فصل ۱

مقدمه و مفاهیم پایه

اهداف

با مطالعه این فصل، شما باید قادر باشید:

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

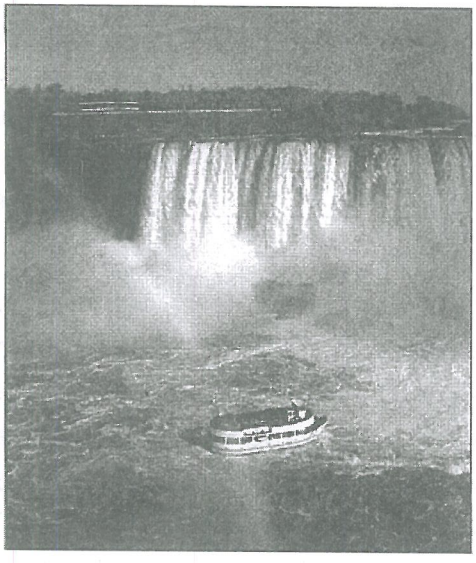
در این فصل مقدماتی، مفاهیم پایه‌ای که عموماً در تحلیل جریان سیال استفاده می‌شوند را بیان می‌کنیم. فصل را با بحث در مورد فازهای ماده و روش‌های متعدد طبقه‌بندی جریان سیال، مانند جریان لزج در برابر جریان غیر لزج، جریان داخلی در برابر جریان خارجی، جریان تراکم‌پذیر در برابر جریان تراکم ناپذیر، جریان آرام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

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

۱-۱ مقدمه

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

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



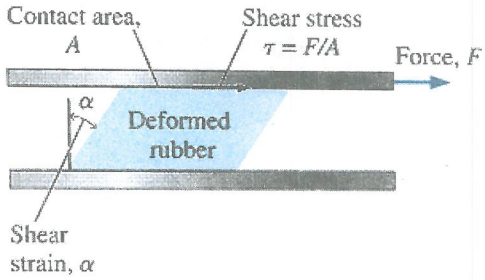
شکل ۱-۱ مکانیک سیالات به مایعات و گازهای متحرک یا ساکن می‌پردازد.

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

سیال چیست؟

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

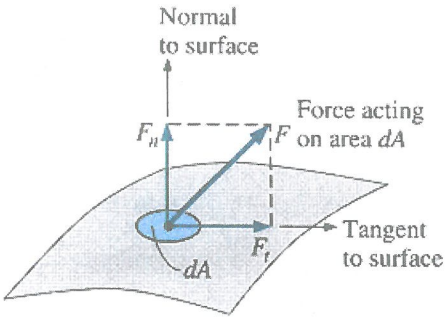
زاویه تغییر شکل α (که جابه‌جایی زاویه‌ای یا کرنش برشی نامیده می‌شود)، متناسب با نیروی F افزایش می‌یابد. در حالی‌که صفحه پایینی ثابت است، با فرض اینکه هیچ لغزشی بین صفحات و قطعه پلاستیکی وجود ندارد، سطح بالایی پلاستیک به اندازه تغییر مکان صفحه بالایی جابه‌جا می‌شود. در حالت تعادل، نیروی خالص وارد بر صفحه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



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

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

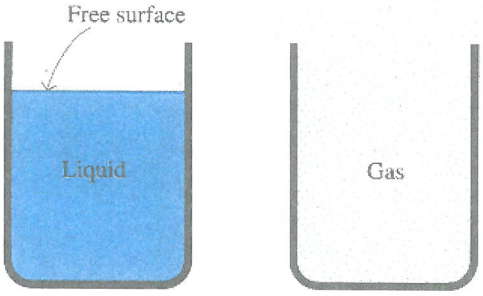
در یک سیال ساکن، مؤلفه عمودی تنش فشار نامیده می‌شود. جـداره‌هـای محـافظ سـیال، تنش برشی را خنثی کرده، و در نتیجـه سـیال سـاکن در حـالتی بـا تـنش برشـی صـفر اسـت. هنگامی‌که دیواره‌ها برداشته شده و یا مخزن نگهدارنده سیال کج شود، تـنش برشـی بـه‌وجـود آمده و مایع در جهت شکل‌گیری سطح آزاد افقی حرکت می‌کند.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



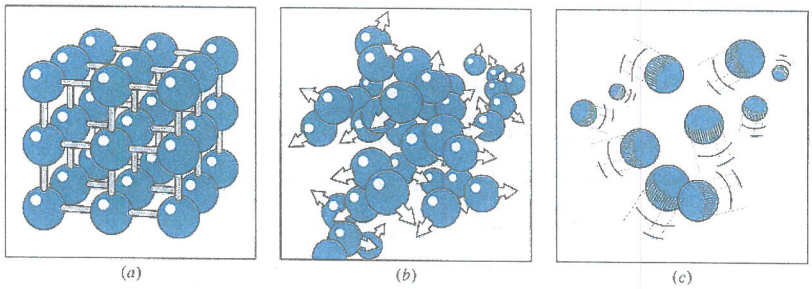
$$\text{Normal stress: } \sigma = \frac{F_n}{dA}$$

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

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



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



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

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

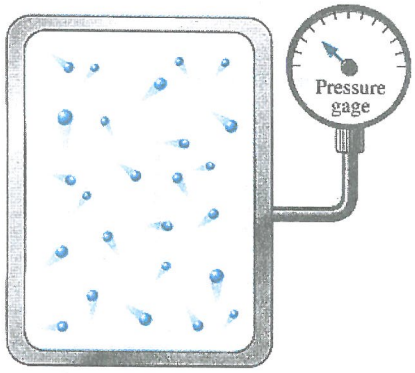
پیوندهای بین ملکولی در جامدات قوی‌ترین و در گازها ضعیف‌ترین هستند. یک دلیل آن این است که در مواد جامد ملکول‌ها به‌طور فشرده در کنار هم قرار دارند، در حالی‌که در گازها ملکول‌ها از یکدیگر فاصله زیادی دارند (شکل ۱-۵).

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

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

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

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



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

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

زمینه‌های کاربرد مکانیک سیالات

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

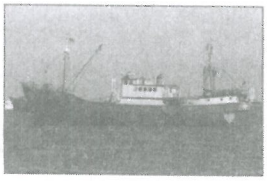
به عنوان شروع، مکانیک سیالات نقشی حیاتی در بدن انسان دارد. قلب به طور ثابت و مداوم خون را به تمام بدن انسان در سیاهرگ‌ها و شریان‌ها پمپ می‌کند و ریه‌ها مکانی برای جریان هوا در جهات مختلف هستند. بدیهی است که تمام قلب‌های مصنوعی، دستگاه‌های تنفسی مصنوعی و سیستم‌های دیالیز براساس دینامیک سیالات طراحی شده‌اند.

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

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

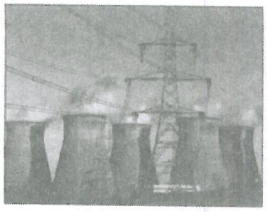
در یک مقیاس گسترده‌تر، در طراحی و تجزیه و تحلیل هواپیماها، قایق‌ها، زیردریایی‌ها، موشک‌ها، موتورهای جت، توربین‌های بادی، ابزارهای پزشکی، خنک سازی قطعات الکترونیکی و انتقال آب، نفت خام و گاز طبیعی، مکانیک سیالات نقش مهمی را ایفا می‌کند. هم‌چنین در طراحی ساختمان‌ها، پل‌ها و حتی تابلوهای اعلانات، برای حصول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

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

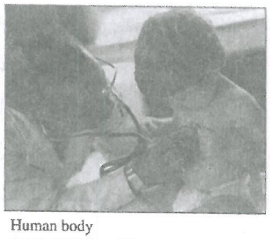


Boats
© Vol. 5/Photo Disc.

Aircraft and spacecraft
© Vol. 1/Photo Disc.



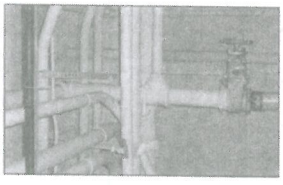
Power plants
© Vol. 57/Photo Disc.



Human body
© Vol. 110/Photo Disc.

Cars
Photo by John M. Cimbala.

Wind turbines
© Vol. 17/Photo Disc.



Piping and plumbing systems
Photo by John M. Cimbala.

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

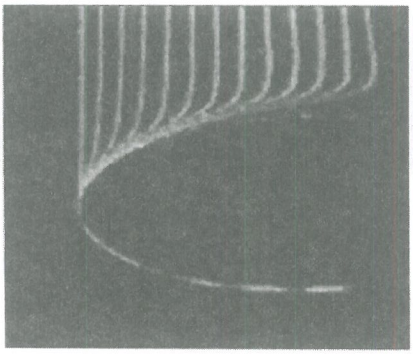
شکل ۱-۷ برخی از حوزه‌های کاربرد مکانیک سیالات.

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

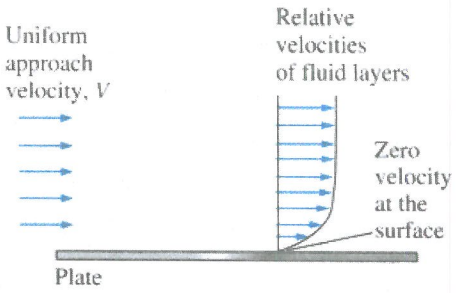
۱-۲ شرط عدم لغزش

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

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



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

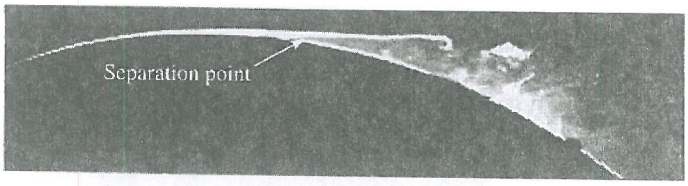


شکل ۱–۹ بر اثر شرط عدم لغزش، سیال روی سطح ساکن به توقف کامل می‌رسد.

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

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

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



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

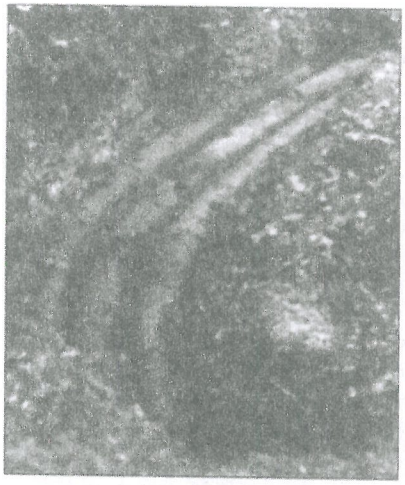
نتیجه دیگر شرط عدم لغزش نیروی پسای سطحی است که نیرویی است که سیال در جهت جریان به سطح اعمال می‌کند.

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

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

۱-۳ تاریخچه مختصری از مکانیک سیالات

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

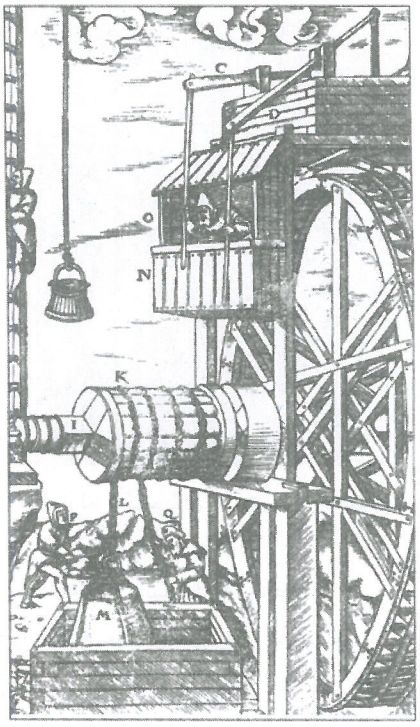


شکل ۱-۱۱ قطعات خط لوله پرگامون ـ قطر هر لوله سفالی بین ۱۳ تا ۱۸ سانتی‌متر بود.

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

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

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



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

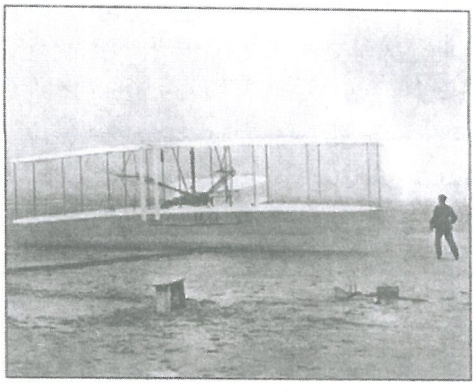
تلاش به‌وسیلهٔ دانیل برنولی (۱۷۸۲-۱۷۰۰) و همکارش لئونارد اویلر (۱۷۸۳-۱۷۰۷) ادامه یافت. آنها معادلات انرژی و مومنتوم را وضع کردند. نوشته کلاسیک برنولی در مورد هیدرودینامیک در سال ۱۷۸۳ را می‌توان اولین کتاب مکانیک سیالات دانست. سرانجام جین دالامبر (۱۷۸۹-۱۷۱۷) ایده شتاب و سرعت اجزاء، بیان دیفرانسیلی معادله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

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

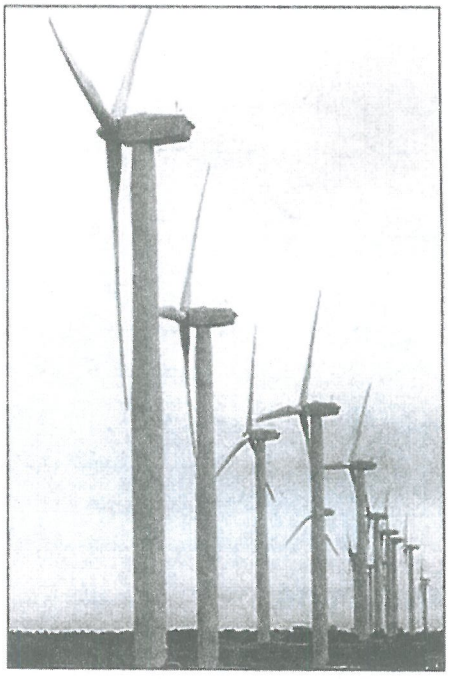
آموزشی شماست را شناسایی کنید!!). آنتونی چزی (۱۷۹۸- ۱۷۱۸)، لوئیس ناویر (۱۸۳۶- ۱۷۸۵)، گاسپارد کوریولیس (۱۸۴۳- ۱۷۹۲)، هنری دارسی (۱۸۵۸- ۱۸۰۳) و بسیاری از محققان برجسته دیگر در زمینه مهندسی از دانشجویان و استادان همین مدارس بوده‌اند.

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

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



شکل ۱-۱۳ هواپیمای برادران رایت در کیتی هاوک.



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

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

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

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

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

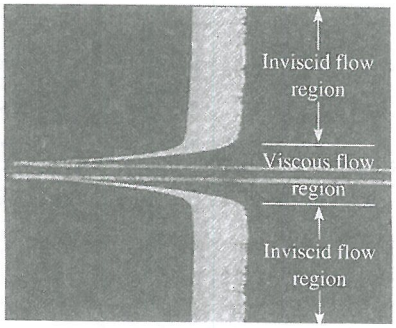
مکانیک سیالات در قرن بیست یکم به کجا خواهد رفت؟ صادقانه بگوییم، حتی یک برآورد محدود به آن سوی عصر حاضر، حماقت محض است. اما، تاریخ به ما چیزی را می‌گوید و آن این است که مهندسان آنچه را می‌دانند، برای استفاده اجتماع به‌کار خواهند برد و آنها در جستجوی آنچه نمی‌دانند هستند و وقت بسیار زیادی صرف این‌کار خواهد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

۱-۴ طبقه‌بندی جریان‌های سیال

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

جریان لزج در برابر جریان غیر لزج

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

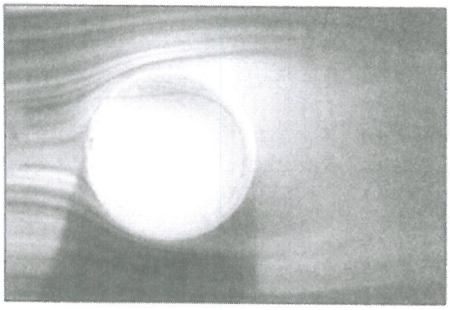


شکل ۱-۱۵ عبور جریان یکنواخت اولیه بر روی یک صفحه تخت و تشکیل نواحی جریان لزج (نزدیک دو سطح صفحه) و ایجاد جریان غیرلزج (دور از صفحه).

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

جریان داخلی در برابر جریان خارجی

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



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

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

جریان تراکم پذیر در برابر تراکم ناپذیر

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

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

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

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

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

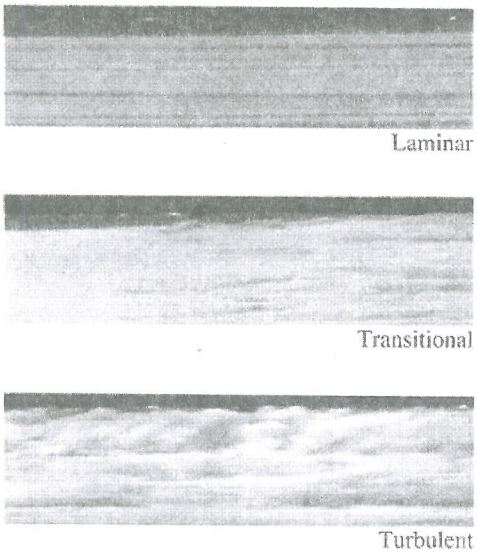
جریان‌های مایع با دقت بسیار بالایی تراکم ناپذیرند، اما میزان تغییر چگالی در جریان گازها بسیار بوده و تقریب حاصل از فرض جریان غیر قابل تراکم برای گازها به عدد ماخ بستگی دارد. اگر تغییرات چگالی گازها حدوداً زیر ۵ درصد باشد که معمولاً در این حالت $Ma < ۰٫۳$ است، جریان گاز را تقریباً به صورت تراکم ناپذیر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

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

جریان آرام در برابر جریان مغشوش

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

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



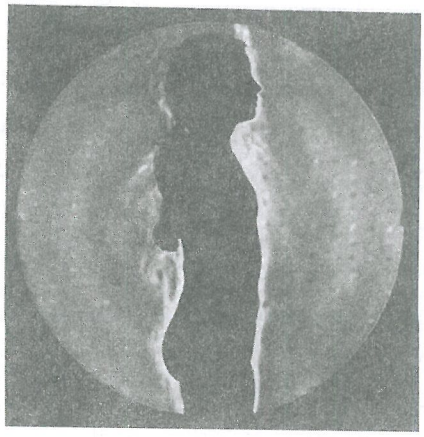
شکل ۱-۱۷ جریان‌های آرام، گذرا و مغشوش.

جریان طبیعی (غیراجباری) در برابر جریان اجباری

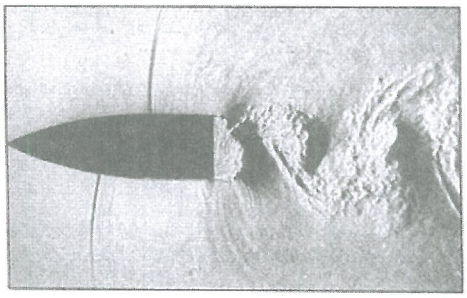
بسته به چگونگی شروع حرکت سیال، جریان سیال را طبیعی یا اجباری می‌گویند. در یک جریان اجباری، سیال توسط یک عامل خارجی مانند پمپ یا فن درون یک لوله یا روی یک سطح جریان می‌یابد. در جریان‌های طبیعی، حرکت سیال ناشی از عوامل طبیعی مانند اثرات شناوری است، که این اثر باعث بالا رفتن سیال گرم‌تر (و در نتیجه سبک‌تر)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

جریان دائم در برابر جریان غیر دائم

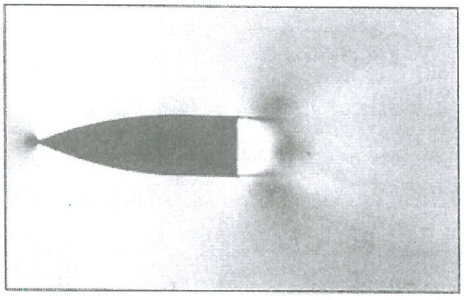
از اصطلاحات دائم و یکنواخت به طور مکرر در مهندسی استفاده می‌شود، و بنابراین فهم صحیح معانی آنها مهم می‌باشد. اصطلاح دائم نشان‌دهندهٔ عدم تغییر در یک نقطه با زمان است. نقطه مقابل دائم واژهٔ غیردائم است. اصطلاح یکنواخت نشان‌دهندهٔ عدم تغییر با مکان در یک ناحیهٔ خاص است. این معانی با استفاده هر روزه شان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



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



(a)



(b)

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

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

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