و (۲) معادلات نظری در مکانیک سیالات از نظر ابعادی سازگار هستند و هنگام استفاده از این دو سیستم واحد اساسی، همانطور که مثال زیر نشان می‌دهد، نیازی به ضرایب تبدیل بیشتر ندارند.

مثال ۱.۳

یک معادله نظری مفید برای محاسبه رابطه بین فشار، سرعت و ارتفاع در جریان پایدار یک سیال تقریباً غیرلزج و تقریباً تراکم‌ناپذیر با انتقال حرارت و کار شفت ناچیز، رابطه برنولی است که به نام دانیل برنولی نامگذاری شده است، که در سال ۱۷۳۸ یک کتاب درسی هیدرودینامیک منتشر کرد:

EXAMPLE 1.3

A useful theoretical equation for computing the relation between pressure, velocity, and altitude in a steady flow of a nearly inviscid, nearly incompressible fluid with negligible heat transfer and shaft work⁵ is the *Bernoulli relation*, named after Daniel Bernoulli, who published a hydrodynamics textbook in 1738:

$$p_0 = p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gZ \quad (1)$$

where p_0 = stagnation pressure

p = pressure in moving fluid

V = velocity

ρ = density

Z = altitude

g = gravitational acceleration

(a) Show that Eq. (1) satisfies the principle of dimensional homogeneity, which states that all additive terms in a physical equation must have the same dimensions. (b) Show that consistent units result without additional conversion factors in SI units. (c) Repeat (b) for BG units.

Solution

Part (a)

We can express Eq. (1) dimensionally, using braces, by entering the dimensions of each term from Table 1.2:

$$\begin{aligned}\{ML^{-1}T^{-2}\} &= \{ML^{-1}T^{-2}\} + \{ML^{-3}\}\{L^2T^{-2}\} + \{ML^{-3}\}\{LT^{-2}\}\{L\} \\ &= \{ML^{-1}T^{-2}\} \text{ for all terms} \quad \text{Ans. (a)}\end{aligned}$$

Part (b)

Enter the SI units for each quantity from Table 1.2:

$$\begin{aligned}\{\text{N/m}^2\} &= \{\text{N/m}^2\} + \{\text{kg/m}^3\}\{\text{m}^2/\text{s}^2\} + \{\text{kg/m}^3\}\{\text{m/s}^2\}\{\text{m}\} \\ &= \{\text{N/m}^2\} + \{\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)\}\end{aligned}$$

The right-hand side looks bad until we remember from Eq. (1.3) that $1 \text{ kg} = 1 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}$.

$$\{\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)\} = \frac{\{\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}\}}{\{\text{m} \cdot \text{s}^2\}} = \{\text{N/m}^2\} \quad \text{Ans. (b)}$$

$$p_0 = p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gZ \quad (1)$$

where p_0 = stagnation pressure

p = pressure in moving fluid

V = velocity

ρ = density

Z = altitude

g = gravitational acceleration

(a) Show that Eq. (1) satisfies the principle of dimensional homogeneity, which states that all additive terms in a physical equation must have the same dimensions. (b) Show that consistent units result without additional conversion factors in SI units. (c) Repeat (b) for BG units.

Solution

Part (a)

We can express Eq. (1) dimensionally, using braces, by entering the dimensions of each term from Table 1.2:

$$\begin{aligned}\{ML^{-1}T^{-2}\} &= \{ML^{-1}T^{-2}\} + \{ML^{-3}\}\{L^2T^{-2}\} + \{ML^{-3}\}\{LT^{-2}\}\{L\} \\ &= \{ML^{-1}T^{-2}\} \text{ for all terms} \quad \text{Ans. (a)}\end{aligned}$$

Part (b)

Enter the SI units for each quantity from Table 1.2:

$$\begin{aligned}\{N/m^2\} &= \{N/m^2\} + \{kg/m^3\}\{m^2/s^2\} + \{kg/m^3\}\{m/s^2\}\{m\} \\ &= \{N/m^2\} + \{kg/(m \cdot s^2)\}\end{aligned}$$

The right-hand side looks bad until we remember from Eq. (1.3) that $1 \text{ kg} = 1 \text{ N} \cdot s^2/m$.

$$\{kg/(m \cdot s^2)\} = \frac{\{N \cdot s^2/m\}}{\{m \cdot s^2\}} = \{N/m^2\} \quad \text{Ans. (b)}$$

Thus all terms in Bernoulli's equation will have units of pascals, or newtons per square meter, when SI units are used. No conversion factors are needed, which is true of all theoretical equations in fluid mechanics.

Part (c)

Introducing BG units for each term, we have

$$\begin{aligned}\{lbf/ft^2\} &= \{lbf/ft^2\} + \{slugs/ft^3\}\{ft^2/s^2\} + \{slugs/ft^3\}\{ft/s^2\}\{ft\} \\ &= \{lbf/ft^2\} + \{slugs/(ft \cdot s^2)\}\end{aligned}$$

But, from Eq. (1.3), $1 \text{ slug} = 1 \text{ lbf} \cdot s^2/ft$, so that

$$\{slugs/(ft \cdot s^2)\} = \frac{\{lbf \cdot s^2/ft\}}{\{ft \cdot s^2\}} = \{lbf/ft^2\} \quad \text{Ans. (c)}$$

All terms have the unit of pounds-force per square foot. No conversion factors are needed in the BG system either.

هنوز هم در کشورهای انگلیسی زبان تمایل به استفاده از پوند-نیرو بر اینچ مربع به عنوان واحد فشار وجود دارد زیرا اعداد قابل کنترل تر هستند. به عنوان مثال، فشار اتمسفر استاندارد ۱۴.۷ پوند-نیرو بر اینچ مربع = ۲۱۱۶ پوند-نیرو بر فوت مربع = ۱۰۱,۳۰۰ پاسکال است. پاسکال واحد کوچکی است زیرا نیوتن کمتر از ۱۴ پوند-نیرو است و یک متر مربع مساحت بسیار بزرگی است.

واحدهای سازگار

توجه داشته باشید که نه تنها همه معادلات مکانیک (سیالات) باید از نظر ابعادی همگن باشند، بلکه باید از واحدهای سازگار نیز استفاده کرد؛ یعنی هر عبارت افزایشی باید واحدهای یکسانی داشته باشد. انجام این کار با سیستم‌های SI و BG، مانند مثال ۱.۳، مشکلی ندارد، اما وای بر کسانی که سعی می‌کنند واحدهای محاوره‌ای انگلیسی را با هم ترکیب کنند. به عنوان مثال، در فصل ۹، ما اغلب از فرض جریان گاز قابل تراکم آدیاباتیک پایدار استفاده می‌کنیم:

$$h + \frac{1}{2}V^2 = \text{constant}$$

که در آن h آنتالپی سیال و $V^2/2$ انرژی جنبشی آن بر واحد جرم است. جداول ترمودینامیکی محاوره‌ای ممکن است h را بر حسب واحدهای حرارتی بریتانیایی بر پوند جرم (Btu/lb) فهرست کنند، در حالی که V احتمالاً بر حسب فوت بر ثانیه استفاده می‌شود. جمع کردن Btu/lb به ft²/s² کاملاً اشتباه است. واحد مناسب برای h در این مورد ft lbf/slug است که معادل ft²/s² است. ضریب تبدیل

$$1 \text{ Btu/lb} \approx 25,040 \text{ ft}^2/\text{s}^2 = 25,040 \text{ ft} \cdot \text{lbf/slug}$$

معادلات همگن در مقابل معادلات ناسازگار از نظر ابعادی

تمام معادلات نظری در مکانیک (و در سایر علوم فیزیکی) از نظر ابعادی همگن هستند؛ یعنی هر عبارت افزایشی در معادله دارای ابعاد یکسانی است. با این حال، باید به خواننده هشدار داد که بسیاری از فرمول‌های تجربی در ادبیات مهندسی، که عمدتاً از همبستگی داده‌ها ناشی می‌شوند، از نظر ابعادی ناسازگار هستند. واحدهای آنها را نمی‌توان به سادگی تطبیق داد و برخی از عبارات ممکن است حاوی متغیرهای پنهان باشند. به عنوان مثال، فرمولی است که تولیدکنندگان شیر لوله برای نرخ جریان حجمی مایع Q (m³/s) از طریق یک شیر نیمه باز ذکر می‌کنند:

$$Q = C_d A_{\text{opening}} \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)^{1/2}$$

که در آن ρ چگالی مایع و A مساحت دهانه شیر است. ضریب تخلیه C_d بدون بعد است و فقط با اندازه شیر به طور متوسط تغییر می‌کند.

لطفاً باور کنید - تا زمانی که این واقعیت را در فصل ۵ ثابت کنیم - که این مورد اخیر فرمول‌بندی بسیار بهتری از داده‌ها است.

در همین حال، نتیجه می‌گیریم که معادلات ناسازگار از نظر ابعادی، اگرچه در عمل مهندسی رخ می‌دهند، گمراه‌کننده و مبهم و حتی خطرناک هستند، به این معنا که اغلب در خارج از محدوده کاربرد خود مورد سوءاستفاده قرار می‌گیرند.

پیشوندهای مناسب در توان‌های ۱۰

نتایج مهندسی اغلب برای واحدهای رایج، با صفرهای زیاد، بسیار کوچک یا بسیار بزرگ هستند. برای مثال، نوشتن $p = 114,000,000 \text{ Pa}$ طولانی و ناشیانه است. با استفاده از پیشوند "M" برای نشان دادن ۱۰۶، ما این را به صورت مختصر $p = 114 \text{ MPa}$ (مگاپاسکال) تبدیل می‌کنیم. به طور مشابه، $t = 0.000000003 \text{ s}$ در مقایسه با معادل $t = 3 \text{ ns}$ (نانو ثانیه) کابوسی برای ویراستاران است. چنین پیشوندهایی در هر دو سیستم SI و BG رایج و مناسب هستند. لیست کاملی در جدول ۱.۳ ارائه شده است.

مثال ۱.۴

در سال ۱۸۹۰، رابرت منینگ، یک مهندس ایرلندی، فرمول تجربی زیر را برای سرعت متوسط V در جریان یکنواخت ناشی از گرانش در یک کانال باز (واحد BG) پیشنهاد کرد:

$$V = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

که در آن R = شعاع هیدرولیکی کانال (فصل‌های ۶ و ۱۰)

S = شیب کانال (تانژانت زاویه‌ای که کف با سطح افقی می‌سازد)

n = ضریب زبری مانینگ (فصل ۱۰)

و n یک ثابت برای شرایط سطحی معین برای دیوارها و کف کانال است.

(الف) آیا فرمول مانینگ از نظر ابعادی سازگار است؟ (ب) معادله (۱) معمولاً در واحدهای BG با n بدون بعد معتبر در نظر گرفته می‌شود. آن را به شکل SI بازنویسی کنید.

راه حل

• فرض: شیب کانال S تانژانت یک زاویه است و بنابراین یک نسبت بدون بعد با نماد ابعادی $\{1\}$ است - یعنی شامل M، L یا T نمی‌شود.

• رویکرد (الف): ابعاد هر عبارت در معادله مانینگ را با استفاده از براکت‌ها بازنویسی کنید. $\{ \}$:

$$\{V\} = \left\{ \frac{1.49}{n} \right\} \{R^{2/3}\} \{S^{1/2}\} \quad \text{or} \quad \left\{ \frac{L}{T} \right\} = \left\{ \frac{1.49}{n} \right\} \{L^{2/3}\} \{1\}$$

این فرمول ناسازگار است مگر اینکه $\{1.49/n\} = \{L^{1/3}/T\}$ باشد. اگر n بدون بعد باشد (و هرگز در کتاب‌های درسی با واحد ذکر نشده باشد)، عدد ۱.۴۹ باید ابعاد $\{L^{1/3}/T\}$ را داشته باشد. پاسخ (الف)

• نظر (الف): فرمول‌هایی که ضرایب عددی آنها دارای واحد هستند، می‌توانند برای مهندسانی که در یک سیستم متفاوت یا سیال دیگر کار می‌کنند، فاجعه‌بار باشند. فرمول مانینگ، اگرچه محبوب است، اما از نظر ابعادی و فیزیکی ناسازگار است و فقط برای جریان آب با زبری‌های دیواره خاص معتبر است. اثرات ویسکوزیته و چگالی آب در مقدار عددی ۱.۴۹ پنهان است.

• رویکرد (ب): بخش (الف) نشان داد که ۱.۴۹ دارای بعد است. اگر فرمول در واحدهای BG معتبر باشد، باید برابر با ۱.۴۹ فوت بر ثانیه باشد. با استفاده از تبدیل SI برای طول، به دست می‌آوریم

$$(1.49 \text{ ft}^{1/3}/\text{s})(0.3048 \text{ m/ft})^{1/3} = 1.00 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

بنابراین، فرمول ناسازگار مانینگ هنگام تبدیل به سیستم SI تغییر شکل می‌دهد:

$$\text{SI units: } V = \frac{1.0}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{Ans. (b)}$$

با R بر حسب متر و V بر حسب متر بر ثانیه.

• نظر (ب): در واقع، ما شما را گمراه کردیم: این روشی است که منینگ، یک کاربر متریک، برای اولین بار فرمول را پیشنهاد کرد. بعداً به واحدهای BG تبدیل شد. چنین فرمول‌های از نظر ابعادی ناسازگار خطرناک هستند و باید یا دوباره تجزیه و تحلیل شوند یا به عنوان فرمول‌هایی با کاربرد بسیار محدود در نظر گرفته شوند.

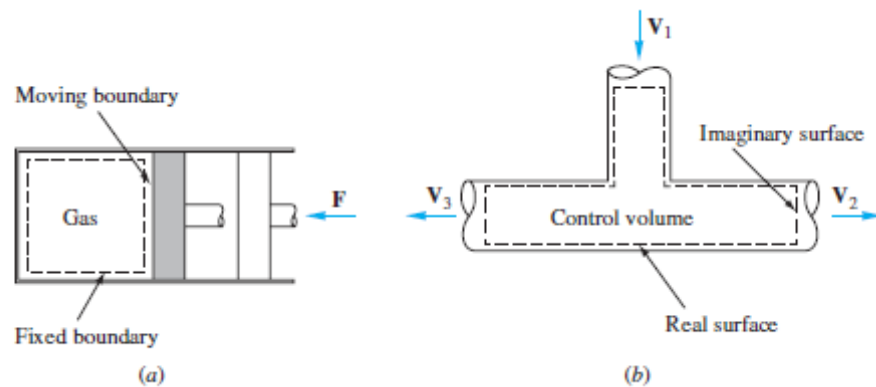
۱.۵ سیستم و حجم کنترل

یک سیستم به عنوان یک مقدار دلخواه از جرم با هویت ثابت تعریف می‌شود. همچنین به آن سیستم بسته یا جرم کنترل گفته می‌شود. هر چیزی که خارج از سیستم باشد با اصطلاح محیط نشان داده می‌شود. سیستم توسط مرزهایش از محیط اطراف جدا می‌شود. مرزهای سیستم می‌توانند ثابت یا متحرک باشند. شکل a۱.۳ یک مجموعه پیستون-سیلندر را نشان می‌دهد. گاز موجود در سیلندر را می‌توان سیستم در نظر گرفت. اگر پیستون توسط یک نیروی خارجی هل داده شود، گاز فشرده می‌شود. بنابراین مرز سیستم حرکت می‌کند. گرما و کار ممکن است از مرزهای سیستم عبور کنند، اما مقدار جرم در سیستم بدون تغییر باقی می‌ماند. مفهوم سیستم تقریباً منحصرأ در مکانیک جامدات استفاده می‌شود، جایی که ما به احتمال زیاد به مسیر یک ذره یا یک جسم صلب برای تجزیه و تحلیل علاقه‌مند هستیم. از سوی دیگر، در ترمودینامیک و مکانیک سیالات، هنگامی که جریان سیال مورد مطالعه است، به ندرت می‌توان سرنوشت واقعی ذرات سیال خاص را پیگیری کرد، زیرا آنها از نظر کمیت متعدد و به راحتی تغییر شکل‌پذیر هستند. یک حجم کنترل به عنوان یک ناحیه دلخواه در فضا تعریف می‌شود که سیال از آن عبور می‌کند. این حجم می‌تواند در حالت سکون یا حرکت باشد. مرزهای هندسی حجم کنترل که آن را از محیط اطراف جدا می‌کند، سطح کنترل نامیده می‌شود. سطح کنترل می‌تواند واقعی یا خیالی باشد. شکل b۱.۳ جریان از طریق یک اتصال T شکل لوله را نشان می‌دهد. یک سطح کنترل روی محل اتصال رسم شده است. مساحت سطح کنترل مربوط به دیواره‌های لوله، سطوح فیزیکی و واقعی هستند، در حالی که سایر سطوح، که نمایانگر ورودی‌ها یا خروجی‌ها هستند، سطوح خیالی هستند. از نظر ریاضی، یک مرز یا یک سطح کنترل ضخامت صفر دارد و بنابراین نمی‌تواند هیچ جرمی را در خود جای دهد و هیچ حجمی را در فضا اشغال کند.

روش‌های توصیف

نوع تحلیل برای یک سیستم فیزیکی به مسئله بستگی دارد. در مکانیک جامدات، پیگیری یک کمیت ثابت و قابل شناسایی از جرم، مانند ذرات یا اجسام صلب، آسان است. یک چارچوب مرجع که مسیر ذرات یا اجسام منفرد را دنبال می‌کند، استفاده می‌شود و به عنوان روش توصیف لاگرانژی شناخته می‌شود. اکثر قوانین اساسی فیزیک برای یک سیستم جرمی نوشته شده‌اند (فصل ۳). تحلیل مبتنی بر روش لاگرانژی مستلزم آن است که موقعیت، سرعت و شتاب هر ذره منفرد را ردیابی کنیم.

Fig. 1.3 System and control volume:
(a) gas in a closed system with a moving boundary; (b) fluid flow through a control volume with real and imaginary surfaces.



با این حال، در شرایط جریان سیال، تعیین خواص سیال به عنوان تابعی از موقعیت و زمان، از طریق آزمایش یا تئوری، به عنوان راه حل مسئله در نظر گرفته می‌شود. دلیل این امر این است که پیگیری حرکت هر ذره سیال امکان‌پذیر نخواهد بود. در نتیجه، توصیف لاگرانژی ذرات غیرقابل مدیریت خواهد بود. اغلب، ما استفاده از روش توصیف متفاوتی - روش اویلری، همانطور که معمولاً آن را می‌نامیم - را مناسب می‌دانیم. به ویژه در تحلیل‌های حجم کنترل، تأکید بر توزیع فضا-زمان خواص سیال است. در روش توصیف اویلری، خواص یک میدان جریان به عنوان تابعی از مختصات فضا و زمان توصیف می‌شوند. این رفتار با خواص به عنوان نتیجه منطقی فرض میدان پیوسته، مکانیک سیالات را از مکانیک جامدات متمایز می‌کند. خواص میدان‌های سرعت و شتاب در زیر با استفاده از روش توصیف اویلری نشان داده شده است.

میدان سرعت

در میان خواص یک جریان، میدان سرعت $V(x, y, z, t)$ از همه مهم‌تر است. در واقع، تعیین سرعت اغلب معادل حل یک مسئله جریان است، زیرا سایر خواص مستقیماً از میدان سرعت پیروی می‌کنند. فصل ۲ به محاسبه میدان فشار پس از مشخص بودن میدان سرعت اختصاص داده شده است. کتاب‌های مربوط به انتقال حرارت (به عنوان مثال، مرجع ۲۰) عمدتاً به یافتن میدان دما از میدان‌های سرعت معلوم اختصاص داده شده‌اند. به طور کلی، سرعت یک تابع برداری از مکان و زمان است و بنابراین دارای سه مؤلفه u ، v و w است که هر کدام به خودی خود یک میدان اسکالر هستند:

$$\mathbf{V}(x, y, z, t) = i\mathbf{u}(x, y, z, t) + j\mathbf{v}(x, y, z, t) + k\mathbf{w}(x, y, z, t) \quad (1.4)$$

استفاده از u ، v و w به جای نمادگذاری منطقی‌تر مؤلفه‌های V_x ، V_y و V_z نتیجه یک رسم تقریباً ناگسستنی در مکانیک سیالات است. بخش عمده‌ای از این کتاب درسی، به ویژه فصل‌های ۴، ۷، ۸ و ۹، مربوط به یافتن توزیع بردار سرعت V برای انواع جریان‌های عملی است.

میدان شتاب

بردار شتاب، $a = dV/dt$ ، در قانون نیوتن برای یک سیال رخ می‌دهد و بنابراین بسیار مهم است. برای دنبال کردن یک ذره در چارچوب مرجع اویلری، نتیجه نهایی برای شتاب غیرخطی و کاملاً پیچیده است. در اینجا فقط فرمول را ارائه می‌دهیم:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \quad (1.5)$$

که در آن (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت از معادله (۱.۴) هستند. ما این فرمول را به تفصیل در فصل ۴ بررسی خواهیم کرد. سه عبارت آخر در معادله (۱.۵) حاصلضرب‌های غیرخطی هستند و تحلیل حرکات عمومی سیال، به ویژه جریان‌های ویسکوز را بسیار پیچیده می‌کنند.

۱.۶ خواص ترمودینامیکی یک سیال

در حالی که میدان سرعت V مهمترین خاصیت سیال است، با خواص ترمودینامیکی سیال تعامل نزدیکی دارد. ما قبلاً سه مورد از رایج‌ترین این خواص را در بحث معرفی کرده‌ایم:

۱. فشار p

۲. چگالی ρ

۳. دما T

این سه مورد همراهان ثابت بردار سرعت در تحلیل‌های جریان هستند. چهار خاصیت ترمودینامیکی شدید دیگر هنگام بررسی تعادل کار، گرما و انرژی اهمیت پیدا می‌کنند (فصل‌های ۳ و ۴):

۴. انرژی داخلی u

۵. آنتالپی $h = u + p/\rho$

۶. آنتروپی s

۷. گرماهای ویژه c_p و c_v

علاوه بر این، اثرات اصطکاک و هدایت حرارتی توسط دو خاصیت به اصطلاح انتقال کنترل می‌شوند:

۸. ضریب ویسکوزیته μ

۹. رسانایی حرارتی k

هر نه مورد از این کمیت‌ها، خواص ترمودینامیکی واقعی هستند که توسط شرایط ترمودینامیکی یا حالت سیال تعیین می‌شوند. برای مثال، برای یک ماده تک فاز مانند آب یا اکسیژن، دو ویژگی اساسی مانند فشار و دما برای تعیین مقدار سایر ویژگی‌ها کافی است:

$$\rho = \rho(p, T) \quad h = h(p, T) \quad \mu = \mu(p, T)$$

و به همین ترتیب برای هر کمیتی در لیست. توجه داشته باشید که حجم مخصوص، که در تحلیل‌های ترمودینامیکی بسیار مهم است، در اینجا به نفع معکوس آن، چگالی ρ ، حذف شده است.

به یاد داشته باشید که ویژگی‌های ترمودینامیکی، وضعیت یک سیستم را توصیف می‌کنند - یعنی مجموعه‌ای از ماده با هویت ثابت که با محیط اطراف خود در تعامل است. در بیشتر موارد، در اینجا سیستم یک عنصر سیال کوچک خواهد بود و همه ویژگی‌ها به عنوان ویژگی‌های پیوسته میدان جریان فرض می‌شوند:

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad \text{و به همین ترتیب.}$$

همچنین به یاد داشته باشید که ترمودینامیک معمولاً با سیستم‌های ایستا سروکار دارد، در حالی که سیالات معمولاً در حرکت متغیر با خواص دائماً در حال تغییر هستند. آیا خواص در جریان سیالی که از نظر فنی در حالت تعادل نیست، معنای خود را حفظ می‌کنند؟ پاسخ از یک استدلال آماری مثبت است. در گازها در فشار عادی (و حتی بیشتر برای مایعات)، تعداد زیادی برخورد مولکولی در فاصله بسیار کوتاهی از مرتبه ۱ میکرومتر رخ می‌دهد، به طوری که یک سیال که در معرض تغییرات ناگهانی قرار می‌گیرد، به سرعت خود را به سمت تعادل تنظیم می‌کند. بنابراین ما فرض می‌کنیم که تمام خواص ترمودینامیکی ذکر شده به عنوان توابع نقطه‌ای در یک سیال در حال جریان وجود دارند و از تمام قوانین و روابط حالت ترمودینامیک تعادلی معمولی پیروی می‌کنند. البته اثرات غیرتعادلی مهمی مانند واکنش‌های شیمیایی و هسته‌ای در سیالات در حال جریان وجود دارد که در این متن به آنها پرداخته نشده است.

دما

دمای T مربوط به سطح انرژی داخلی یک سیال است. این دما ممکن است در طول جریان پرسرعت گاز به طور قابل توجهی تغییر کند (فصل ۹). اگرچه مهندسان اغلب برای راحتی از مقیاس‌های سلسیوس یا فارنهایت استفاده می‌کنند، بسیاری از کاربردهای این متن به مقیاس‌های دمای مطلق (کلوین یا رانکین) نیاز دارند:

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.69$$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.16$$

اگر اختلاف دما زیاد باشد، انتقال حرارت ممکن است مهم باشد [۲۰]، اما نگرانی ما در اینجا عمدتاً اثرات دینامیکی است.

چگالی

چگالی یک سیال، که با ρ (حرف کوچک یونانی rho) نشان داده می‌شود، جرم آن در واحد حجم است. چگالی در گازها بسیار متغیر است و تقریباً متناسب با سطح فشار افزایش می‌یابد. چگالی در مایعات تقریباً ثابت است؛ چگالی آب (حدود ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) تنها ۱ درصد افزایش می‌یابد اگر فشار با ضریب ۲۲۰ افزایش یابد. بنابراین، بیشتر جریان‌های مایع از نظر تحلیلی تقریباً "تراکم‌ناپذیر" در نظر گرفته می‌شوند.

به طور کلی، مایعات در فشار اتمسفر حدود سه مرتبه بزرگتر از گازها هستند. سنگین‌ترین مایع رایج جیوه و سبک‌ترین گاز هیدروژن است. چگالی آنها را در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر مقایسه کنید:

جیوه: $\rho = 13580$ کیلوگرم بر متر مکعب

هیدروژن: $\rho = 0.0838$ کیلوگرم بر متر مکعب

آنها با ضریب ۱۶۲۰۰۰ متفاوت هستند! بنابراین، پارامترهای فیزیکی در جریان‌های مختلف مایع و گاز ممکن است به طور قابل توجهی متفاوت باشند. این اختلافات اغلب با استفاده از تحلیل ابعادی (فصل ۵) برطرف می‌شوند. سایر چگالی‌های سیال در جداول الف.۳ و الف.۴ (در پیوست الف) و در مرجع ۲۱ فهرست شده‌اند.

وزن مخصوص

وزن مخصوص یک سیال که با γ (گامای کوچک یونانی) نشان داده می‌شود، وزن آن در واحد حجم است. همانطور که یک جرم وزنی برابر با $W = mg$ دارد، چگالی و وزن مخصوص نیز به سادگی با گرانش مرتبط هستند:

$$\gamma = \rho g$$

واحدهای γ وزن بر واحد حجم، بر حسب پوند بر فوت مکعب یا نیوتن بر متر مکعب هستند. در گرانش استاندارد زمین، $g = 32.174$ فوت بر مجذور ثانیه $= 9.807$ متر بر مجذور ثانیه است. بنابراین، برای مثال، وزن مخصوص هوا و آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر تقریباً برابر است با:

$$\gamma_{\text{air}} = (1.205 \text{ kg/m}^3)(9.807 \text{ m/s}^2) = 11.8 \text{ N/m}^3 = 0.0752 \text{ lbf/ft}^3$$

$$\gamma_{\text{water}} = (998 \text{ kg/m}^3)(9.807 \text{ m/s}^2) = 9790 \text{ N/m}^3 = 62.4 \text{ lbf/ft}^3$$

وزن مخصوص در کاربردهای فشار هیدرواستاتیک فصل ۲ بسیار مفید است. وزن مخصوص سایر سیالات در جداول A.3 و A.4 آورده شده است.

وزن مخصوص

وزن مخصوص، که با SG نشان داده می‌شود، نسبت چگالی یک سیال به یک سیال مرجع استاندارد است که معمولاً آب در دمای ۴ درجه سانتیگراد (برای مایعات) و هوا (برای گازها) است: مقادیر عددی چگالی انواع سیالات.

$$SG_{\text{gas}} = \frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{air}}} = \frac{\rho_{\text{gas}}}{1.205 \text{ kg/m}^3} \quad (1.7)$$

$$SG_{\text{liquid}} = \frac{\rho_{\text{liquid}}}{\rho_{\text{water}}} = \frac{\rho_{\text{liquid}}}{1000 \text{ kg/m}^3}$$

برای مثال، وزن مخصوص جیوه (Hg) برابر است با $SG_{\text{Hg}} = 13,580/1000 \approx 13.6$. مهندسان این نسبت‌های بدون بعد را آسان‌تر از مقادیر عددی واقعی چگالی انواع سیالات به خاطر می‌سپارند.

انرژی‌های پتانسیل و جنبشی

در ترموستاتیک، تنها انرژی موجود در یک ماده، انرژی ذخیره شده در یک سیستم توسط فعالیت مولکولی و نیروهای پیوند مولکولی است. این معمولاً به عنوان انرژی داخلی u نشان داده می‌شود. یک تنظیم پذیرفته شده رایج برای این وضعیت ایستا برای جریان سیال، اضافه کردن دو عبارت انرژی دیگر است که از مکانیک نیوتنی ناشی می‌شوند: انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی.

انرژی پتانسیل برابر است با کار مورد نیاز برای حرکت سیستم جرم m از مبدا به بردار موقعیت $\mathbf{r} = ix + jy + kz$ در برابر میدان گرانش g . مقدار آن $mg \cdot \mathbf{r}$ یا $g \cdot \mathbf{r}$ به ازای واحد جرم است. انرژی جنبشی برابر است با کار مورد نیاز برای تغییر سرعت جرم از صفر به سرعت V . مقدار آن $\frac{1}{2} mV^2$ یا $0.5V^2$ به ازای واحد جرم است. سپس طبق قرارداد رایج، کل انرژی ذخیره شده e به ازای واحد جرم در مکانیک سیالات، مجموع سه عبارت است:

$$e = \hat{u} + \frac{1}{2}V^2 + (-\mathbf{g} \cdot \mathbf{r}) \quad (1.8)$$

همچنین، در سراسر این کتاب، Z را به صورت صعودی تعریف خواهیم کرد، به طوری که $g = -gk$ و $g \cdot \mathbf{r} = -gz$. سپس معادله (۱.۸) به صورت زیر می‌شود.

$$e = \hat{u} + \frac{1}{2}V^2 + gz \quad (1.9)$$

انرژی داخلی مولکولی $\hat{u}$ برای ماده خالص تک فاز تابعی از T و p است، در حالی که انرژی‌های پتانسیل و جنبشی، کمیت‌های سینماتیکی هستند.

روابط حالت برای گازها

خواص ترمودینامیکی هم از نظر تئوری و هم از نظر تجربی توسط روابط حالتی که برای هر ماده متفاوت است، به یکدیگر مرتبط می‌شوند. همانطور که گفته شد، ما در اینجا خود را به مواد خالص تک فاز، مانند آب در فاز مایع آن، محدود خواهیم کرد. دومین سیال رایج، هوا، مخلوطی از گازها است، اما از آنجایی که نسبت‌های مخلوط بین ۱۶۰ تا ۲۲۰۰ کلوین تقریباً ثابت می‌مانند، در این محدوده دمایی می‌توان هوا را یک ماده خالص در نظر گرفت.

تمام گازها در دماهای بالا و فشارهای پایین (نسبت به نقطه بحرانی خود) با قانون گاز کامل مطابقت خوبی دارند.

$$p = \rho RT \quad R = c_p - c_v = \text{gas constant} \quad (1.10)$$

که در آن، گرماهای ویژه c_p و c_v در معادلات (۱.۱۴) و (۱.۱۵) تعریف شده‌اند. از آنجایی که معادله (۱.۱۰) از نظر ابعادی سازگار است، R ابعادی مشابه با گرمای ویژه، $\{L^2T^{-2}\Theta^{-1}\}$ ، یا سرعت به توان دو در واحد دما (کلوین یا درجه رانکین) دارد. هر گاز ثابت R مخصوص به خود را دارد که برابر با ثابت جهانی Λ تقسیم بر وزن مولکولی است.

$$R_{\text{gas}} = \frac{\Lambda}{M_{\text{gas}}} \quad (1.11)$$

که در آن $\Lambda = 49,700 \text{ ft} \cdot \text{lbf}/(\text{slugmol} \cdot ^\circ\text{R}) = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ است. اکثر کاربردهای این کتاب برای هوا است که وزن مولکولی آن $M = 28.97 \text{ g/mol} = 28.97 \text{ lb/lbmol}$ است:

$$R_{\text{air}} = \frac{49,700 \text{ ft} \cdot \text{lbf}/(\text{slugmol} \cdot ^\circ\text{R})}{28.97 \text{ lb/lbmol}} = 1716 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{slug} \cdot ^\circ\text{R}} = 1716 \frac{\text{ft}^2}{\text{s}^2 \cdot ^\circ\text{R}} = 287 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} \quad (1.12)$$

فشار اتمسفر استاندارد ۲۱۱۶ پوند بر فوت مربع = ۲۱۱۶ اسلاگ بر (فوت^۲ · ثانیه) و دمای استاندارد ۶۰ درجه فارنهایت = ۵۲۰ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین چگالی هوای استاندارد عبارت است از

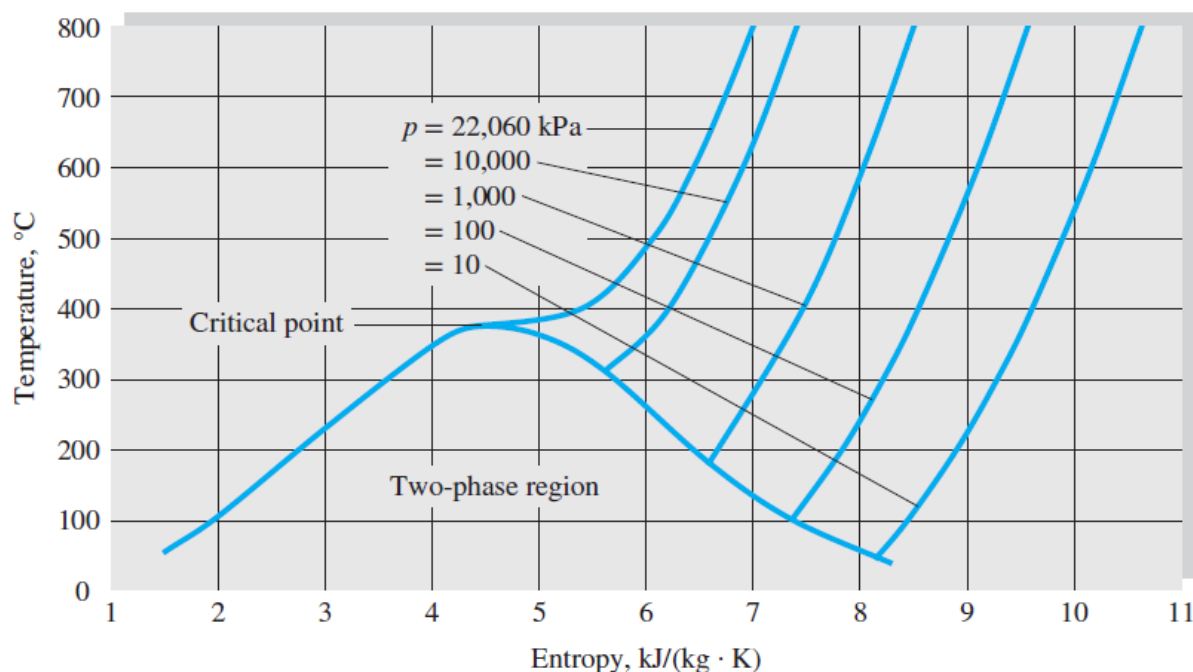
$$\rho_{\text{air}} = \frac{2116 \text{ slug}/(\text{ft} \cdot \text{s}^2)}{[1716 \text{ ft}^2/(\text{s}^2 \cdot ^\circ\text{R})](520^\circ\text{R})} = 0.00237 \text{ slug}/\text{ft}^3 = 1.22 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (1.13)$$

این یک مقدار اسمی مناسب برای مسائل است. برای سایر گازها، به جدول A.4 مراجعه کنید. اکثر گازهای رایج - اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن، هلیوم، آرگون - تقریباً ایده‌آل هستند. این موضوع در مورد بخار که نمودار ساده‌شده دما-آنترופی آن در شکل ۱.۴ نشان داده شده است، چندان صادق نیست. مگر اینکه مطمئن باشید دمای بخار «بالا» و فشار «پایین» است، بهتر است از جداول بخار برای انجام محاسبات دقیق استفاده کنید.

در ترمودینامیک ثابت می‌شود که معادله (۱.۱۰) ایجاب می‌کند که انرژی مولکولی داخلی $\hat{u}$ یک گاز کامل فقط با دما تغییر کند: $\hat{u} = \hat{u}(T)$. بنابراین، گرمای ویژه c_v نیز فقط با دما تغییر می‌کند:

$$c_v = \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial T} \right)_\rho = \frac{d\hat{u}}{dT} = c_v(T)$$

$$d\hat{u} = c_v(T) dT \quad (1.14)$$



شکل ۱.۴ نمودار دما-آنترپپی برای بخار. نقطه بحرانی $p_c = 22060 \text{ kPa}$, $T_c = 374^\circ\text{C}$, $S_c = 4.41$ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ است. به جز نزدیک نقطه بحرانی، ایزوبارهای صاف، اغلب به اشتباه، فرد را وسوسه می‌کنند که فرض کند قانون گاز ایده‌آل برای بخار معتبر است. اما این قانون معتبر نیست، مگر در فشار پایین و دمای بالا: قسمت بالا سمت راست نمودار.

به همین ترتیب، آنتالپی h و گرمای ویژه c_p یک گاز کامل نیز فقط با دما تغییر می‌کنند:

$$h = \hat{u} + \frac{p}{\rho} = \hat{u} + RT = h(T)$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \frac{dh}{dT} = c_p(T) \quad (1.15)$$

$$dh = c_p(T) dT$$

نسبت گرمای ویژه یک گاز کامل، یک پارامتر بدون بعد مهم در تحلیل جریان تراکم‌پذیر است (فصل ۹)

$$k = \frac{c_p}{c_v} = k(T) \geq 1 \quad (1.16)$$

به عنوان اولین تقریب در تحلیل جریان هوا، معمولاً c_p ، c_v و k را ثابت در نظر می‌گیریم:

$$k_{\text{air}} \approx 1.4$$

$$c_v = \frac{R}{k-1} \approx 4293 \text{ ft}^2/(\text{s}^2 \cdot ^\circ\text{R}) = 718 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K}) \quad (1.17)$$

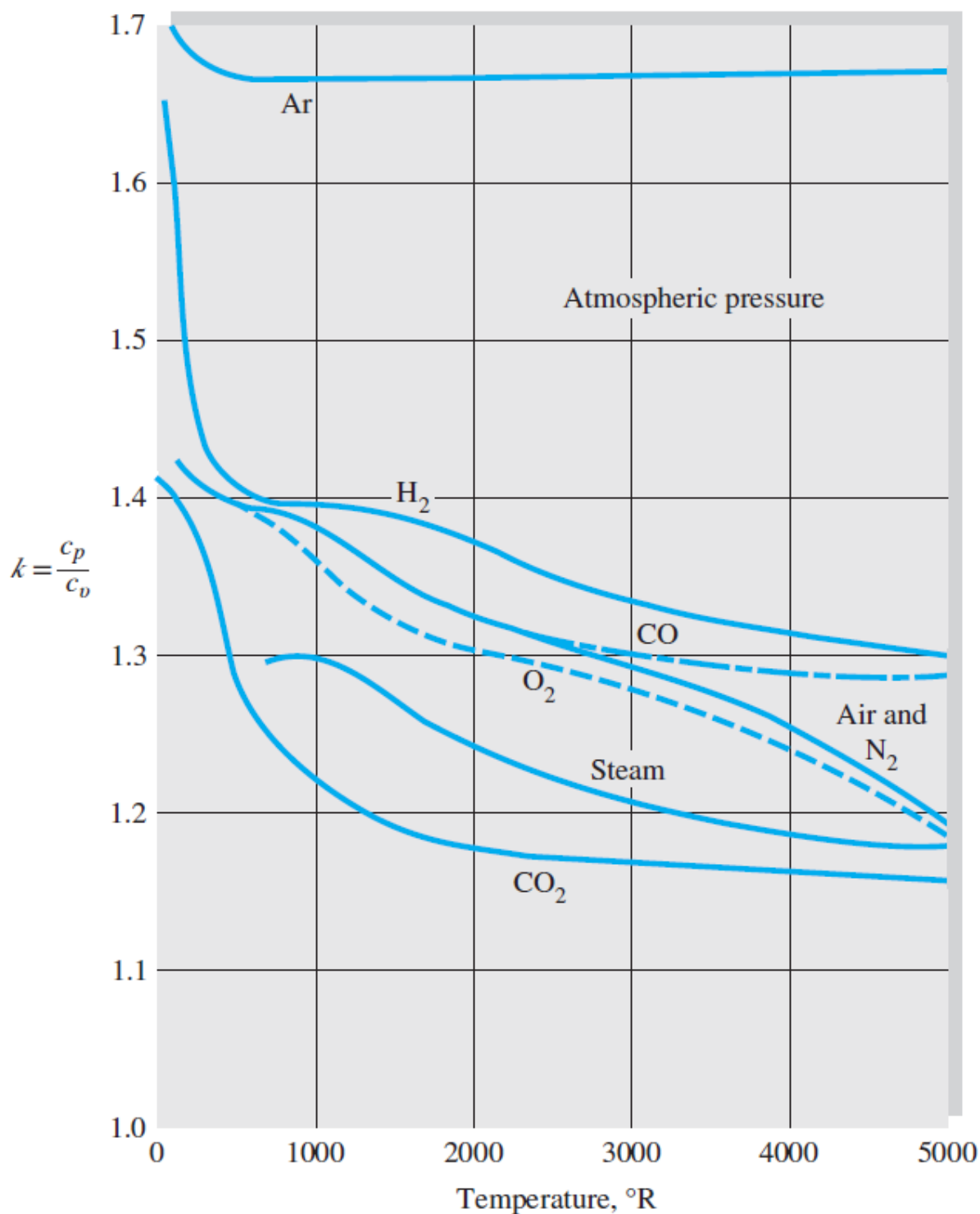
$$c_p = \frac{kR}{k-1} \approx 6010 \text{ ft}^2/(\text{s}^2 \cdot ^\circ\text{R}) = 1005 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$$

در واقع، برای همه گازها، c_p و c_v به تدریج با دما افزایش می‌یابند و k به تدریج کاهش می‌یابد. مقادیر تجربی نسبت گرمای ویژه برای هشت گاز رایج در شکل ۱.۵ نشان داده شده است. مقادیر اسمی در جدول A.4 آمده است.

بسیاری از مسائل جریان شامل بخار می‌شوند. شرایط عملیاتی معمول بخار اغلب نزدیک به نقطه بحرانی است، به طوری که تقریب گاز کامل نادرست است.

سپس باید به جداول بخار، چه به صورت جدولی یا CD-ROM [۲۳] یا به صورت نرم‌افزار آنلاین [۲۴]، مراجعه کنیم. اکثر جداول بخار آنلاین نیاز به هزینه مجوز دارند، اما نویسنده، در مثال ۱.۵ که در ادامه می‌آید، یک منبع آنلاین رایگان را پیشنهاد می‌کند. گاهی اوقات

خطای استفاده از قانون گاز کامل برای بخار می‌تواند تعدیل شود، همانطور که مثال زیر نشان می‌دهد.



شکل ۱.۵ نسبت گرمای ویژه هشت گاز رایج به عنوان تابعی از دما. (داده‌ها از مرجع ۲۲)

مثال ۱.۵

p و cp بخار را در فشار ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع و دمای ۴۰۰ درجه فارنهایت، بر حسب واحدهای انگلیسی، (الف) با تقریب گاز کامل و (ب) با جداول بخار ASME [۲۳] تخمین بزنید.

$$R_{\text{steam}} = \frac{\Lambda_{\text{English}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{49,700 \text{ ft} \cdot \text{lbf}/(\text{slugmol} \cdot ^\circ\text{R})}{18.02/\text{mol}} = 2758 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{slug} \cdot ^\circ\text{R}}$$

سپس تخمین چگالی از قانون گاز کامل، معادله (۱.۱۰) بدست می‌آید:

$$\rho \approx \frac{p}{RT} = \frac{14,400 \text{ lbf}/\text{ft}^2}{[2758 \text{ ft} \cdot \text{lbf}/(\text{slug} \cdot ^\circ\text{R})](860 \cdot ^\circ\text{R})} \approx 0.00607 \frac{\text{slug}}{\text{ft}^3} \quad \text{Ans. (a)}$$

در دمای ۸۶۰ درجه سانتیگراد، از شکل ۱.۵، $k_{\text{steam}} = cp/cv \approx 1.30$ ، سپس، از معادله (۱.۱۷)،

$$c_p \approx \frac{kR}{k-1} = \frac{(1.3)(2758 \text{ ft} \cdot \text{lbf}/(\text{slug} \cdot ^\circ\text{R}))}{(1.3-1)} \approx 12,000 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{slug} \cdot ^\circ\text{R}} \quad \text{Ans. (a)}$$

• رویکرد (ب) - جداول یا نرم‌افزار: می‌توان جداول بخار ASME [۲۳] را مطالعه کرد یا از نرم‌افزار آنلاین استفاده کرد. نرم‌افزارهای آنلاین، مانند [۲۴]، خواص بخار را بدون خواندن جدول محاسبه می‌کنند. اکثر این نرم‌افزارها نیاز به هزینه مجوز دارند که ممکن است موسسه شما آن را داشته باشد یا نداشته باشد. برای کار در منزل، نویسنده با این سایت آنلاین تجاری رایگان به موفقیت رسیده است:

<https://beta.spiraxsarco.com/resources-and-design-tools>

نرم‌افزار، خواص بخار فوق گرم را، همانطور که در این مثال مورد نیاز است، محاسبه می‌کند. شرکت Spirax Sarco انواع مختلفی از تجهیزات بخار را تولید می‌کند: دیگ‌های بخار، کندانسورها، شیرها، پمپ‌ها، رگولاتورها. این سایت بسیاری از خواص بخار - چگالی، گرمای ویژه، آنتالپی، سرعت صوت - را در سیستم‌های واحد مختلف ارائه می‌دهد. در اینجا ما به چگالی و گرمای ویژه بخار در ۱۰۰ پوند بر اینچ مربع و ۴۰۰ درجه فارنهایت نیاز داریم. شما این دو ورودی را وارد می‌کنید و نرم‌افزار نه تنها p و cp ، بلکه بسیاری از خواص مورد علاقه دیگر را نیز در واحدهای انگلیسی یا متریک محاسبه می‌کند. نتایج نرم‌افزار عبارتند از:

$$\rho(100 \text{ lbf/in}^2, 400^\circ\text{F}) = 0.2027 \text{ lbm/ft}^3 = 3.247 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Ans. (b)}$$

$$c_p(100 \text{ lbf/in}^2, 400^\circ\text{F}) = 0.5289 \text{ Btu/(lbm-F)} = 2215 \text{ J/(kg-K)} \quad \text{Ans. (b)}$$

توضیحات: این جداول کاملاً دقیق هستند و با سایر جداول بخار به خوبی قابل مقایسه هستند. تخمین p برای گاز کامل ۴ درصد و تخمین c_p برای گاز کامل ۹ درصد کمتر است. دلیل اصلی این اختلاف این است که این دما و فشار نسبتاً نزدیک به نقطه بحرانی و خط اشباع بخار هستند. در دماهای بالاتر و فشارهای پایین‌تر، مثلاً ۸۰۰ درجه فارنهایت و ۵۰ پوند بر اینچ مربع، قانون گاز کامل دقتی حدود $\pm 1\%$ دارد. به شکل ۱.۴ مراجعه کنید. مجدداً هشدار می‌دهیم که واحدهای انگلیسی (Btu, lbm, psia) نامناسب هستند و باید تقریباً در تمام فرمول‌های مکانیک سیالات به واحدهای SI یا BG تبدیل شوند.

روابط حالت برای مایعات

نویسنده هیچ «قانون مایع کامل» قابل مقایسه با قانون گازها نمی‌شناسد. مایعات تقریباً تراکم‌ناپذیر هستند و یک گرمای ویژه واحد و نسبتاً ثابت دارند. بنابراین، یک رابطه حالت ایده‌آل برای یک مایع به صورت زیر است:

$$\rho \approx \text{const} \quad c_p \approx c_v \approx \text{const} \quad dh \approx c_p dT$$

بیشتر مسائل جریان در این کتاب را می‌توان با این فرضیات ساده بررسی کرد. چگالی آب معمولاً ۹۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب و گرمای ویژه آن $c_p = 4210 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$ در نظر گرفته می‌شود. در صورت نیاز به دقت بیشتر، می‌توان از جداول بخار استفاده کرد.

چگالی یک مایع معمولاً با دما کمی کاهش می‌یابد و با فشار به طور متوسط افزایش می‌یابد. اگر اثر دما را نادیده بگیریم، رابطه تجربی فشار-چگالی برای یک مایع به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{p}{p_a} \approx (B + 1) \left(\frac{\rho}{\rho_a} \right)^n - B$$

که در آن B و n پارامترهای بدون بعد هستند که با دما کمی تغییر می‌کنند و p_a و ρ_a مقادیر استاندارد جوی هستند. آب را می‌توان تقریباً با مقادیر $B \approx 3000$ و $n \approx 7$ تطبیق داد.

آب دریا مخلوطی متغیر از آب و نمک است و بنابراین برای تعریف حالت آن به سه ویژگی ترمودینامیکی نیاز است. این ویژگی‌ها معمولاً به عنوان فشار، دما و شوری S° در نظر گرفته می‌شوند که به صورت وزن نمک محلول تقسیم بر وزن مخلوط تعریف می‌شود. میانگین شوری آب دریا 0.035 است که معمولاً به صورت 35 قسمت در 1000 یا 35‰ نوشته می‌شود. میانگین چگالی آب دریا $2.00 \text{ slugs/ft}^3 \approx 1030 \text{ kg/m}^3$ است. به طور دقیق، آب دریا سه گرمای ویژه دارد که تقریباً برابر با مقدار آب خالص یعنی 25200 فوت مربع بر (ثانیه مربع $^\circ$ درجه رانکین) $= 4210$ متر مربع بر (ثانیه مربع $^\circ$ کلونین) است.

فشار در عمیق‌ترین قسمت اقیانوس تقریباً 1100 اتمسفر است. چگالی آب دریا را در این فشار بر حسب اسلاگ بر فوت مکعب تخمین بزنید.

راه حل

معادله (۱.۱۹) برای آب یا آب دریا برقرار است. نسبت p/p_a برابر با 1100 است:

$$1100 \approx (3001) \left(\frac{\rho}{\rho_a} \right)^7 - 3000$$

$$\frac{\rho}{\rho_a} = \left(\frac{4100}{3001} \right)^{1/7} = 1.046$$

با فرض چگالی متوسط آب دریا در سطح $p_a = 2.00 \text{ slugs/ft}^3$ ، محاسبه می‌کنیم

$$\rho \approx 1.046(2.00) = 2.09 \text{ slugs/ft}^3$$

حتی در این فشارهای بسیار زیاد، افزایش چگالی کمتر از 5 درصد است، که توجیه می‌کند جریان مایع اساساً تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شود.

۱.۷ ویسکوزیته و سایر خواص ثانویه

کمیت‌هایی مانند فشار، دما و چگالی که در بخش قبلی مورد بحث قرار گرفتند، متغیرهای ترمودینامیکی اولیه‌ای هستند که مشخصه هر سیستمی می‌باشند. برخی از متغیرهای ثانویه نیز رفتار مکانیکی خاص سیال را مشخص می‌کنند. مهم‌ترین آنها ویسکوزیته است که تنش‌های موضعی در یک سیال در حال حرکت را به نرخ کرنش عنصر سیال مرتبط می‌کند.

ویسکوزیته

ویسکوزیته یک معیار کمی از مقاومت سیال در برابر جریان است. به طور خاص تر، نرخ کرنش سیال را که توسط یک تنش برشی اعمال شده ایجاد می شود، تعیین می کند. ما به راحتی می توانیم از طریق هوا که ویسکوزیته بسیار کمی دارد، حرکت کنیم. حرکت در آب که ویسکوزیته آن ۵۰ برابر بیشتر است، دشوارتر است. مقاومت بیشتری نیز در روغن SAE 30 یافت می شود که ۳۰۰ برابر چسبناک تر از آب است. سعی کنید دست خود را از گلیسیرین که پنج برابر چسبناک تر از روغن SAE 30 است، یا ملاس سیاه، که یکی دیگر از عوامل پنج برابر بیشتر از گلیسیرین است، عبور دهید. سیالات ممکن است طیف وسیعی از ویسکوزیته ها را داشته باشند.

یک المان سیال را در نظر بگیرید که در یک صفحه توسط یک تنش برشی τ برش خورده است، همانطور که در شکل ۱۱.۶ نشان داده شده است. زاویه کرنش برشی $\delta\theta$ تا زمانی که تنش τ حفظ شود، به طور مداوم با زمان افزایش می یابد و سطح بالایی با سرعت δu بزرگتر از سطح پایینی حرکت می کند. سیالات رایجی مانند آب، روغن و هوا یک رابطه خطی بین برش اعمال شده و نرخ کرنش حاصل نشان می دهند:

$$\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta t} \quad (1.20)$$

از هندسه شکل ۱۱.۶، می بینیم که

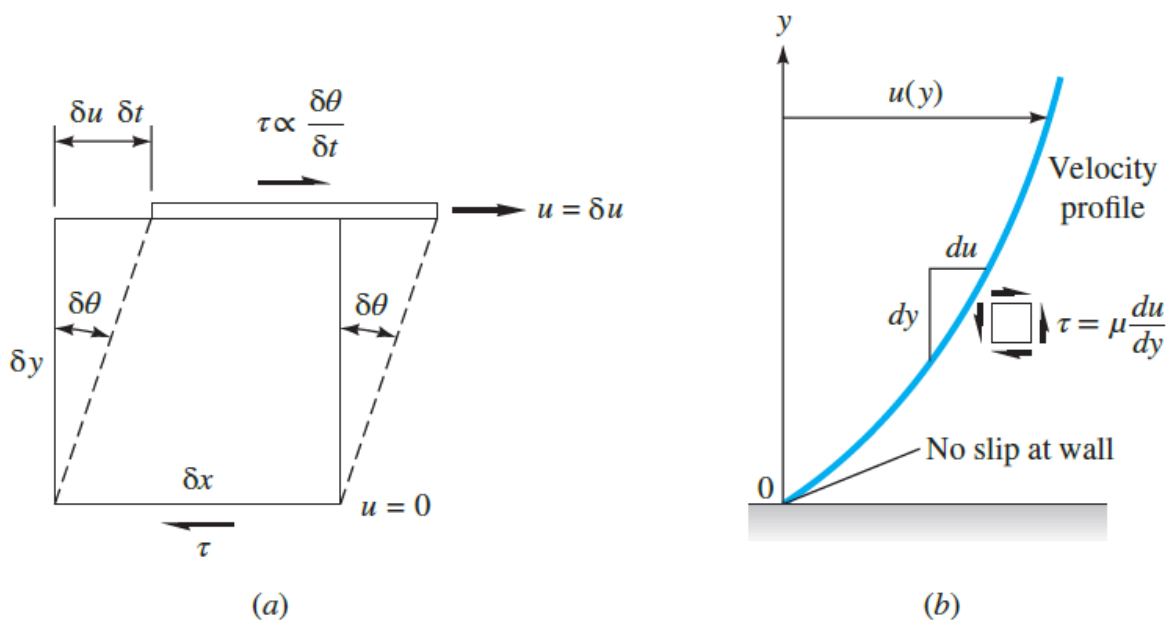
$$\tan \delta\theta = \frac{\delta u \delta t}{\delta y} \quad (1.21)$$

در محدوده تغییرات بی نهایت کوچک، این رابطه به رابطه ای بین نرخ کرنش برشی و گرادیان سرعت تبدیل می شود:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1.22)$$

بنابراین، از معادله (۱.۲۰)، برش اعمال شده نیز متناسب با گرادیان سرعت برای سیالات خطی رایج است. ثابت تناسب، ضریب ویسکوزیته μ است:

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.23)$$



شکل ۱.۶ تنش برشی باعث تغییر شکل برشی پیوسته در یک سیال می‌شود: (الف) یک المان سیال که با نرخ $\delta\theta/\delta t$ کرنش می‌کند؛ (ب) توزیع برش نیوتنی در یک لایه برشی نزدیک یک دیوار.

جدول ۱.۴ ویسکوزیته و ویسکوزیته سینماتیک هشت سیال در فشار ۱ اتمسفر و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد

Fluid	μ , $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})^\dagger$	Ratio $\mu/\mu(\text{H}_2)$	ρ , kg/m^3	ν , $\text{m}^2/\text{s}^\dagger$	Ratio $\nu/\nu(\text{Hg})$
Hydrogen	9.0 E-6	1.0	0.084	1.05 E-4	910
Air	1.8 E-5	2.1	1.20	1.50 E-5	130
Gasoline	2.9 E-4	33	680	4.22 E-7	3.7
Water	1.0 E-3	114	998	1.01 E-6	8.7
Ethyl alcohol	1.2 E-3	135	789	1.52 E-6	13
Mercury	1.5 E-3	170	13,550	1.16 E-7	1.0
SAE 30 oil	0.29	33,000	891	3.25 E-4	2,850
Glycerin	1.5	170,000	1,260	1.18 E-3	10,300

$^\dagger 1 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s}) = 0.0209 \text{ slug}/(\text{ft} \cdot \text{s})$; $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10.76 \text{ ft}^2/\text{s}$.

معادله (۱.۲۳) از نظر ابعادی سازگار است؛ بنابراین μ دارای ابعاد تنش-زمان است: $\{FT/L^2\}$ یا $\{M/(LT)\}$. واحد BG، اسلاگ بر فوت-ثانیه و واحد SI، کیلوگرم بر متر-ثانیه است. سیالات خطی که از معادله (۱.۲۳)

پیروی می‌کنند، سیالات نیوتنی نامیده می‌شوند، به افتخار سر ایزاک نیوتن که برای اولین بار این قانون مقاومت را در سال ۱۶۸۷ مطرح کرد.

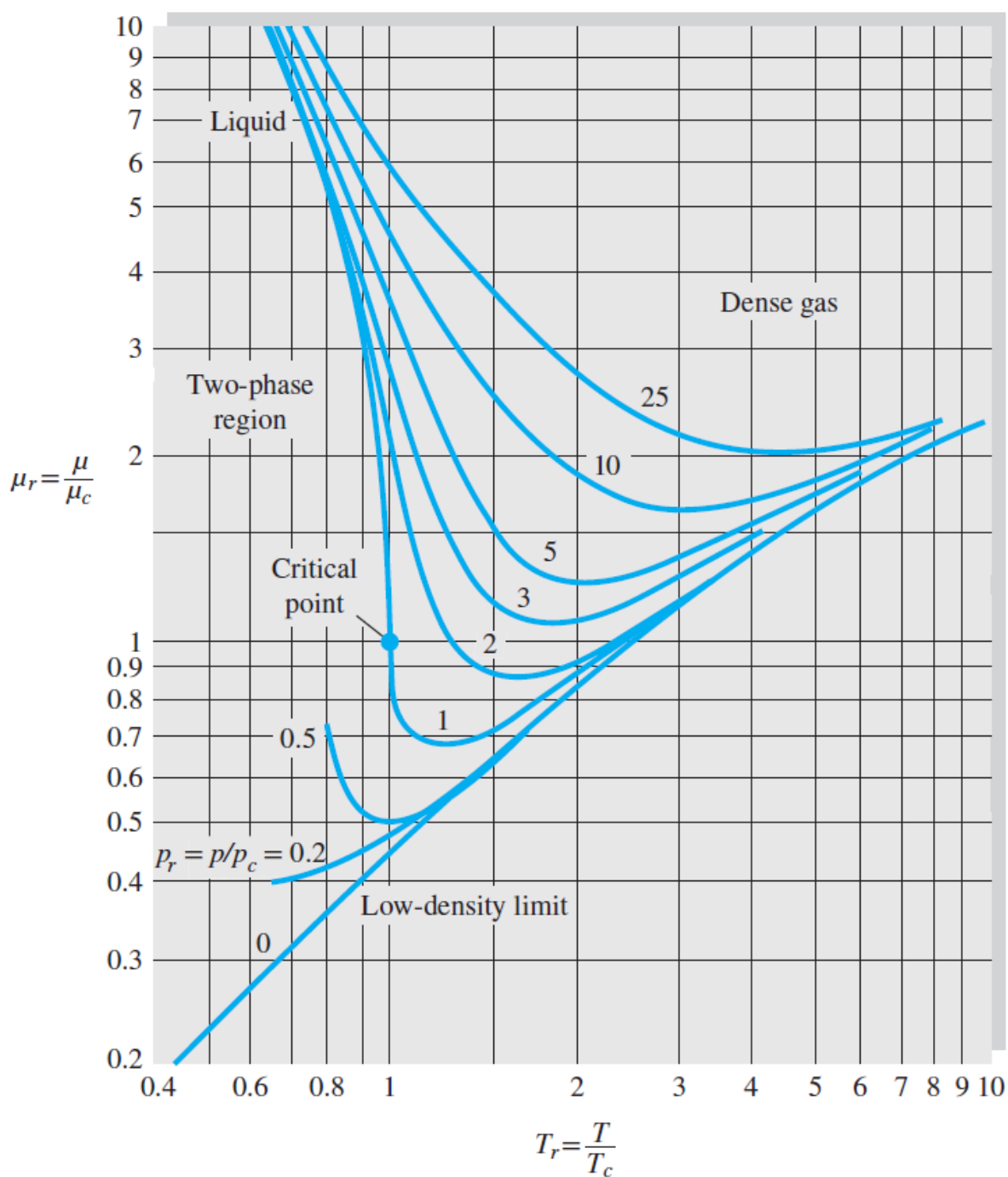
ما در مکانیک سیالات واقعاً به زاویه کرنش $\theta(t)$ اهمیت نمی‌دهیم و در عوض، مانند شکل b۱.۶، بر توزیع سرعت $u(y)$ تمرکز می‌کنیم. ما از معادله (۱.۲۳) در فصل ۴ برای استخراج یک معادله دیفرانسیل برای یافتن توزیع سرعت $u(y)$ - و به طور کلی تر، $V(x, y, z, t)$ - در یک سیال لزج استفاده خواهیم کرد. شکل b۱.۶ یک لایه برشی یا لایه مرزی را در نزدیکی یک دیواره جامد نشان می‌دهد. تنش برشی متناسب با شیب پروفیل سرعت است و در دیواره بیشترین مقدار را دارد. علاوه بر این، در دیواره، سرعت u نسبت به دیواره صفر است: این شرط عدم لغزش نامیده می‌شود و مشخصه همه جریان‌های سیال لزج است.

ویسکوزیته سیالات نیوتنی یک خاصیت ترمودینامیکی واقعی است و با دما و فشار تغییر می‌کند. در یک حالت معین (T, p) طیف وسیعی از مقادیر در بین سیالات رایج وجود دارد. جدول ۱.۴ ویسکوزیته هشت سیال را در فشار و دمای استاندارد فهرست می‌کند. از هیدروژن تا گلیسرین، شش مرتبه بزرگی تغییر می‌کند. بنابراین، تفاوت‌های زیادی بین سیالاتی که تحت تنش‌های اعمال شده یکسان قرار دارند، وجود خواهد داشت.

به طور کلی، ویسکوزیته یک سیال با فشار به طور ضعیفی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، افزایش p از ۱ به ۵۰ اتمسفر، μ هوا را تنها ۱۰ درصد افزایش می‌دهد. با این حال، دما تأثیر زیادی دارد، به طوری که μ با T برای گازها افزایش و برای مایعات کاهش می‌یابد. شکل A.1 (در ضمیمه A) این تغییر دما را برای سیالات مختلف نشان می‌دهد. در اکثر کارهای مهندسی، نادیده گرفتن تغییر فشار مرسوم است.

تغییر $\mu(p, T)$ برای یک سیال معمولی به خوبی توسط شکل ۱.۷ از مرجع ۲۵ نشان داده شده است که داده‌ها را با حالت نقطه بحرانی (T_c, p_c, μ_c) نرمال می‌کند. این رفتار، که اصل حالت‌های متناظر نامیده می‌شود، مشخصه همه سیالات است، اما مقادیر عددی واقعی برای هر سیال معین تا ± 20 درصد نامشخص هستند. برای مثال، مقادیر $\mu(T)$ برای هوا در فشار ۱ اتمسفر، از جدول A.2، در مقایسه با «حد چگالی کم» در شکل ۱.۷، حدود ۸ درصد کمتر است.

در شکل ۱.۷ توجه داشته باشید که تغییرات با دما در نزدیکی نقطه بحرانی بسیار سریع رخ می‌دهد. به طور کلی، اندازه‌گیری‌های نقطه بحرانی بسیار دشوار و نامشخص هستند.



شکل ۱.۷ ویسکوزیته سیال بدون بعد شده توسط خواص نقطه بحرانی. این نمودار تعمیم یافته مشخصه همه سیالات است اما فقط تا $\pm 20\%$ درصد دقیق است. (از مرجع ۲۵).

عدد رینولدز

پارامتر اصلی که رفتار ویسکوز تمام سیالات نیوتنی را نشان می دهد، عدد رینولدز بدون بعد است:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (1.24)$$

که در آن V و L مقیاس‌های سرعت و طول مشخصه جریان هستند. شکل دوم Re نشان می‌دهد که نسبت μ به ρ نام خاص خود را دارد، ویسکوزیته سینماتیک:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.25)$$

به این دلیل سینماتیک گفته می‌شود که واحدهای جرم یکدیگر را خنثی می‌کنند و فقط ابعاد $\{L^2/T\}$ باقی می‌مانند.

به طور کلی، اولین کاری که یک مهندس سیالات باید انجام دهد، تخمین محدوده عدد رینولدز جریان مورد مطالعه است. Re بسیار کم نشان دهنده حرکت خزشی ویسکوز است، که در آن اثرات اینرسی ناچیز است. Re متوسط نشان دهنده یک جریان آرام با تغییرات ملایم است. Re بالا احتمالاً نشان دهنده جریان آشفته است که به آرامی در میانگین زمانی تغییر می‌کند اما نوسانات فرکانس بالای تصادفی قوی را به همراه دارد.

این روش سینماتیک نامیده می‌شود زیرا واحدهای جرمی یکدیگر را خنثی می‌کنند و فقط ابعاد $\{L^2/T\}$ باقی می‌مانند.

به طور کلی، اولین کاری که یک مهندس سیالات باید انجام دهد، تخمین محدوده عدد رینولدز جریان مورد مطالعه است. Re بسیار پایین نشان دهنده حرکت خزنده ویسکوز است، که در آن اثرات اینرسی ناچیز است. Re متوسط به معنای جریان آرام و با تغییر ملایم است. Re بالا احتمالاً جریان آشفته را نشان می‌دهد که به آرامی در میانگین زمانی تغییر می‌کند اما نوسانات تصادفی قوی با فرکانس بالا را به همراه دارد. مقادیر عددی صریح برای اعداد رینولدز پایین، متوسط و بالا را نمی‌توان در اینجا بیان کرد. آنها به هندسه جریان بستگی دارند و در فصول ۵ تا ۷ مورد بحث قرار خواهند گرفت.

جدول ۱.۴ همچنین مقادیر ν را برای همان هشت سیال فهرست می‌کند. ترتیب سلسله مراتب به طور قابل توجهی تغییر می‌کند و جیوه، سنگین‌ترین، کمترین ویسکوزیته را نسبت به وزن خود دارد. همه گازها نسبت به مایعات رقیق مانند بنزین، آب و الکل، ν بالایی دارند. روغن و گلیسیرین هنوز بالاترین ν را دارند، اما نسبت

آن کوچکتر است. برای مقادیر معین V و L در یک جریان، این سیالات پراکندگی چهار مرتبه بزرگی در عدد رینولدز نشان می‌دهند.

جریان بین صفحات

یک مسئله کلاسیک، جریان القایی بین یک صفحه ثابت پایینی و یک صفحه بالایی است که به طور پیوسته با سرعت V حرکت می‌کند، همانطور که در شکل ۱.۸ نشان داده شده است. فاصله بین صفحات h است و سیال نیوتنی است و در هیچ یک از صفحات نمی‌لغزد. اگر صفحات بزرگ باشند، این حرکت برشی ثابت، توزیع سرعت $u(y)$ را همانطور که نشان داده شده است، با $v = w = 0$ ایجاد می‌کند. شتاب سیال در همه جا صفر است.

با شتاب صفر و با فرض عدم تغییر فشار در جهت جریان، باید نشان دهید که تعادل نیرو روی یک عنصر سیال کوچک منجر به این نتیجه می‌شود که تنش برشی در سراسر سیال ثابت است. سپس معادله (۱.۲۳) به صورت زیر می‌شود:

$$\frac{du}{dy} = \frac{\tau}{\mu} = \text{const}$$

که می‌توانیم با انتگرال‌گیری به دست آوریم

$$u = a + by$$

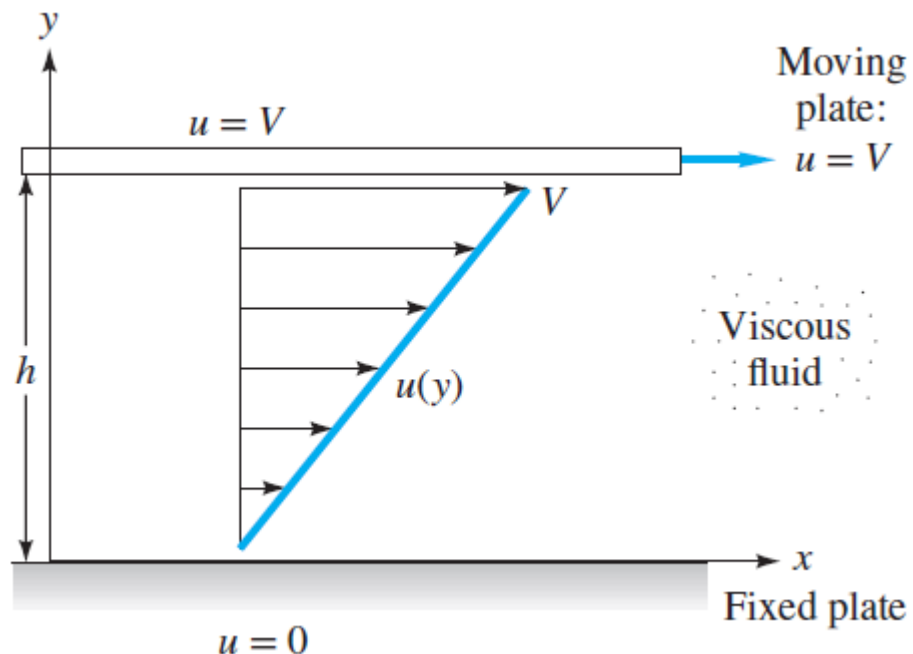
توزیع سرعت، همانطور که در شکل ۱.۸ نشان داده شده است، خطی است و ثابت‌های a و b را می‌توان از شرط عدم لغزش در دیواره‌های بالایی و پایینی ارزیابی کرد:

$$u = \begin{cases} 0 = a + b(0) & \text{at } y = 0 \\ V = a + b(h) & \text{at } y = h \end{cases}$$

بنابراین $a = 0$ و $b = V/h$ است. سپس پروفیل سرعت بین صفحات به صورت زیر داده می‌شود:

$$u = V \frac{y}{h} \quad (1.26)$$

همانطور که در شکل ۱.۸ نشان داده شده است. جریان آشفته (فصل ۶) این شکل را ندارد.



شکل ۱.۸ جریان ویسکوز ناشی از حرکت نسبی بین دو صفحه موازی.

اگرچه ویسکوزیته تأثیر عمیقی بر حرکت سیال دارد، اما تنش‌های ویسکوز واقعی حتی برای روغن‌ها نیز از نظر بزرگی بسیار کوچک هستند، همانطور که در مثال بعدی نشان داده شده است.

روش حل مسئله

تحلیل جریان سیال مملو از مسائلی است که باید حل شوند. متن حاضر بیش از ۱۷۰۰ تکلیف مسئله دارد. حل تعداد زیادی از این تکالیف، کلید یادگیری موضوع است. باید با معادلات، داده‌ها، جداول، فرضیات، سیستم‌های واحد و طرح‌های راه‌حل سر و کار داشت. درجه سختی متفاوت خواهد بود و ما از شما می‌خواهیم که کل طیف تکالیف را، با یا بدون پاسخ‌های پیوست، نمونه‌برداری کنید. در اینجا مراحل توصیه شده برای حل مسئله آمده است:

۱. مسئله را بخوانید و آن را با خلاصه‌ای از نتایج مورد نظر خود دوباره بیان کنید.

۲. از جداول یا نمودارها، داده‌های خواص مورد نیاز: چگالی، ویسکوزیته و غیره را جمع‌آوری کنید.

۳. مطمئن شوید که آنچه پرسیده شده را درک کرده‌اید. دانش‌آموزان مستعد پاسخ دادن به سوال اشتباه هستند - به عنوان مثال، فشار به جای گرادیان فشار، نیروی بالابر به جای نیروی درگ یا جریان جرم به جای جریان حجمی. مسئله را با دقت بخوانید.

۴. یک طرح دقیق و برچسب‌گذاری شده از سیستم یا حجم کنترل مورد نیاز تهیه کنید.

۵. با دقت فکر کنید و فرضیات خود را فهرست کنید. شما باید تصمیم بگیرید که آیا جریان پایدار است یا ناپایدار، تراکم‌پذیر است یا تراکم‌ناپذیر، لزج است یا غیرلزج، و اینکه آیا به حجم کنترل یا معادلات دیفرانسیل جزئی نیاز است یا خیر.

۶. در صورت امکان، یک راه‌حل جبری پیدا کنید. سپس، اگر به مقدار عددی نیاز است، از سیستم‌های واحد SI یا BG که در بخش ۱.۴ بررسی شده‌اند، استفاده کنید.

۷. راه‌حل خود را با واحدهای مناسب و تعداد مناسب ارقام معنی‌دار (معمولاً دو یا سه) که عدم قطعیت داده‌ها اجازه می‌دهد، برچسب‌گذاری کنید.

ما این مراحل را، در صورت لزوم، در مسائل نمونه خود دنبال خواهیم کرد.

مثال ۱.۷

فرض کنید سیالی که در شکل ۱.۸ برش داده می‌شود، روغن SAE 30 در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد باشد. تنش برشی در روغن را در صورتی که $V = 3$ متر بر ثانیه و $h = 2$ سانتی‌متر باشد، محاسبه کنید.

راه حل

• طرح کلی سیستم: این مورد قبلاً در شکل ۱.۸ نشان داده شده است.

• فرضیات: پروفیل سرعت خطی، سیال نیوتنی لایه‌ای، عدم لغزش در هر دو سطح صفحه.

• رویکرد: تحلیل شکل ۱.۸ منجر به معادله (۱.۲۶) برای جریان لایه‌ای می‌شود.

• مقادیر ویژگی: از جدول ۱.۴ برای روغن SAE 30، ویسکوزیته روغن $\mu = 0.29$ کیلوگرم بر (متر بر ثانیه) است.

• مراحل حل: در معادله (۱.۲۶)، تنها مجهول، تنش برشی سیال است:

$$\tau = \mu \frac{V}{h} = \left(0.29 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right) \frac{(3 \text{ m/s})}{(0.02 \text{ m})} = 43.5 \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{\text{m}^2} = 43.5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 44 \text{ Pa} \quad \text{Ans.}$$

• توضیحات: به واحدهای یکسان توجه کنید، ۱ کیلوگرم بر متر مکعب بر مجذور ثانیه $\equiv$ ۱ نیوتن و ۱ نیوتن بر متر مربع $\equiv$ ۱ پاسکال. اگرچه روغن بسیار چسبناک است، اما این تنش برشی نسبتاً کم است، حدود ۲۴۰۰ برابر کمتر از فشار اتمسفر. تنش‌های چسبناک در گازها و مایعات رقیق (آبکی) حتی کمتر هستند.

تغییرات ویسکوزیته با دما

دما تأثیر قوی و فشار تأثیر متوسطی بر ویسکوزیته دارد.

ویسکوزیته گازها و بیشتر مایعات با فشار به آرامی افزایش می‌یابد. آب به طور غیرمعمول کاهش بسیار کمی در دمای زیر ۳۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. از آنجایی که تغییر ویسکوزیته

فقط چند درصد تا ۱۰۰ اتمسفر است، در این کتاب از اثرات فشار صرف نظر می‌کنیم.

ویسکوزیته گاز با دما افزایش می‌یابد. دو تقریب رایج عبارتند از

قانون توان و قانون ساترلند:

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \begin{cases} \left(\frac{T}{T_0} \right)^n & \text{power law} \\ \frac{(T/T_0)^{3/2} (T_0 + S)}{T + S} & \text{Sutherland law} \end{cases} \quad (1.27)$$

که در آن μ_0 ویسکوزیته شناخته شده در دمای مطلق شناخته شده T_0 (معمولاً ۲۷۳ کلوین) است. ثابت‌های n و S با داده‌ها مطابقت دارند و هر دو فرمول در طیف وسیعی از دماها کافی هستند. برای هوا، $n \approx 0.7$ و $S \approx 110$ کلوین $R^\circ 199 =$ سایر مقادیر در مرجع ۲۶ ارائه شده است.

ویسکوزیته مایع با دما کاهش می‌یابد و تقریباً نمایی است، $\mu \approx a e^{-b/T}$ ؛ اما برازش بهتر، نتیجه تجربی است که $\ln \mu$ در $1/T$ درجه دوم است، که در آن T دمای مطلق است:

$$\ln \frac{\mu}{\mu_0} \approx a + b \left(\frac{T_0}{T} \right) + c \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 \quad (1.28)$$

برای آب، با دمای $T_0 = 273.16$ کلوین، $\mu_0 = 0.001792$ کیلوگرم بر (متر مربع بر ثانیه)، مقادیر پیشنهادی عبارتند از $a = -1.94$ ، $b = -4.80$ و $c = 6.74$ ، با دقت حدود ± 1 درصد. ویسکوزیته آب در

جدول A.1 جدول‌بندی شده است. برای داده‌های بیشتر در مورد ویسکوزیته، به مراجع ۲۷، ۲۸ و ۲۹ مراجعه کنید.

سیالات غیرنیوتنی

سیالاتی که از قانون خطی معادله (۱.۲۳) پیروی نمی‌کنند، غیرنیوتنی نامیده می‌شوند و در کتاب‌های رئولوژی [۱۶] به آنها پرداخته شده است. شکل a1.9 برخی از مثال‌ها را با یک سیال نیوتنی مقایسه می‌کند. برای منحنی‌های غیرخطی، شیب در هر نقطه، ویسکوزیته ظاهری نامیده می‌شود.

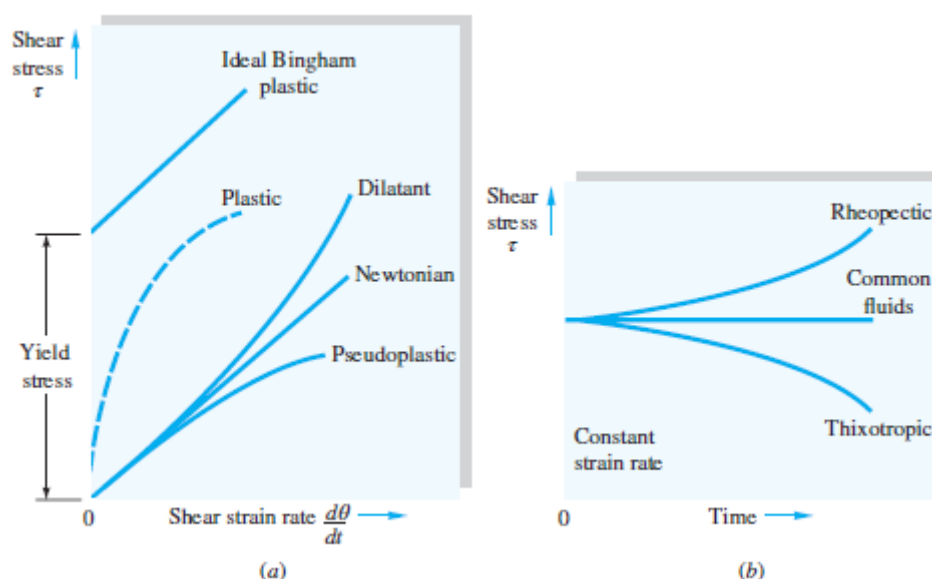
دیلاتانت. این سیال، غلیظ شونده برشی است و مقاومت آن با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد. نمونه‌هایی از آن، سوسپانسیون‌های نشاسته ذرت یا شن در آب هستند. مورد کلاسیک، ماسه روان است که اگر کسی آن را تکان دهد، سفت می‌شود.

شبه پلاستیک. یک سیال رقیق شونده برشی در نرخ‌های کرنش بالاتر مقاومت کمتری دارد. یک رقیق شونده بسیار قوی، پلاستیک نامیده می‌شود. برخی از نمونه‌های فراوان آن عبارتند از محلول‌های پلیمری، سوسپانسیون‌های کلوئیدی، خمیر کاغذ در آب، رنگ لاتکس، پلاسمای خون، شربت و ملاس. مورد کلاسیک، رنگ است که هنگام ریختن غلیظ است اما هنگام برس زدن با نرخ کرنش بالا رقیق می‌شود.

پلاستیک بینگهام. حالت محدودکننده یک ماده پلاستیکی حالتی است که قبل از شروع جریان، به تنش تسلیم محدود نیاز دارد. شکل a1.9 نشان دهنده تسلیم و به دنبال آن رفتار خطی است، اما جریان غیرخطی نیز می‌تواند رخ دهد. برخی از نمونه‌ها عبارتند از: سوسپانسیون‌های رس، گل حفاری، خمیردندان، سس مایونز، شکلات و خردل. حالت کلاسیک آن catsup است که تا زمانی که با تکان دادن به آن تنش وارد نکنید، از بطری خارج نمی‌شود.

یکی دیگر از پیچیدگی‌های رفتار غیرنیوتنی، اثر گذرای نشان داده شده در شکل b1.9 است. برخی از سیالات برای حفظ نرخ کرنش ثابت به تنش برشی تدریجی نیاز دارند و رئوپکتیک نامیده می‌شوند. حالت مخالف

سیالی که با گذشت زمان رقیق می‌شود و نیاز به کاهش تنش دارد، تیکسوتروپیک نامیده می‌شود. ما در این کتاب از اثرات غیرنیوتنی صرف نظر می‌کنیم؛ برای مطالعه بیشتر به مرجع ۱۶ مراجعه کنید.



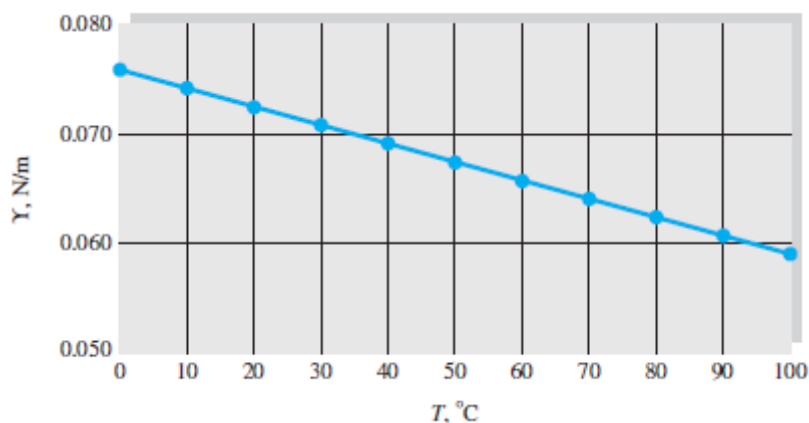
شکل ۱.۹ رفتار رئولوژیکی مواد ویسکوز مختلف: (الف) تنش در مقابل نرخ کرنش؛ (ب) تأثیر زمان بر تنش اعمال شده.

رئومترها

دستگاه‌های تجاری زیادی برای اندازه‌گیری رفتار تنش برشی در مقابل نرخ کرنش سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی وجود دارد. آنها به طور کلی رئومتر نامیده می‌شوند و طرح‌های مختلفی دارند: دیسک‌های موازی، صفحه مخروطی، استوانه‌های هم محور چرخان، لوله‌های پیچشی، کششی و موین. مرجع ۲۹ بحث خوبی را ارائه می‌دهد. یک دستگاه محبوب، رئومتر دیسک موازی است که در شکل ۱.۱۰ نشان داده شده است. یک لایه نازک از سیال بین دیسک‌ها قرار می‌گیرد که یکی از آنها می‌چرخد. گشتاور مقاوم روی دیسک چرخان متناسب با ویسکوزیته سیال است. یک نظریه ساده برای این دستگاه در مثال ۱.۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱.۱۰ یک رئومتر با دیسک موازی دوار (NETZSCH).



شکل ۱.۱۱ کشش سطحی سطح مشترک هوای تمیز-آب. داده‌ها از جدول الف.۵.

کشش سطحی

مایعی که نمی‌تواند آزادانه منبسط شود، با مایع یا گاز دومی رابط تشکیل می‌دهد. شیمی فیزیک چنین سطوح بین سطحی کاملاً پیچیده است و کل کتاب‌های درسی به این تخصص اختصاص داده شده‌اند [۳۰]. مولکول‌های موجود در اعماق مایع به دلیل بسته‌بندی نزدیک خود، یکدیگر را دفع می‌کنند. مولکول‌های سطح چگالی کمتری دارند و یکدیگر را جذب می‌کنند. از آنجایی که نیمی از همسایگان آنها وجود ندارند، اثر مکانیکی این است که سطح در کشش است. می‌توانیم اثرات سطحی در مکانیک سیالات را با مفهوم کشش سطحی به طور مناسب توضیح دهیم.

اگر برشی به طول dl در یک سطح بین سطحی ایجاد شود، نیروهای برابر و مخالف بزرگی γdl عمود بر برش و موازی با سطح قرار می‌گیرند، که در آن γ ضریب کشش سطحی نامیده می‌شود. ابعاد γ عبارتند از

{F/L}، با واحدهای SI نیوتن بر متر و واحدهای BG پوند-نیرو بر فوت. یک مفهوم جایگزین این است که برش را تا مساحت dA باز کنیم. این امر مستلزم انجام کاری به مقدار Y dA است. بنابراین ضریب Y را می‌توان به عنوان انرژی سطحی در واحد سطح مشترک، بر حسب نیوتن بر متر مربع یا فوت بر پوند بر فوت مربع نیز در نظر گرفت.

دو سطح مشترک رایج، آب-هوا و جیوه-هوا هستند. برای یک سطح تمیز در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد = ۶۸ درجه فارنهایت، کشش سطحی اندازه‌گیری شده عبارت است از:

$$Y = \begin{cases} 0.0050 \text{ lbf/ft} = 0.073 \text{ N/m} & \text{air-water} \\ 0.033 \text{ lbf/ft} = 0.48 \text{ N/m} & \text{air-mercury} \end{cases} \quad (1.29)$$

اینها مقادیر طراحی هستند و اگر سطح حاوی آلاینده‌هایی مانند مواد شوینده یا لکه باشد، می‌توانند به طور قابل توجهی تغییر کنند. به طور کلی Y با دمای مایع کاهش می‌یابد و در نقطه بحرانی صفر است. مقادیر Y برای آب در شکل ۱.۱۱ و جدول A.5 داده شده است.

اگر سطح مشترک منحنی باشد، یک ترازوی مکانیکی نشان می‌دهد که اختلاف فشار در سطح مشترک وجود دارد، فشار در سمت مقعر بیشتر است، همانطور که در شکل ۱.۱۲ نشان داده شده است. در شکل ۱.۱۲a، افزایش فشار در داخل یک استوانه مایع توسط دو نیروی کشش سطحی متعادل می‌شود:

$$\begin{aligned} 2RL \Delta p &= 2YL \\ \text{or} \quad \Delta p &= \frac{Y}{R} \end{aligned} \quad (1.30)$$

ما در این محاسبه وزن مایع را در نظر نمی‌گیریم. در شکل ۱.۱۲b، افزایش فشار در داخل یک قطره کروی، حلقه‌ای از نیروی کشش سطحی را متعادل می‌کند:

$$\begin{aligned} \pi R^2 \Delta p &= 2\pi RY \\ \text{or} \quad \Delta p &= \frac{2Y}{R} \end{aligned} \quad (1.31)$$

ما می‌توانیم از این نتیجه برای پیش‌بینی افزایش فشار درون یک حباب صابون استفاده کنیم، که دو سطح مشترک با هوا دارد، یک سطح داخلی و یک سطح خارجی با شعاع تقریباً یکسان R:

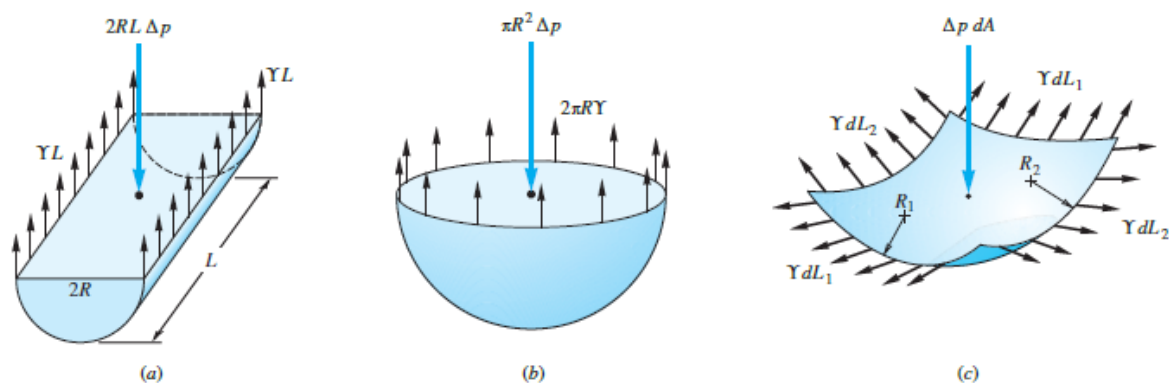
$$\Delta p_{\text{bubble}} \approx 2 \Delta p_{\text{droplet}} = \frac{4Y}{R} \quad (1.32)$$

شکل ۱۱.۱۲ حالت کلی یک سطح مشترک با انحنای دلخواه را نشان می‌دهد که شعاع‌های اصلی انحنای آن R_1 و R_2 هستند. یک موازنه نیرو عمود بر سطح نشان می‌دهد که افزایش فشار در سمت مقعر برابر است با

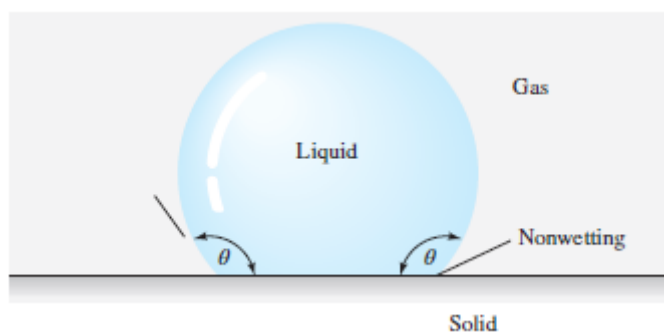
$$\Delta p = \gamma(R_1^{-1} + R_2^{-1}) \quad (1.33)$$

معادلات (۱.۳۰) تا (۱.۳۲) همگی می‌توانند از این رابطه کلی استخراج شوند؛ برای مثال، در معادله (۱.۳۰)، $R_1 = R$ و $R_2 = \infty$.

دومین اثر مهم سطحی، زاویه تماس θ است که وقتی یک سطح مشترک مایع با یک سطح جامد برخورد می‌کند، مانند شکل ۱.۱۳، ظاهر می‌شود. در این صورت، تعادل نیرو شامل γ و θ می‌شود. اگر زاویه تماس کمتر از 90° درجه باشد، گفته می‌شود که مایع جامد را تر می‌کند. اگر $\theta > 90^\circ$ درجه باشد، مایع غیر ترشونده نامیده می‌شود. به عنوان مثال، آب صابون را تر می‌کند اما موم را تر نمی‌کند. آب به شدت سطح شیشه تمیز را تر می‌کند، با $\theta \approx 0^\circ$ درجه. مانند γ ، زاویه تماس θ به شرایط فیزیکوشیمیایی واقعی سطح مشترک جامد-مایع حساس است. برای یک سطح مشترک تمیز جیوه-هوا-شیشه، $\theta = 130^\circ$.



شکل ۱.۱۲ تغییر فشار در یک سطح مشترک منحنی به دلیل کشش سطحی: (الف) داخل یک استوانه مایع؛ (ب) داخل یک قطره کروی؛ (ج) سطح مشترک منحنی کلی.



شکل ۱.۱۳ اثرات زاویه تماس در فصل مشترک مایع-گاز-جامد. اگر $\theta < 90^\circ$ درجه باشد، مایع جامد را «تر» می‌کند؛ اگر $\theta > 90^\circ$ درجه باشد، مایع تر نمی‌شود.

مثال ۱.۸ نشان می‌دهد که چگونه کشش سطحی باعث بالا یا پایین رفتن سطح مشترک سیال در یک لوله موئین می‌شود.

مثال ۱.۸

عبارتی برای تغییر ارتفاع h در یک لوله دایره‌ای از مایع با کشش سطحی γ و زاویه تماس θ ، مطابق شکل E1.8، استخراج کنید.

راه حل

مولفه عمودی نیروی کشش سطحی حلقه در سطح مشترک در لوله باید وزن ستون سیال با ارتفاع h را متعادل کند:

$$2\pi R\gamma \cos \theta = \gamma \pi R^2 h$$

با حل معادله برای h ، به نتیجه مطلوب می‌رسیم:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\gamma R} \quad \text{Ans.}$$

بنابراین، ارتفاع موئینگی با شعاع لوله R به طور معکوس افزایش می‌یابد و اگر $\theta < 90^\circ$ (مایع مرطوب‌کننده) باشد، مثبت و اگر $\theta > 90^\circ$ باشد، منفی (فرورفتگی موئینگی) است.

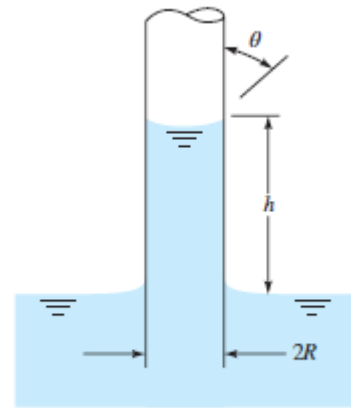
فرض کنید $R = 1$ میلی‌متر باشد. سپس، افزایش موئینگی برای سطح مشترک آب-هوا-شیشه، $\theta \approx 0^\circ$ ، γ ، $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ و $\gamma = 0.073 \text{ N/m}$ برابر است با:

$$h = \frac{2(0.073 \text{ N/m})(\cos 0^\circ)}{(1000 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.001 \text{ m})} = 0.015 \text{ (N} \cdot \text{s}^2\text{)/kg} = 0.015 \text{ m} = 1.5 \text{ cm}$$

برای فصل مشترک جیوه-هوا-شیشه، با $\theta = 130^\circ$ ، $\gamma = 0.48 \text{ N/m}$ و $\rho = 13600 \text{ kg/m}^3$ ، خیز موئینگی عبارت است از:

$$h = \frac{2(0.48)(\cos 130^\circ)}{13,600(9.81)(0.001)} = -0.0046 \text{ m} = -0.46 \text{ cm}$$

وقتی از لوله‌ای با قطر کوچک برای اندازه‌گیری فشار استفاده می‌شود (فصل ۲)، این اثرات مویرگی باید اصلاح شوند.



E1.8

فشار بخار

فشار بخار، فشاری است که در آن یک مایع می‌جوشد و با بخار خود در تعادل است. به عنوان مثال، فشار بخار آب در دمای ۶۸ درجه فارنهایت، ۴۹ پوند بر فوت مربع است، در حالی که فشار جیوه تنها ۰.۰۰۳۵ پوند بر فوت مربع است. اگر فشار مایع بیشتر از فشار بخار باشد، تنها تبادل بین مایع و بخار، تبخیر در سطح مشترک است. با این حال، اگر فشار مایع به کمتر از فشار بخار برسد، حباب‌های بخار در مایع ظاهر می‌شوند. اگر آب تا ۲۱۲ درجه فارنهایت گرم شود، فشار بخار آن به ۲۱۱۶ پوند بر فوت مربع افزایش می‌یابد و بنابراین آب در فشار اتمسفر معمولی می‌جوشد.

هنگامی که فشار مایع به دلیل پدیده جریان، به زیر فشار بخار کاهش می‌یابد، این فرآیند را کاویتاسیون می‌نامیم. اگر آب از حالت سکون تا حدود ۵۰ فوت بر ثانیه شتاب بگیرد، فشار آن حدود ۱۵ پوند بر اینچ مربع یا ۱ اتمسفر کاهش می‌یابد. این می‌تواند باعث کاویتاسیون شود [۳۱]. پارامتر بدون بعد توصیف کننده جوشش القایی جریان، عدد کاویتاسیون است.

$$Ca = \frac{P_a - P_v}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (1.34)$$

که در آن p_a = فشار محیط

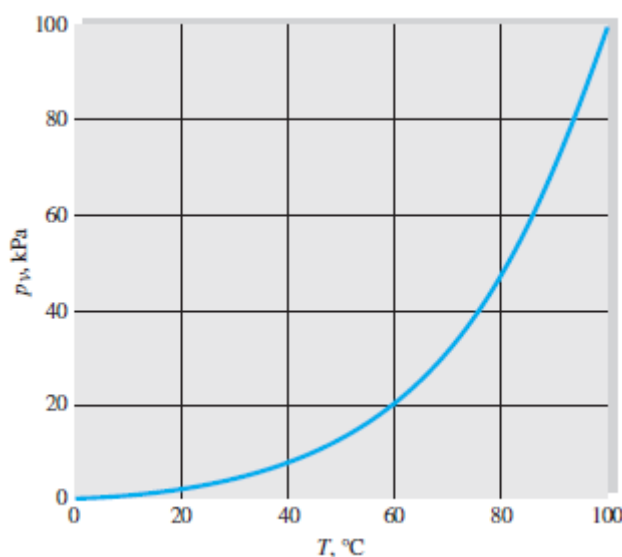
p_v = فشار بخار

V = سرعت جریان مشخصه

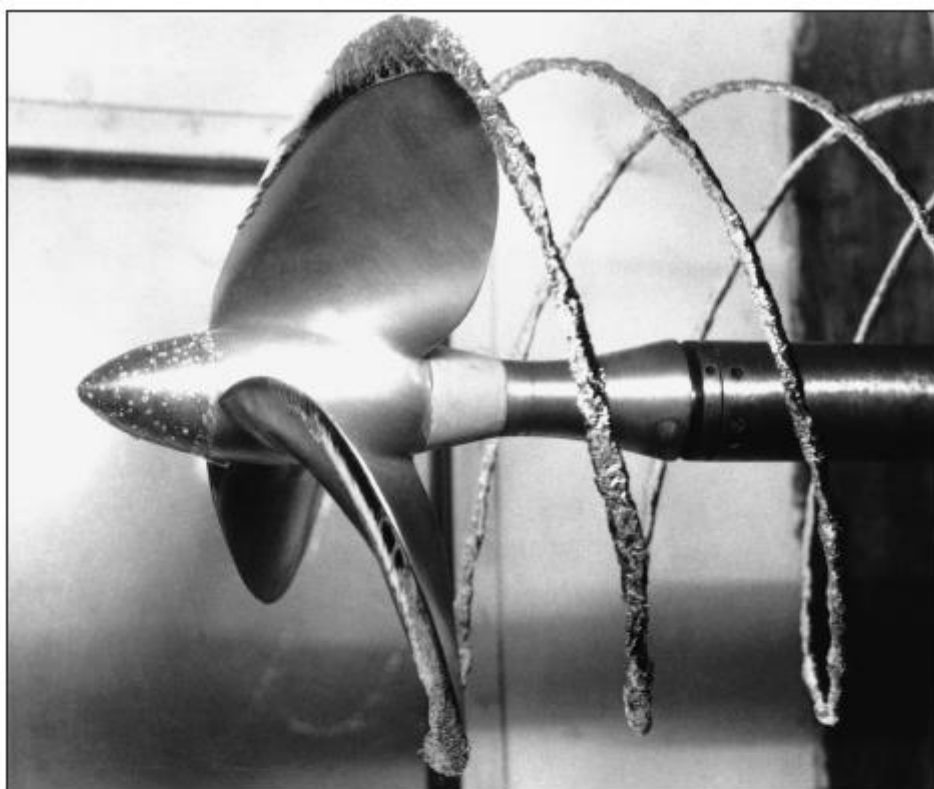
ρ = چگالی سیال

بسته به هندسه، یک جریان معین دارای مقدار بحرانی Ca است که در زیر آن جریان شروع به کاویتاسیون می‌کند. مقادیر کشش سطحی و فشار بخار آب در جدول A.5 آورده شده است. فشار بخار آب در شکل ۱.۱۴ رسم شده است.

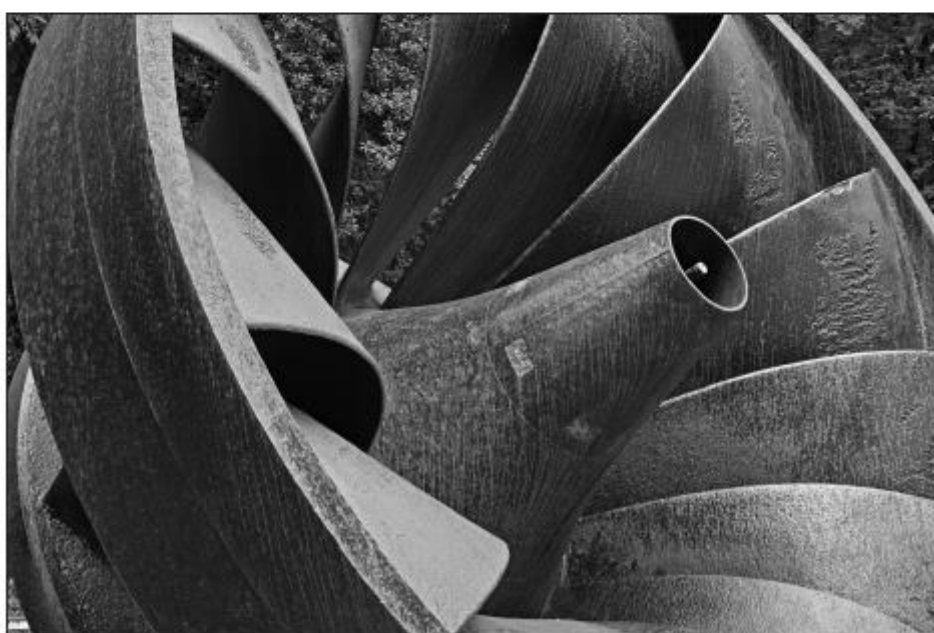
شکل a۱.۱۵ حباب‌های کاویتاسیون را نشان می‌دهد که روی سطوح کم‌فشار یک پروانه دریایی تشکیل می‌شوند، همانطور که در آب در حال هم زدن توسط پروانه اتفاق می‌افتد. هنگامی که این حباب‌ها به ناحیه‌ای با فشار بالاتر حرکت می‌کنند، به صورت انفجاری متلاشی می‌شوند. فروپاشی کاویتاسیون می‌تواند به سرعت سطوح فلزی را خرد و ساییده کند و در نهایت آنها را از بین ببرد، همانطور که در شکل b۱.۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱.۱۴ فشار بخار آب. داده‌ها از جدول الف.۵.



(a)



(b)

شکل ۱.۱۵ دو جنبه از تشکیل حباب کاویتاسیون در جریان‌های مایع: (الف) زیبایی: صفحات حباب مارپیچی از سطح یک پروانه دریایی تشکیل می‌شوند (آزمایشگاه ملی فیزیک / حق نشر تاج / منبع علمی)؛ (ب) زشتی: حباب‌های در حال فروپاشی، سطح یک پروانه را فرسایش می‌دهند (عکس از فلاfabری/آلامی).

مثال ۱.۹

یک اژدر خاص که در آب شیرین با دمای ۱۰ درجه سانتیگراد حرکت می‌کند، دارای نقطه فشار حداقلی است که با فرمول زیر داده می‌شود

$$p_{\min} = p_0 - 0.35 \rho V^2 \quad (1)$$

که در آن $p_0 = 115 \text{ kPa}$ ، ρ چگالی آب و V سرعت اژدر است. سرعتی را که در آن حباب‌های کاویتاسیون روی اژدر تشکیل می‌شوند، تخمین بزنید. ثابت ۰.۳۵ بدون بعد است.

راه حل

• فرض: حباب‌های کاویتاسیون زمانی تشکیل می‌شوند که حداقل فشار برابر با فشار بخار p_v باشد.

• رویکرد: معادله (۱) بالا را که مربوط به معادله برنولی از مثال ۱.۳ است، برای سرعت زمانی که $p_{\min} = p_v$ است، حل کنید. از واحدهای m ، N ، kg ، s استفاده کنید.

• مقادیر ویژگی: در دمای ۱۰ درجه سانتیگراد، جدول A.1 را برای $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ و جدول A.5 را برای $p_v = 1.227 \text{ kPa}$ بخوانید.

مراحل حل: داده‌های معلوم را در معادله (۱) قرار دهید و با استفاده از واحدهای SI ، سرعت را حل کنید:

$$p_{\min} = p_v = 1227 \text{ Pa} = 115,000 \text{ Pa} - 0.35 \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) V^2, \text{ with } V \text{ in m/s}$$

$$\text{Solve } V^2 = \frac{(115,000 - 1227)}{0.35(1000)} = 325 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \text{ or } V = \sqrt{325} \approx 18.0 \text{ m/s} \quad \text{Ans.}$$

• توضیحات: توجه داشته باشید که استفاده از واحدهای SI نیازی به ضریب تبدیل ندارد، همانطور که در مثال ۱.۳ بحث شد. فشارها باید بر حسب پاسکال وارد شوند، نه کیلوپاسکال.

شرایط عدم لغزش و عدم پرش دمایی

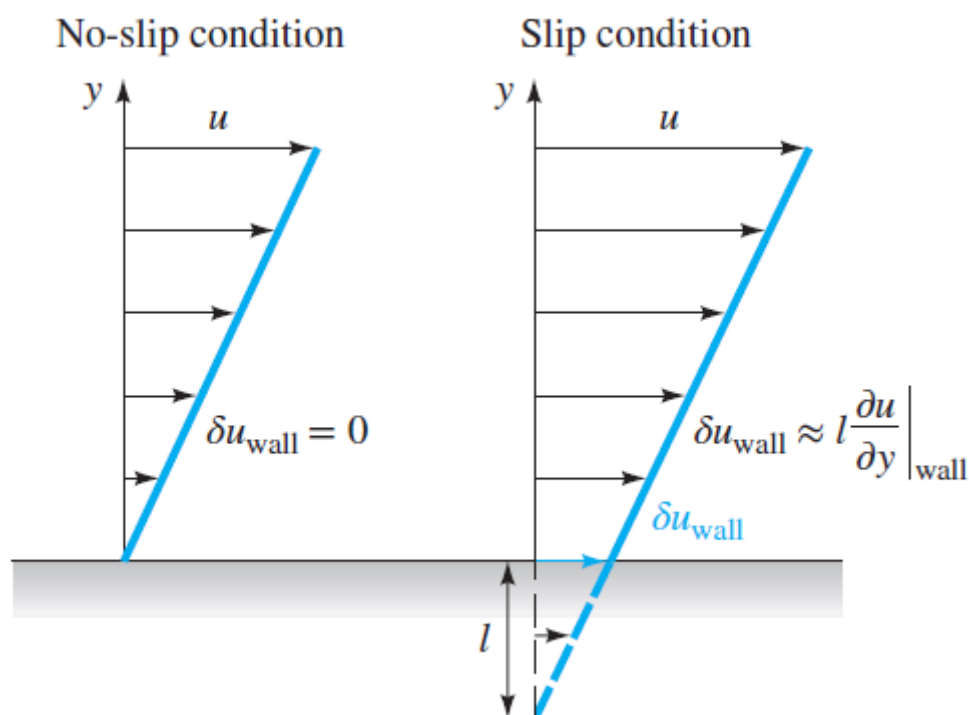
هنگامی که جریان سیال توسط یک سطح جامد محدود می‌شود، برهمکنش‌های مولکولی باعث می‌شوند که سیال در تماس با سطح، به دنبال تعادل مومنتوم و انرژی با آن سطح باشد. همه مایعات اساساً با سطوحی که با آنها در تماس هستند در تعادل هستند. همه گازها نیز، به جز در رقیق‌ترین شرایط [۱۸]، در تعادل هستند.

بنابراین، به استثنای گازهای رقیق، همه سیالات در نقطه تماس با یک جامد، سرعت و دمای آن سطح را در نظر می‌گیرند:

$$V_{\text{fluid}} \equiv V_{\text{wall}} \quad T_{\text{fluid}} \equiv T_{\text{wall}} \quad (1.35)$$

این شرایط به ترتیب شرایط عدم لغزش و عدم پرش دمایی نامیده می‌شوند. آن‌ها به عنوان شرایط مرزی برای تحلیل جریان سیال عبوری از یک سطح جامد عمل می‌کنند. شکل ۱.۱۶ پروفیل‌های سرعت برای جریان سیال روی یک سطح جامد را با شرایط عدم لغزش و لغزش نشان می‌دهد. شرط مرزی عدم لغزش فرض می‌کند که سرعت لایه سیال در تماس مستقیم با مرز با سرعت این مرز یکسان است (معادله ۱.۳۵). هیچ حرکت نسبی بین مرز و این لایه سیال وجود ندارد؛ بنابراین هیچ لغزشی وجود ندارد. از سوی دیگر، شرط مرزی لغزش، ناپیوستگی در تابع سرعت را فرض می‌کند که منجر به حرکت نسبی بین سیال و مرز می‌شود؛ بنابراین لغزش وجود دارد. فاصله عمودی فرضی داخل مرز که در آن تابع سرعت به طور مؤثر به سرعت مرز می‌رسد، طول لغزش l نامیده می‌شود.

در برخی کاربردها، شرط عدم لغزش در تحلیل جریان غیرلزج (فصل ۸) تا حدی نادیده گرفته می‌شود. جریان اجازه دارد از روی سطح «بلغزد» اما از سطح نفوذ نکند.



شکل ۱.۱۶ شماتیک پروفیل‌های سرعت روی یک سطح جامد با شرایط بدون لغزش و لغزش.

$$V_{\text{normal}}(\text{fluid}) \equiv V_{\text{normal}}(\text{solid}) \quad (1.36)$$

در حالی که سرعت مماسی V_t مستقل از دیواره مجاز است. تحلیل بسیار ساده تر است، اما الگوهای جریان بسیار ایده آل سازی شده اند. برای سیالات نیوتنی با ویسکوزیته بالا، فرض سرعت خطی و شرایط عدم لغزش می تواند برخی تحلیل های تقریبی پیچیده را برای جریان های ویسکوز دو و سه بعدی ارائه دهد. مثال زیر، برای نوعی ویسکومتر دیسکی چرخان، این موضوع را نشان می دهد.

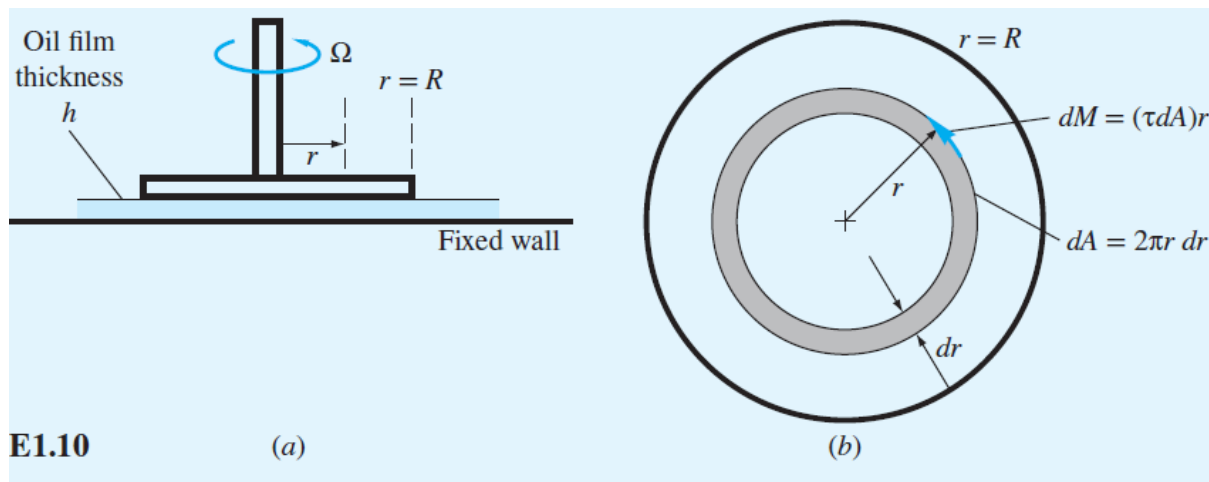
مثال ۱.۱۰

یک لایه روغن با ویسکوزیته μ و ضخامت $h \ll R$ بین یک دیواره جامد و یک دیسک دایره ای قرار دارد، همانطور که در شکل E1.10 نشان داده شده است. دیسک با سرعت زاویه ای Ω به طور پیوسته می چرخد. با توجه به اینکه سرعت و تنش برشی با شعاع r تغییر می کنند، فرمولی برای گشتاور M مورد نیاز برای چرخش دیسک استخراج کنید. از نیروی کشش هوا صرف نظر کنید.

راه حل

• طرح کلی سیستم: شکل E1.10 نمای جانبی (الف) و نمای بالایی (ب) سیستم را نشان می دهد.

• فرضیات: پروفیل سرعت خطی، جریان آرام، عدم لغزش، تنش برشی موضعی داده شده توسط معادله (۱.۲۳).



• روش: تنش برشی را روی یک نوار دایره ای به عرض dr و مساحت $dA = 2\pi r$ در نظر بگیرید.

dr در شکل E1.10b تخمین بزنید، سپس گشتاور dM را حول مبدأ ایجاد شده توسط این تنش برشی پیدا کنید.

برای یافتن گشتاور کل M ، روی کل دیسک انتگرال بگیرید.

• مقادیر ویژگی: ویسکوزیته روغن ثابت μ . در این جریان پایدار، چگالی روغن اهمیتی ندارد.

• مراحل حل: در شعاع r ، سرعت در روغن مماسی است و از صفر در دیواره ثابت (بدون لغزش) تا $u = \Omega r$ در سطح دیسک (همچنین بدون لغزش) متغیر است. تنش برشی در این موقعیت به این صورت است:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \approx \mu \frac{\Omega r}{h}$$

این تنش برشی در همه جا عمود بر شعاع از مبدا است (شکل E1.10b را ببینید). سپس گشتاور کل حول مبدا دیسک، که در اثر برش این نوار دایره‌ای ایجاد می‌شود، را می‌توان یافت و از آن انتگرال گرفت:

$$dM = (\tau)(dA)r = \left(\frac{\mu\Omega r}{h}\right)(2\pi r dr)r, M = \int dM = \frac{2\pi\mu\Omega}{h} \int_0^R r^3 dr = \frac{\pi\mu\Omega R^4}{2h} \quad \text{Ans.}$$

• توضیحات: این یک تحلیل مهندسی ساده‌شده است که اثرات احتمالی لبه‌ها، نیروی پسای هوا روی بالای دیسک و تلاطمی که ممکن است در صورت چرخش خیلی سریع دیسک ایجاد شود را نادیده می‌گیرد.

جریان لغزشی در گازهای رقیق

شرط مرزی «لغزش آزاد»، معادله (۱.۳۶)، یک ترفند ریاضی غیرواقعی برای حل جریان غیرلزج است. با این حال، لغزش دیواره واقعی و واقع‌بینانه در گازهای رقیق، همانطور که در شکل ۱.۱۶ نشان داده شده است، رخ می‌دهد، جایی که مولکول‌های بسیار کمی برای ایجاد تعادل مومنتوم با دیواره وجود دارد. در سال ۱۸۷۹، فیزیکدان جیمز کلرک، ماکسول، از نظریه جنبشی گازها برای پیش‌بینی سرعت لغزش در دیواره استفاده کرد:

$$\delta u_{\text{wall}} \approx \ell \frac{\partial u}{\partial y}|_{\text{wall}} \quad (1.37)$$

که در آن ℓ میانگین مسیر آزاد گاز است و u و x در امتداد دیواره قرار دارند. اگر ℓ در مقایسه با مقیاس جانبی L جریان بسیار کوچک باشد، عدد نادسن، $Kn = \ell/L$ ، کوچک است و سرعت لغزش نزدیک به صفر است. ما چند مسئله لغزش را بررسی خواهیم کرد، اما جزئیات جریان گاز رقیق برای مطالعه بیشتر در مراجع ۱۸ و ۴۶ باقی مانده است.

سرعت صوت

در جریان گاز، باید از اثرات تراکم‌پذیری (تغییرات قابل توجه چگالی ناشی از جریان) آگاه بود. در بخش ۴.۲ و فصل ۹ خواهیم دید که تراکم‌پذیری زمانی اهمیت پیدا می‌کند که سرعت جریان به کسر قابل توجهی از سرعت صوت سیال برسد. سرعت صوت a یک سیال، نرخ انتشار پالس‌های فشار با اختلال کوچک ("امواج صوتی") از طریق سیال است. در فصل ۹، از روی استدلال‌های تکانه و ترمودینامیکی، نشان خواهیم داد که سرعت صوت با مشتق فشار-چگالی متناسب با مدول حجمی ایزنتروپیک تعریف می‌شود:

$$a^2 = \frac{\beta}{\rho} = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = k \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T, \quad k = \frac{c_p}{c_v}$$

که در آن $\beta = \rho (\partial p / \partial \rho)_s$ = مدول حجمی ایزنتروپیک

این موضوع هم برای مایع و هم برای گاز صادق است، اما مشکل تراکم‌پذیری در مورد گازها پیش می‌آید. برای یک گاز ایده‌آل، معادله (۱.۱۰)، فرمول ساده زیر را به دست می‌آوریم:

$$a_{\text{ideal gas}} = (kRT)^{1/2} \quad (1.38)$$

که در آن R ثابت گاز، معادله (۱.۱۱) و T دمای مطلق است. به عنوان مثال، برای هوا در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، $a = \{(1.40)[287 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})](293 \text{ K})\}^{1/2} \approx 343 \text{ m/s}$ ($1126 \text{ ft/s} = 768 \text{ mi/h}$) است. اگر در این حالت، سرعت هوا به کسر قابل توجهی از a ، مثلاً ۱۰۰ m/s برسد، باید اثرات تراکم‌پذیری را در نظر بگیریم (فصل ۹). روش دیگر برای بیان این موضوع، در نظر گرفتن تراکم‌پذیری زمانی است که عدد ماخ، $Ma = V/a$ ، جریان به حدود ۰.۳ می‌رسد.

سرعت صوت آب در جدول A.5 جدول‌بندی شده است. برای گازهای تقریباً کامل، مانند هوا، سرعت صوت به سادگی توسط معادله (۱.۳۸) محاسبه می‌شود. مدول حجمی بسیاری از مایعات در جدول A.3 ذکر شده است. با این حال، توجه داشته باشید، همانطور که در مرجع ۴۵ بحث شده است، حتی مقدار بسیار کمی از گاز حل شده در یک مایع می‌تواند سرعت صوت مخلوط را تا ۸۰ درصد کاهش دهد.

مثال ۱.۱۱

یک هواپیمای تجاری با سرعت ۵۴۰ مایل در ساعت در ارتفاع استاندارد ۳۰۰۰۰ فوت پرواز می‌کند. عدد ماخ آن چقدر است؟

راه حل

• رویکرد: سرعت «استاندارد» صوت را بیابید؛ آن را با استفاده از واحدهای مناسب بر سرعت تقسیم کنید.

• مقادیر ویژگی: از جدول A.6، در ارتفاع ۳۰۰۰ فوت (۹۱۴۴ متر)، $\approx 303a$ متر بر ثانیه. این را با دمای استاندارد که از جدول ۲۲۹ کلوین تخمین زده می‌شود، مقایسه کنید. از معادله (۱.۳۸) برای هوا،

$$a = [kR_{\text{air}}T]^{1/2} = [1.4(287)(229)]^{1/2} \approx 303 \text{ m/s.}$$

• مراحل حل: سرعت هواپیما را به متر بر ثانیه تبدیل کنید:

$$V = (540 \text{ mi/h})[0.44704 \text{ m/s/(mi/h)}] \approx 241 \text{ m/s.}$$

سپس عدد ماخ به صورت زیر داده می‌شود:

$$\text{Ma} = V/a = (241 \text{ m/s})/(303 \text{ m/s}) = 0.80 \quad \text{Ans.}$$

توضیحات: این مقدار، $\text{Ma} = 0.80$ ، برای هواپیماهای تجاری امروزی معمول است.

۱.۸ الگوهای جریان: خطوط مسیر و خطوط رگه

مکانیک سیالات موضوعی بسیار بصری است. الگوهای جریان را می‌توان به ده‌ها روش مختلف تجسم کرد و شما می‌توانید این طرح‌ها یا عکس‌ها را مشاهده کنید و از نظر کیفی و اغلب کمی چیزهای زیادی در مورد جریان بیاموزید.

چهار نوع الگوی خط اساسی برای تجسم جریان‌ها استفاده می‌شود:

۱. خط جریان، خطی است که در یک لحظه معین، در همه جا مماس بر بردار سرعت است.

۲. خط مسیر، مسیر واقعی است که توسط یک ذره سیال معین طی می‌شود.

۳. خط جریان، مکان هندسی ذراتی است که قبلاً از یک نقطه از پیش تعیین‌شده عبور کرده‌اند [۳۳].

۴. خط زمانی مجموعه‌ای از ذرات سیال است که در یک لحظه معین یک خط تشکیل می‌دهند. محاسبه ریاضی خط جریان آسان‌تر است، در حالی که تولید تجربی سه خط دیگر آسان‌تر است. توجه داشته باشید که خط جریان و خط زمانی، خطوط لحظه‌ای هستند، در حالی که خط مسیر و خط جریان با گذشت زمان ایجاد می‌شوند. خط مسیر را می‌توان با بررسی زمان حرکت یک ذره علامت‌گذاری شده در جریان پیدا کرد. ایجاد تجربی خطوط جریان در جریان ناپایدار دشوار است، مگر اینکه تعداد زیادی از ذرات علامت‌گذاری شوند و

جهت حرکت آنها در یک بازه زمانی بسیار کوتاه ثبت شود [۳۲]. در جریان پایدار، که سرعت فقط با موقعیت تغییر می‌کند، وضعیت بسیار ساده می‌شود:

خطوط جریان، خطوط مسیر و خطوط جریان در جریان پایدار یکسان هستند.

در مکانیک سیالات، رایج‌ترین نتیجه ریاضی برای اهداف تجسم، الگوی خط جریان است. شکل a۱.۱۷ مجموعه‌ای معمول از خطوط جریان را نشان می‌دهد، و شکل b۱.۱۷ یک الگوی بسته به نام لوله جریان را نشان می‌دهد. طبق تعریف، سیال درون یک لوله جریان در آنجا محدود می‌شود زیرا نمی‌تواند از خطوط جریان عبور کند؛ بنابراین

دیواره‌های لوله جریان لزوماً جامد نیستند، بلکه می‌توانند سطوح سیال باشند.

شکل ۱.۱۸ یک بردار سرعت دلخواه را نشان می‌دهد. اگر طول قوس عنصری dr یک خط جریان موازی با V باشد، اجزای مربوطه آنها باید متناسب باشند:

$$\text{Streamline:} \quad \frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} = \frac{dr}{V} \quad (1.39)$$

اگر سرعت‌ها (u, v, w) توابع شناخته‌شده‌ای از موقعیت و زمان باشند، می‌توان از معادله (۱.۳۹) برای یافتن خط جریان عبوری از نقطه اولیه (x_0, y_0, z_0, t_0) انتگرال گرفت. این روش برای جریان‌های پایدار ساده است، اما ممکن است برای جریان‌های ناپایدار پر زحمت باشد.

تجسم جریان

آزمایش‌های هوشمندانه می‌توانند تصاویر واضحی از الگوی جریان سیال ایجاد کنند، همانطور که قبلاً در شکل‌های a۱.۱۵ و ۱.۱۶ نشان داده شده است. به عنوان مثال، خطوط رگه با انتشار مداوم ذرات مشخص شده (رنگ، دود یا حباب) از یک نقطه معین تولید می‌شوند. اگر جریان پایدار باشد، خطوط رگه با خطوط جریان و خطوط مسیر جریان یکسان خواهند بود.

برخی از روش‌های تجسم جریان شامل موارد زیر است [۳۴-۳۸]:

۱. تخلیه رنگ، دود یا حباب.

۲. پودر یا پولک‌های سطحی روی جریان‌های مایع.

۳. ذرات شناور یا با چگالی خنثی.

۴. تکنیک‌های نوری که تغییرات چگالی در جریان‌های گاز را تشخیص می‌دهند: سایه‌نگار، شلیرن و تداخل‌سنج.

۵. دسته‌های نخ متصل به سطوح مرزی.

۶. پوشش‌های تبخیری روی سطوح مرزی.

۷. مایعات درخشان، افزودنی‌ها یا زیست‌تابی.

۸. سرعت‌سنجی تصویر ذرات (PIV).

شکل ۱۱.۱۵ a با رهاسازی حباب‌ها تجسم شده است. شکل ۱۱.۱۹ اندازه عظیم گرداب‌های نوک بال از بال یک هواپیمای کشاورزی را نشان می‌دهد [۴۲]. این تجسم با تکنیکی انجام شده است که از دود رنگی برخاسته از زمین استفاده می‌کند. چرخش در نوک بال، گرداب‌های دنباله هواپیما را ردیابی می‌کند که تأثیر قدرتمندی بر میدان جریان پشت هواپیما دارد. گرداب‌های نوک بال می‌توانند برای هواپیما، به ویژه در مراحل فرود و برخاستن، خطری ایجاد کنند. محققان ناسا گرداب‌های دنباله را در آزمایش‌های پرواز واقعی در هواپیماهای تحقیقاتی مطالعه کردند. هدف آنها درک کامل این پدیده و سپس استفاده از آن دانش برای ایجاد یک سیستم خودکار است که بتواند شرایط متغیر گرداب دنباله را در فرودگاه‌ها پیش‌بینی کند.

جزئیات ریاضی تحلیل خطوط جریان/خط رگه/خط مسیر در مرجع ۳۳ ارائه شده است. منابع ۳۹-۴۱ آلبوم‌های زیبایی از عکس‌های جریان هستند. منابع ۳۴-۳۶ تکنگرایی‌هایی در مورد تکنیک‌های تجسم جریان هستند.

مکانیک سیالات موضوعی شگفت‌انگیز برای تجسم است، نه فقط برای الگوهای ثابت (پایدار)، بلکه برای مطالعات حرکت متحرک (ناپایدار). فهرست برجسته‌ای از فیلم‌ها و نوارهای ویدیویی جریان موجود توسط کار و یانگ [۴۳] ارائه شده است.



شکل ۱.۱۹ تجسم گردابه‌های نوک بال، که اندازه عظیم گردابه‌های تولید شده در طول مرحله برخاستن هواپیما را نشان می‌دهد. (ناسا)

۱.۹ تکنیک‌های تحلیل جریان پایه

نیروها و حرکت، تمرکز اصلی در مکانیک جامدات و سیالات هستند. برای مکانیک جامدات، ما به طور گسترده از نمودار جسم آزاد برای تحلیل استفاده کرده‌ایم. اما برای مکانیک سیالات، بسته به مسئله‌ای که مورد تحلیل قرار می‌گیرد، از یک سیستم یا یک حجم کنترل استفاده خواهیم کرد. روابط بین نیروها و حرکت توسط تبدیل جرم و قانون دوم حرکت نیوتن تعیین می‌شود. با این حال، بیان این قوانین اساسی در یک سیستم یا یک حجم کنترل متفاوت است.

در تحلیل حرکت سیال با یک حجم کنترل، ممکن است یکی از دو رویکرد زیر را اتخاذ کنیم: (۱) فرموله کردن قوانین اساسی مکانیک سیالات در یک ناحیه محدود، ایجاد تعادل بین جریان ورودی و خروجی، و تعیین اثرات ناخالص جریان مانند نیرو یا گشتاور روی یک جسم یا کل تبادل انرژی؛ یا (۲) فرموله کردن قوانین اساسی مکانیک سیالات در یک حجم کنترل بی‌نهایت کوچک، و تلاش برای توصیف الگوی جریان دقیق در هر نقطه (x, y, z) در سیال جریان. در حالت اول، معادلات حاصل، فرمول‌بندی‌های انتگرالی از قوانین اساسی هستند که به تفصیل در فصل ۳ معرفی شده‌اند. یک مثال از کاربردها می‌تواند نیروی لنگر کلی مورد نیاز برای یک مقطع از لوله‌ها یا نرخ جریان جرمی برای یک جت باز باشد. حالت دوم، رویکرد «دیفرانسیلی» است و در فصل ۴ توسعه داده شده است. معادلات حاصل، معادلات دیفرانسیل هستند. حل معادلات دیفرانسیل حرکت سیال، ابزاری برای تعیین رفتار دقیق میدان جریان فراهم می‌کند. یک مثال می‌تواند توزیع فشار روی سطح بال هواپیما یا توزیع سرعت در یک اتاق تمیز تهویه شده باشد. این رویکردها، همراه با مطالعه تجربی مبتنی بر تحلیل ابعادی و شباهت معرفی شده در فصل ۵، تکنیک‌های اساسی تحلیل جریان برای مکانیک سیالات را ایجاد می‌کنند و ابزارهای لازم را برای حل انواع مختلف مسائل پیچیده دینامیک سیالات فراهم می‌کنند. لازم به ذکر است که با در دسترس بودن کامپیوترهای قدرتمند، حل معادلات دیفرانسیل با استفاده از تکنیک‌های تحلیل عددی که به عنوان CFD شناخته می‌شوند، امکان‌پذیر است. اگرچه بررسی گسترده این رویکرد فراتر از محدوده این کتاب است، خواننده باید توجه داشته باشد که CFD به یک ابزار مهندسی رایج برای دسته بزرگی از مسائل جریان سیال، انتقال حرارت و جرم تبدیل شده است.

قوانین اساسی حاکم بر حرکت سیال

در همه موارد، جریان باید سه قانون اساسی مکانیک به علاوه یک رابطه حالت ترمودینامیکی و شرایط مرزی مرتبط را برآورده کند:

۱. پایستگی جرم (پیوستگی).

۲. تکانه خطی (قانون دوم نیوتن).

۳. قانون اول ترمودینامیک (پایستگی انرژی).

۴. یک رابطه حالت مانند $p = p(p, T)$.

۵. شرایط مرزی مناسب در سطوح جامد، فصل مشترک‌ها، ورودی‌ها و خروجی‌ها.

در تحلیل‌های انتگرالی و دیفرانسیلی، این پنج رابطه به صورت ریاضی مدل‌سازی شده و با روش‌های محاسباتی حل می‌شوند. در یک مطالعه تجربی، خود سیال این کار را بدون استفاده از هیچ گونه ریاضیاتی انجام می‌دهد. به عبارت دیگر، اعتقاد بر این است که این قوانین برای فیزیک اساسی هستند و هیچ جریان سیالی شناخته شده نیست که آنها را نقض کند.

۱.۱۰ آزمون مبانی مهندسی (FE)

مسیر رسیدن به مجوز مهندسی حرفه‌ای، یک ایستگاه اولیه دارد، آزمون مبانی مهندسی، که به عنوان آزمون FE شناخته می‌شود. این آزمون قبلاً با نام آزمون مهندس در حال آموزش (E-I-T) شناخته می‌شد. این آزمون ملی هشت ساعته احتمالاً به زودی برای همه فارغ التحصیلان مهندسی الزامی خواهد شد، نه فقط برای اخذ مجوز، بلکه به عنوان ابزاری برای ارزیابی دانشجویان. جلسه صبحگاهی چهار ساعته با ۱۲۰ مسئله، بسیاری از مطالعات عمومی را پوشش می‌دهد:

ریاضیات—۱۵٪ اخلاق و شیوه‌های تجاری—۷٪ خواص مواد—۷٪

احتمال و آمار مهندسی—۷٪ مکانیک سیالات مهندسی—۷٪

اقتصاد—۸٪

شیمی—۹٪ مهندسی برق و مکانیک—۱۰٪ مغناطیس—۹٪

کامپیوتر—۷٪ مقاومت مصالح—۷٪ ترمودینامیک—۷٪

برای جلسه چهار ساعته بعدازظهر با ۶۰ مسئله، می‌توانید یکی از هفت ماژول را انتخاب کنید: شیمی، عمران، برق، محیط زیست، صنعتی، مکانیک و سایر/مهندسی عمومی. توجه داشته باشید که مکانیک سیالات موضوع جدایی‌ناپذیر امتحان است. بنابراین، برای تمرین، این متن در صورت لزوم شامل تعدادی مسئله FE در پایان فصل است.

قالب سوالات امتحان FE چندگزینه‌ای است، معمولاً با پنج انتخاب، که با دقت انتخاب شده‌اند تا در صورت استفاده از واحدهای نادرست، فراموش کردن دو برابر یا نصف کردن چیزی، از دست دادن یک عامل π یا موارد مشابه، شما را با پاسخ‌های قابل قبول وسوسه کنند. در برخی موارد، انتخاب‌ها ناخواسته مبهم هستند، مانند مثال زیر از امتحان قبلی:

گذار از جریان آرام به جریان آشفته در عدد رینولدز رخ می‌دهد. (الف) ۹۰۰ (ب) ۱۲۰۰ (ج) ۱۵۰۰ (د) ۲۱۰۰
(ه) ۳۰۰۰

پاسخ «صحیح» به عنوان (D) نمره‌گذاری شد، $Re = 2100$. واضح است که ممتحن در حال فکر کردن بود، اما فراموش کرد که مشخص کند، قرمز برای جریان در یک لوله دایره‌ای صاف، زیرا (به فصل‌های ۶ و ۷ مراجعه کنید) انتقال به شدت به هندسه، زبری سطح و مقیاس طول مورد استفاده در تعریف Re وابسته است. نکته اخلاقی این است که در مورد امتحان عصبانی نشوید، بلکه صرفاً با جریان (با هدف جناس) همراه شوید و تصمیم بگیرید که کدام پاسخ به بهترین وجه با شرایط آموزش کارشناسی مطابقت دارد. تمام تلاش‌ها انجام شده است تا سوالات امتحان FE در این متن بدون ابهام باشند.

۱.۱۱ تاریخچه مکانیک سیالات

بسیاری از محققان برجسته در توسعه مکانیک سیالات نقش داشته‌اند. با این حال، اگر دانشجوی هستید، احتمالاً الان زمان مطالعه تاریخ نیست. بعداً، در طول دوران حرفه‌ای خود، از خواندن تاریخ، نه تنها مکانیک سیالات، بلکه کل علم لذت خواهید برد. در اینجا نام‌هایی آورده شده است که در ادامه این کتاب با مشارکت‌های آنها آشنا می‌شویم.

نام سهم مهم

ارشمیدس (۲۸۵-۲۱۲ پیش از میلاد) قوانین شناوری و اجسام شناور را وضع کرد.

لئوناردو داوینچی (۱۴۵۲-۱۵۱۹) اولین معادله پیوستگی را فرموله کرد.

ایزاک نیوتن (۱۶۴۲-۱۷۲۷) قانون تنش‌های خطی ویسکوز را مطرح کرد.

لئونارد اویلر (۱۷۰۷-۱۷۸۳) با حل معادلات اساسی، معادله برنولی را توسعه داد.

ال. ام. اچ. ناویر (۱۷۸۵-۱۸۳۶) معادلات دیفرانسیل اساسی جریان ویسکوز را فرموله کرد.

ژان لویی پوازوی (۱۷۹۹-۱۸۶۹) اولین آزمایش‌ها را روی جریان آرام در لوله‌ها انجام داد.

آزبورن رینولدز (۱۸۴۲-۱۹۱۲) پدیده گذار به آشفتگی را توضیح داد. لودویگ پراتل (۱۸۷۵-۱۹۵۳) نظریه

لایه مرزی را تدوین کرد و جدایی جریان را پیش‌بینی کرد. تئودور فون کارمن (۱۸۸۱-۱۹۶۳) پیشرفت‌های

عمده در آیرودینامیک و نظریه تلاطم

منابع ۱۲ تا ۱۵ بررسی جامعی از تاریخچه مکانیک سیالات ارائه می‌دهند.

خلاصه

این فصل به بررسی رفتار یک سیال - که برخلاف یک جامد، در صورت قرار گرفتن در معرض تنش برشی باید حرکت کند - و خواص مهم سیال پرداخته است. نویسندگان معتقد است که مهمترین خاصیت، میدان بردار سرعت $V(x, y, z, t)$ است. پس از آن فشار p ، چگالی ρ و دما T قرار دارند. بسیاری از خواص ثانویه در مسائل مختلف جریان وارد می‌شوند: ویسکوزیته μ ، رسانایی حرارتی k ، وزن مخصوص γ ، کشش سطحی γ ، سرعت صوت a و فشار بخار p_v . برای مهارت یافتن در مکانیک سیالات، باید یاد بگیرید که همه این خواص را پیدا کرده و از آنها استفاده کنید.

بحث مختصری در مورد پنج نوع مختلف روابط ریاضی

که ما برای حل مسائل جریان استفاده خواهیم کرد - پایستگی جرم، تکانه خطی،

قانون اول ترمودینامیک، معادلات حالت و شرایط مرزی مناسب

در دیوارها و سایر مرزها - ارائه شد.

الگوهای جریان نیز به طور خلاصه مورد بحث قرار گرفته‌اند. محبوب‌ترین و مفیدترین طرح

ترسیم میدان خطوط جریان، یعنی خطوطی که در همه جا موازی با بردار سرعت محلی هستند، می‌باشد. از آنجایی که ۷۵ درصد زمین پوشیده از آب و ۱۰۰ درصد پوشیده از هوا است، دامنه مکانیک سیالات گسترده است و تقریباً با هر تلاش انسانی سروکار دارد. علوم هواشناسی، اقیانوس‌شناسی فیزیکی و هیدرولوژی با جریان‌های سیال طبیعی سروکار دارند، همانطور که مطالعات پزشکی تنفس و گردش خون نیز با این موضوع مرتبط هستند. همه مسائل حمل و نقل شامل حرکت سیال هستند و تخصص‌های توسعه‌یافته‌ای در آیرودینامیک هواپیماها و موشک‌ها و هیدرودینامیک دریایی کشتی‌ها و زیردریایی‌ها در این زمینه وجود دارد. تقریباً تمام انرژی الکتریکی ما یا از جریان آب، جریان هوا از طریق توربین‌های بادی یا از جریان بخار از طریق ژنراتورهای توربینی تولید می‌شود. همه مسائل احتراق شامل حرکت سیال هستند، همانطور که مسائل کلاسیک‌تر آبیاری، کنترل سیل، تأمین آب، دفع فاضلاب، حرکت پرتابه و خطوط لوله نفت و گاز نیز شامل می‌شوند. هدف این کتاب ارائه مفاهیم اساسی و کاربردهای عملی کافی در مکانیک سیالات است تا شما را برای حرکت روان به هر یک از این زمینه‌های تخصصی علم جریان آماده کند - و سپس با توسعه فناوری‌های جدید، آماده خروج مجدد از آن باشید.