

فصل ۱

آشنایی با ویژگی‌های سیالات

به‌طور کلی می‌توان گفت که مکانیک سیالات علمی است که در آن به مطالعه‌ی رفتار سیال پرداخته می‌شود. همانند مکانیک جامدات، مکانیک سیالات نیز به دو شاخه‌ی استاتیک سیالات و دینامیک سیالات تقسیم می‌شود. در استاتیک سیال قوانین مربوط به سیالات در حال سکون بررسی می‌شود و در دینامیک سیالات، رفتار جریان در حال حرکت مورد توجه قرار می‌گیرد.

ابتدای این فصل اختصاص به تعاریفی از علم مکانیک سیالات دارد و در ادامه تاریخچه‌ی علم مکانیک سیالات به‌صورت مختصر آمده است. با وجودی که خلاصه کردن تاریخچه‌ی مکانیک سیالات در قالب چند پاراگراف غیر ممکن است، لیکن سعی شده است تا شرح مختصری از روند گسترش و توسعه‌ی این علم بیان گردد و سپس به تعریف سیال و تفاوت‌های آن با جامدات پرداخته شده است. مفاهیم اساسی مانند اصل عدم لغزش سیال نیز مورد توجه قرار گرفته است و به مواردی از کاربرد علم مکانیک سیالات اشاره شده است. با توجه به اینکه شناخت ویژگی‌های سیالات در آنالیز رفتار سیال نقش به‌سزایی را ایفا می‌کند، در این فصل ویژگی‌های سیالات از جمله چگالی، لزجت، تراکم‌پذیری، فشار بخار و کشش سطحی بررسی خواهد شد.

۱-۱ مفاهیم و تاریخچه علم مکانیک سیالات

۱-۱-۱ مقدمه

علم مکانیک، پرسابقه‌ترین شاخه‌ی علم فیزیک است که به بررسی اجسام ساکن و یا در حال حرکت تحت اثر نیروهای وارده می‌پردازد. شاخه‌ای از علم مکانیک که به بررسی اجسام در حال سکون می‌پردازد، **استاتیک**^۱ و شاخه‌ای که به مطالعه‌ی رفتار اجسام در حال حرکت می‌پردازد، **دینامیک**^۲ نامیده می‌شود. علم **مکانیک سیالات**^۳ زیرشاخه‌ای از مکانیک است که به مطالعه‌ی رفتار سیالات در حال سکون (استاتیک سیال)، سیالات در حال حرکت (دینامیک سیال) و اندرکنش سیالات با جامدات یا سیالات دیگر در مرزهای مشترک بین آنها می‌پردازد. چنانچه سیالات در حال سکون، حالت خاصی از سیالات در حال حرکت با سرعت صفر در نظر گرفته شوند، می‌توان از واژه‌ی دینامیک سیالات به جای مکانیک سیالات استفاده کرد.

علم مکانیک سیالات به دو دلیل مورد توجه مهندسين و محققين قرار دارد. اولاً انسان را قادر به درک پدیده‌های جذاب موجود در طبیعت می‌کند و ثانیاً توانایی شبیه‌سازی رفتار سیال و ساخت دستگاه‌هایی برای راحتی زندگی را در اختیار انسان قرار می‌دهد. برای مثال، از چگونگی پرواز پرندگان در آسمان و شناکردن ماهی‌ها در آب به کمک علم مکانیک سیالات، می‌توان به یافته‌هایی از قبیل شکل خاص بدن پرندگان و ماهی‌ها که شبیه **خطوط جریان**^۴ است و همچنین نیروی اعمالی بر اجسام غوطه‌ور، عمل و عکس‌العمل وارده از محیط اطراف جسم بر آن، پی برد. کاربرد عملی این یافته‌ها در شبیه‌سازی بدنه‌ی هواپیما بر اساس خطوط جریان، وسایل نقلیه، قایق‌ها، ساختمان‌ها و پایه‌های پل‌ها به‌منظور بالا بردن راندمان این اجسام، محقق می‌شود. از مثال‌های دیگر می‌توان به شبیه‌سازی عملکرد قلب در بدن و سیستم گردش خون اشاره کرد که نمود آن در سیستم‌های پمپاژ و توزیع آب به‌خوبی نمایان است.

قدمت علم مکانیک سیالات در قالب فرم تجربی آن به دوران ماقبل تاریخ برمی‌گردد. در آن زمان به‌منظور امور کشاورزی و توسعه‌ی دهکده‌ها، انتقال مداوم غذا و کالاها از مهم‌ترین نیازها به‌شمار می‌آمد. شاخه‌ی تجربی علم مکانیک سیالات که هیدرولیک نامیده می‌شد، در آن زمان در کانال‌های آب و کشتی‌ها متبلور گردید. آثار تاریخی کانال‌های آبیاری در مصر و بین‌النهرین با قدمتی بیش از ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد نمایان است. آثار آبرسانی شهری ابتدا در کشور یونان نمایان شد. رومی‌ها نیز کانال‌هایی در سراسر امپراطوری خود احداث کردند که آثاری از آن در کشور ایتالیا نمایان است. همچنین، آثار نقاشی کشتی بر روی کوزه‌های قدیمی یونانی با قدمتی بیش از ۲۵۰۰ سال قبل از میلاد این حقیقت را روشن می‌کند که در آن زمان نیز کشتی وجود داشته است، شکل (۱-۱). بعضی از دست‌نوشته‌های ارشمیدس در خلال سال‌های ۲۱۲ تا ۲۸۷ قبل از میلاد که برای اولین بار نظریه‌ی شناوری و هیدرواستاتیک را بیان کرد نیز نشان‌دهنده‌ی توجه به علم مکانیک سیالات بوده است.

۱- Statics

۲- Dynamics

۳- Fluid mechanics

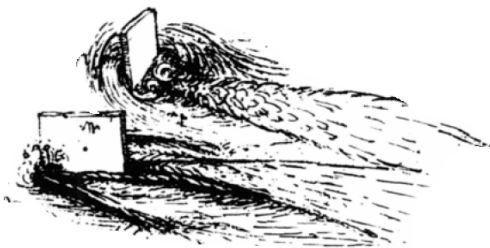
۴- Streamlines



شکل ۱-۱ آثار نقاشی حک شده بر روی کوزه قدیمی.

قبل از اینکه به ادامه‌ی تشریح توسعه‌ی علم هیدرولیک که شاخه‌ی تجربی و آزمایشگاهی علم مکانیک سیالات بود، پرداخته شود، بایستی به نام **لئوناردو داوینچی**^۱ به‌عنوان محقق و دانشمندی در این زمینه اشاره کرد. لئوناردو داوینچی علاوه بر اینکه نقاش بی‌نظیری بود، دانشمند بی‌نظیر نیز به حساب می‌آید. وی در قوانین مربوط به علوم طبیعی بسیار متبحر بود. از جمله اشارات وی چنین است که هر جسمی که در حال سقوط می‌باشد مایل است که حداقل فاصله را طی کند و یا اینکه هر جسم به همان اندازه‌ای که نیرو به هوا وارد می‌کند، از طرف هوا مقاومت می‌بیند. این اظهارات بعداً در قالب قوانین نیوتن در خصوص نیروی ثقل و قانون حرکت (عمل و عکس‌العمل) بیان شد. دست‌نوشته‌ها و تصاویر لئوناردو داوینچی از حرکت آب، گردابه‌ها، امواج آب، اجسام شناور و جریان در لوله‌ها معرف تبحر وی در قوانین طبیعی است. شکل (۱-۲) نشان دهنده‌ی نقاشی‌های به‌جا مانده از این دانشمند معروف است که در آن خطوط جریان و گردابه‌ها در اطراف صفحاتی عمود و موازی جریان نشان داده شده است. لئوناردو داوینچی اولین فردی بود که موفق به یافتن شکل‌هایی با حداقل مقاومت در برابر جریان (شبه خطوط جریان)^۲ گردید [۱]. داوینچی طرفدار مشاهده‌ی جریان اطراف اجسام غوطه‌ور بود که امروزه از این روش تحت عنوان **مشاهده‌ی جریان**^۳ استفاده می‌شود. بسیاری از محققین بعدی نظریه‌های لئوناردو را دنبال کردند و شاخه‌ی تجربی علم مکانیک سیالات که هیدرولیک نامیده می‌شد، در خلال قرن‌های هفدهم تا بیستم رشد زیادی پیدا کرد.

در خلال قرن هجدهم، شاخه‌ی دیگری از مکانیک سیالات تحت عنوان هیدرودینامیک معرفی گردید که در آن به جنبه‌های تئوریک و ریاضی حرکت سیالات پرداخته می‌شد. معادلات کامل جریان سیال **غیرلزج**^۴ (بدون اصطکاک) توسط **اوایلر**^۵ ارایه گردید. با وجود این به‌دلیل فرضیات موجود، نتایج حاصل از این روابط با نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی بسیار متفاوت بود.



شکل ۲-۱ آثار به‌جا مانده از نقاشی‌های لئوناردو داوینچی [۱].

۱- Leonardo da Vinci

۲- Streamlined

۳- Flow visualization

۴- Inviscid fluid

۵- Euler



معرفی یک دانشمند

لئوناردو داوینچی (۱۴۵۲-۱۵۱۹)

این دانشمند در شهر کوچک وینچی، که بین شهر امپلی و پیستوی قرار دارد، در کشور ایتالیا به دنیا آمد. او یک نقاش و دانشمند علوم طبیعی بود. هوش سرشار وی باعث شد تا پدرش او را برای یادگیری در کودکی به مجسمه‌ساز و نقاش معروف فلورانس به نام وروکیو بپسارد. لئوناردو در تمام زمینه‌های هنری با دید علمی برخورد می‌کرد. وی در سال ۱۴۸۰ موفق به ورود به دانشگاه گردید و هنرهای خویش را در مجسمه‌سازی نشان داد. در همان زمان، کلیسای سن دونوتو در نزدیکی فلورانس به وی سفارش ساخت مجسمه‌های کلیسا را داد. او در سال ۱۴۸۲ به شهر میلان آمد و طی نامه‌ای، توانایی‌ها و مهارت‌های خود را در مهندسی عمران و ساخت سازه‌های نظامی به مسئولین شهر بیان کرد که مورد استقبال قرار گرفت. او به تدریج فعالیت‌های خود را در زمینه‌های دیگر گسترش داد تا آنجاییکه در سال ۱۴۹۴، هدایت کارهای هیدرولیکی را در شهر به عهده گرفت. در سال ۱۵۱۳، لئوناردو دعوت پادشاه فرانسه را پذیرفت و به آمبواز رفت که تا آخر عمر خود در آنجا باقی ماند. او در فرانسه پروژه‌های هیدرولیکی را سرپرستی می‌کرد.

به همین دلیل در قرن نوزدهم دانشمندان تلاش‌هایی برای ارتقای این شاخه از علم مکانیک سیالات کردند که در نهایت، نتیجه‌ی این تلاش‌ها، بسط رابطه‌ی حرکت سیال لزج توسط **ناویر و استوکس**^۱ بود. متأسفانه به دلیل ماهیت غیرخطی معادلات دیفرانسیلی جزئی ناویر-استوکس، یافتن راه حل تحلیلی برای جریان‌های عمومی کار آسانی نیست و تنها برای حالت‌های خاصی از جریان، مانند حرکت جریان آرام بین دو صفحه‌ی موازی و در لوله، حل تحلیلی به دست آمده است.

در سال ۱۸۶۹ مقاله‌ی مهمی انتشار یافت که علم هیدرولیک و هیدرودینامیک را به هم متصل کرد. این گزارشی بود که در آن فیزیک‌دان آلمانی به نام **کیرشوف**^۲ به صورت تحلیلی ضریب انقباض جت خروجی در یک روزنه‌ی دوبعدی را برابر $0/۶۱۱$ به دست آورد که با نتایج آزمایشگاهی همخوانی زیادی داشت. با توجه به آنکه می‌توان مقادیری نزدیک به مقادیر واقعی را با استفاده از علم هیدرودینامیک به دست آورد، این موضوع باعث شد تا دانشمندان به این شاخه از علم مجدداً روی آورند.

در سال ۱۹۰۴ نیز مقاله‌ای کلاسیک توسط پروفیسور آلمانی به نام **پرندتل**^۳ ارائه شد که در آن به مفهوم **لایه‌ی مرزی سیال**^۴ اشاره شده بود. ایده‌ی پرندتل این بود که همواره در نزدیکی مرز جامد، یک لایه‌ی نازک از سیال وجود دارد که در آن اصطکاک سیال قابل توجه است، لیکن خارج از مرز این لایه، رفتار سیال مانند سیال بدون اصطکاک است. این مفهوم نسبتاً ساده، انگیزه‌های زیادی را برای آشکار

۱- Navier and Stokes

۲- Kirchoff

۳- Prandtl

۴- Fluid boundary layer

کردن موارد متناقض بین هیدرولیک و هیدرودینامیک ایجاد کرد. لازم به ذکر است که پرندها به‌عنوان پایه‌گذار مکانیک سیالات پیشرفته معرفی شده است.

در حال حاضر با توجه به پیشرفت الکترونیک و پیدایش رایانه‌هایی با سرعت پردازش بالا، حل معادلات غیرخطی توسط روش‌های عددی امکان‌پذیر گردیده و موانع بین علم هیدرولیک و علم هیدرودینامیک کاملاً برداشته شده است و احتمالاً باید شاهد یک جهش بزرگ در این زمینه بود.

۲-۱-۱ تعریف سیال

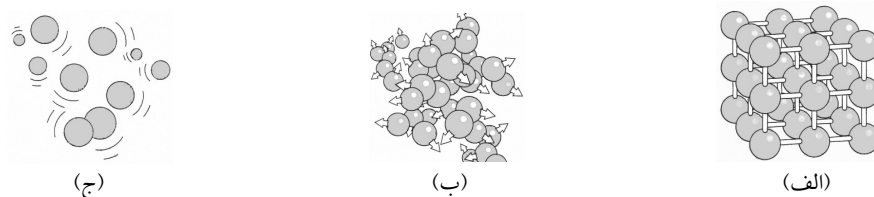
قبل از اینکه به بحث در خصوص مکانیک سیالات پرداخته شود، بهتر است ابتدا با مفهوم سیال آشنا شد. به‌طور کلی هر ماده بر اساس شکل فیزیکی آن که **حالت**^۱ نامیده می‌شود، طبقه‌بندی می‌شود. بر این اساس سه حالت جامد، مایع و گاز (در دمای خیلی زیاد به‌صورت پلاسما وجود خواهد داشت) برای ماده قابل تشخیص است. در برابر مفهوم جامدات، سیالات شامل دو حالت مایعات و گازها می‌باشند. تعریف دیگری از سیال بیان می‌دارد که سیال ماده‌ای است که در برابر کوچک‌ترین نیروی برشی به‌صورت پیوسته تغییر شکل می‌دهد. تمایل به تغییر شکل پیوسته ماده را نیز **سیالیت**^۲ می‌نامند.

۳-۱-۱ تفاوت میان جامد و سیال

در نگاه اول، جامدات سخت و تغییر شکل‌ناپذیر ولی سیالات نرم و تغییر شکل‌پذیر به‌نظر می‌رسند (مثلاً به‌راحتی می‌توان در هوا حرکت کرد). به‌منظور درک تفاوت میان سه حالت جامد، مایع و گاز برای ماده، بایستی ذکر کرد که تمام مواد از ملکول‌هایی تشکیل شده‌اند که در فضا ثابت نبوده و به‌طور نسبی حول همدیگر حرکت می‌کنند. ملکول‌های جامدات نسبت به ملکول‌های مایعات و گازها بسیار به‌هم نزدیک می‌باشند. ساختار فضایی ملکول‌های جامدات (فولاد، بتن و...) نشان‌دهنده تراکم زیاد آنها در یک حجم مشخص همراه با نیروهای چسبنده بین ملکولی بسیار قوی است. نیروی چسبندگی قوی بین ملکول‌ها سبب می‌گردد جامدات شکل خود را حفظ کرده و به‌راحتی تغییر شکل ندهند. در مورد مایعات (آب، روغن و...)، ملکول‌ها با فاصله‌ی بیشتری نسبت به جامدات در کنار همدیگر قرار گرفته و قدرت نیروی چسبندگی بین ملکولی در آنها نسبت به جامدات کمتر است. به‌همین دلیل مایعات به‌راحتی تغییر شکل می‌دهند (ولی فشرده نمی‌شوند) و به شکل ظرفی که در آن قرار دارند درمی‌آیند.

در مورد گازها (هوا، اکسیژن و...) فاصله‌ی بین ملکول‌ها بسیار زیاد بوده و نیروی چسبندگی بین ملکولی بسیار ناچیز است. لذا، گازها به‌راحتی تغییر شکل می‌دهند و می‌توانند به‌طور کامل حجم هر ظرفی را پر کنند. همچنین، ملکول‌های گاز دارای تراز انرژی بالاتری نسبت به مایعات و جامدات هستند.

در شرایط عادی دما و فشار، فاصله‌ی بین ملکول‌ها در گازها در مقیاس 10^{-7} میلی‌متر و در مایعات 10^{-10} میلی‌متر است. تعداد ملکول‌ها در یک میلی‌متر مکعب نیز در گازها 10^{18} و در مورد مایعات 10^{21} است [۲]. شکل (۳-۱) آرایش فضایی ملکول‌ها را در جامدات، مایعات و گازها نشان می‌دهد.

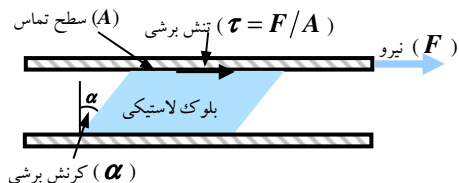


شکل ۳-۱ آرایش فضایی ملکول‌ها؛ الف) جامدات، ب) مایعات، ج) گازها [۳].

تفاوت بین جامدات و سیالات از دیدگاه توانایی مقاومت در برابر تنش‌های برشی یا مماسی اعمال شده بر آن که سعی در تغییر شکل ماده دارند نیز قابل بررسی است. جامدات می‌توانند با تغییر شکل تا حدی در مقابل تنش برشی اعمالی مقاومت کنند، در حالیکه سیالات تحت کوچک‌ترین تنش برشی یا مماسی اعمال شده به حرکت در آمده و به‌طور پیوسته تغییر شکل می‌دهند. در جامدات تنش برشی بر اساس قانون هوک با کرنش متناسب است، لیکن در سیالات تنش برشی با نرخ کرنش (تغییرات زمانی کرنش) متناسب است. برای مثال، هنگامی که نیروی برشی ثابتی بر جسم جامد اثر می‌کند، سرانجام تغییر شکل جسم به کرنش زاویه‌ای ثابت رسیده و متوقف می‌شود. لیکن تغییر شکل سیالات تحت نیروی برشی ثابت هرگز متوقف نشده و نهایتاً نرخ کرنش یا تغییرات زمانی کرنش به مقدار مشخصی می‌رسد.

شکل (۴-۱) یک بلوک لاستیکی را نشان می‌دهد که به‌طور محکم بین دو صفحه واقع شده است. صفحه‌ی بالایی توسط نیروی F کشیده می‌شود، در حالیکه صفحه‌ی پایینی ثابت نگاه داشته شده است. با اعمال نیرو، صفحه‌ی بالایی حرکت کرده و بلوک لاستیکی تغییر شکل می‌دهد. تغییر شکل زاویه‌ای α با نیروی F متناسب بوده و مقدار آن با افزایش نیرو، افزایش می‌یابد. با فرض اینکه هیچ لغزشی بین صفحه‌ی بالایی و بلوک لاستیکی وجود نداشته باشد، سطح بالایی بلوک لاستیکی به اندازه‌ی تغییر مکان صفحه‌ی بالایی جابه‌جا می‌شود و این در حالیست که صفحه‌ی پایینی ثابت است. نیروی اعمالی از طرف صفحه‌ی بالایی به بلوک لاستیکی با $F = \tau A$ بیان می‌شود که τ تنش برشی و A سطح تماس بین صفحه‌ی بالایی و بلوک لاستیکی است. لازم به ذکر است که در جامدات تا هنگامی که تغییر شکل‌ها در محدوده‌ی الاستیک باشد، با برداشتن نیرو تغییر شکل‌ها به حالت اولیه‌ی خود باز می‌گردند.

حال چنانچه همین آزمایش با سیال تکرار شود و سیال را بین دو صفحه‌ی موازی قرار داده و به صفحه‌ی بالایی نیروی وارد شود، صرف‌نظر از مقدار نیرو، سیال در سطح تماس صفحه‌ی بالایی به‌صورت پیوسته با سرعتی مساوی سرعت حرکت صفحه‌ی بالایی حرکت می‌کند. سرعت سیال نیز در مقطع در اثر اصطکاک بین لایه‌های مختلف سیال کاهش یافته و در روی صفحه‌ی پایینی به صفر می‌رسد.



شکل ۴-۱ تغییر شکل بلوک لاستیکی بین دو صفحه‌ی موازی در اثر نیروی برشی.

با توجه به کاربرد زیاد مفاهیم تنش برشی (مماسی) و تنش نرمال (قایم) در مکانیک سیالات، دانشجویان لازم است با این مفاهیم آشنا گردند و توصیه می‌شود مطالب درس مقاومت مصالح در این خصوص را مرور کنند. همان‌طور که در درس مقاومت مصالح بیان می‌شود، تنش، برابر نیرو در واحد سطح است و مقدار آن از تقسیم نیرو بر سطحی که در آن نیرو عمل می‌کند، به دست می‌آید. مؤلفه‌ی قایم نیرو در واحد سطح **تنش قایم**^۱ و مؤلفه‌ی مماسی نیرو در واحد سطح **تنش برشی**^۲ نامیده می‌شود، شکل (۱-۵). برای سیالات در حال سکون (تنش برشی صفر) تنش قایم، همان **فشار**^۳ نامیده می‌شود.

۴-۱-۱ اصل عدم لغزش سیال

با توجه به اینکه معمولاً سیالات با سطوح مرزی جامدی احاطه می‌شوند، لازم است تا اثرات سطوح جامد بر جریان سیال بررسی شود. همان‌گونه که مشخص است، جریان آب در رودخانه نمی‌تواند از درون سنگ‌های بزرگ بگذرد و به همین دلیل از اطراف آن عبور می‌کند. به بیان دیگر، سرعت سیال عمود بر سطح سنگ بایستی صفر باشد و جریان آب که به صورت عمودی بر سطح سنگ برخورد می‌کند کاملاً متوقف می‌شود. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که جریان آب با هر زاویه‌ی دیگری به سطح سنگ برخورد کند کاملاً متوقف می‌شود. بنابراین، سرعت مماسی جریان آب بر روی سطح سنگ صفر خواهد شد.

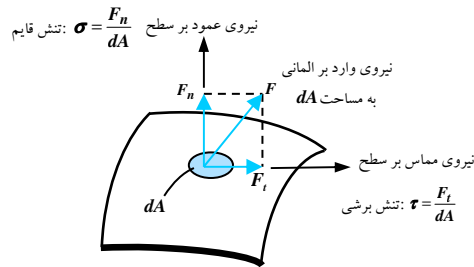
چنانچه جریان سیال درون یک لوله‌ی ساکن یا بر روی یک سطح جامد غیرمتخلخل در نظر گرفته شود، مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که سیال در حال حرکت بر روی سطح کاملاً متوقف شده و سرعت آن نسبت به سطح صفر است. لذا، سیال در تماس با سطح جامد به آن چسبیده و هیچ لغزشی وجود نخواهد داشت. این شرایط به نام **اصل عدم لغزش سیال**^۴ معروف است [۳].

شکل (۱-۶) نحوه‌ی شکل‌گیری گرادیان یا تغییرات سرعت در اثر چسبیدن سیال به یک صفحه را

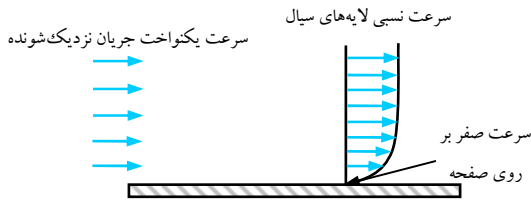
نشان می‌دهد.



نکته ۱-۱



شکل ۵-۱ تنش قایم و تنش برشی وارد بر سطح المان سیال.



شکل ۶-۱ جریان یکنواخت عبوری از روی صفحه و شکل‌گیری نقطه‌ای با سرعت صفر بر روی صفحه.

۱- Normal stress

۲- Shear stress

۳- Pressure

۴- No-slip condition

لایه‌ای که به سطح صفحه می‌چسبد، حرکت لایه‌ی سیال مجاور آن را در اثر نیروهای اصطکاکی بین لایه‌ها (نیروی لزجت) کند کرده و این فرایند بین لایه‌های دیگر نیز ادامه می‌یابد. نتیجه‌ی اصل عدم لغزش سیال این است که سرعت نسبی سیال در نقطه‌ی تماس سیال با سطح جامد صفر است. بنابراین، اصل عدم لغزش سیال باعث شکل‌گیری توزیع سرعت می‌شود.

۵-۱-۱ مواردی از کاربرد مکانیک سیالات

مکانیک سیالات کاربرد وسیعی در زندگی روزمره و در طراحی سیستم‌های مدرن مهندسی از جاروی برقی تا هواپیماهای با سرعت مافوق صوت دارد. برای مثال، مکانیک سیالات نقش مهمی را در بدن انسان نیز ایفا می‌کند. قلب انسان به‌صورت پیوسته خون را به طرف اندام‌ها پمپاژ کرده و شش‌ها مکانی در بدن انسان است که در آن جریان هوا وجود دارد. شبیه‌سازی عملکرد قلب و شش‌ها به‌وسیله‌ی علم مکانیک سیالات در ساختن قلب‌های مصنوعی، سیستم‌های تنفسی و دیالیز متبلور می‌شود.

نگاهی به وسایل اطراف خود در خانه نیز نشان‌دهنده‌ی کاربرد مکانیک سیالات است. سیستم لوله‌کشی آب، گاز و فاضلاب و سیستم تهویه‌ی هوا در منزل و در کل شهر بر پایه‌ی علم مکانیک سیالات بنا شده است. یخچال‌ها و فریزرها سیستم‌هایی هستند که دارای سیستم لوله‌ها و کمپرسورهایی برای فشرده‌سازی هوای سرد بوده و بر اساس علم مکانیک سیالات طراحی شده‌اند [۳].

در ماشین سواری نیز کلیه‌ی مراحل انتقال سوخت از تانک ذخیره به سیلندرها و اختلاط سوخت و هوا در درون سیلندرها بر اساس علم مکانیک سیالات صورت می‌گیرد. همچنین، علم مکانیک سیالات در طراحی سیستم‌های گرمایشی و تهویه، ترمزهای هیدرولیکی، فرمان خودکار، سیستم‌های روغن‌کاری و خنک‌کننده‌ی موتور، رادیاتورها و پمپ‌های آب نقش به‌سزایی دارد.

در یک طیف وسیع‌تر، مکانیک سیالات نقش مهمی در طراحی و تحلیل هواپیماها، قایق‌ها و کشتی‌ها، زیردریایی‌ها، موشک‌ها، موتورهای جت، توربین‌های بادی، سیستم‌های خنک‌کننده‌ی اجزای الکترونیکی و سیستم‌های انتقال آب، نفت خام و گاز طبیعی دارد. مکانیک سیالات در طراحی ساختمان‌ها (به‌خصوص سوله‌ها)، پل‌ها و حتی تابلوهای تبلیغاتی (در برابر نیروی باد) کاربرد فراوانی دارد. پدیده‌های طبیعی متنوع دیگری مانند چرخه‌ی باران، الگوهای آب و هوا، بالارفتن آب زیرزمینی به بالای درختان، جریان باد و امواج اقیانوس‌ها همگی توسط مفاهیم مکانیک سیالات قابل توجیه هستند. مواردی از کاربرد مکانیک سیالات در شکل (۷-۱) دیده می‌شود.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۷-۱ مواردی از کاربرد مکانیک سیالات؛ الف) کشتی‌ها، ب) توربین‌های بادی، ج) بدن انسان.

۱-۲ طبقه‌بندی جریان سیال

همان‌طور که قبلاً بیان شد، مکانیک سیالات علمی است که در آن رفتار سیال در حال حرکت یا سکون و اندرکنش سیال با جامدات یا سیالات دیگر بررسی می‌شود. در عمل، انسان با طیف وسیعی از مسایل مکانیک سیالات مواجه می‌باشد و بهتر است این مسایل با توجه به برخی ویژگی‌های معمول آنها دسته‌بندی شوند تا مطالعات آنها بهتر انجام شود. با توجه به تقسیم‌بندی‌های مختلفی که برای مسایل مربوط به سیالات وجود دارد، لازم است که فقط به برخی از مهم‌ترین تقسیم‌بندی‌ها در زیر اشاره شود.

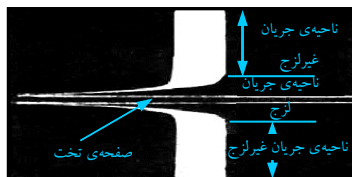
۱-۲-۱ نواحی جریان لزج و غیرلزج

هنگامی که دو لایه از سیال کنار هم، نسبت به همدیگر حرکت می‌کنند، نیروی اصطکاکی بین آنها شکل می‌گیرد و لایه‌های کندتر سعی در کاهش سرعت لایه‌های سریع‌تر دارند. مقدار مقاومت داخلی جریان به ویژگی از سیال به نام **لزجت**^۱ که در بردارنده‌ی چسبندگی داخلی سیال است، وابسته است. لزجت به‌خاطر نیروهای چسبندگی بین ملکولی در مایعات و میزان برخورد‌ها در گازها ایجاد می‌شود. لازم به ذکر است که در طبیعت هیچ سیالی با لزجت صفر وجود ندارد. جریان‌هایی که در آنها اثرات اصطکاکی قابل توجه هستند به نام **جریان‌های لزج**^۲ نامیده می‌شوند. در بسیاری از جریان‌هایی که به لحاظ عملی مورد توجه هستند، ناحیه‌هایی دور از مرز جامد وجود دارد که نیروهای ناشی از لزجت در مقایسه با نیروی اینرسی یا نیروهای فشاری قابل صرف‌نظر کردن هستند. صرف‌نظر کردن از لزجت در **نواحی غیرلزج جریان**^۳، آنالیز سیال را با دقت مناسبی آسان‌تر می‌کند [۳].

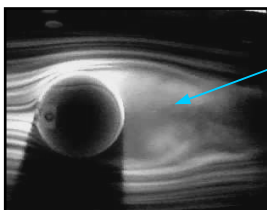
در شکل (۱-۸) مشاهده‌ی نواحی لزج و غیرلزج جریان در اثر قرارگیری یک صفحه‌ی تخت به موازات جریان سیال، با تکنیک تزریق حباب‌های هیدروژن نشان داده شده است. سیال در اثر خاصیت عدم لغزش سیال به هر دو طرف صفحه می‌چسبد و لایه‌ی مرزی نازکی نزدیک به صفحه به نام ناحیه‌ی جریان لزج شکل می‌گیرد که در آن اثرات لزجت قابل ملاحظه است. نواحی دیگر از دو طرف صفحه که دورتر از صفحه قرار دارند و تحت تأثیر صفحه نمی‌باشند، نواحی جریان غیر لزج هستند.

۱-۲-۲ جریان‌های داخلی و خارجی

بسته به اینکه سیال، درون یک فضای محصور و بسته یا بر روی سطح، جریان داشته باشد، جریان‌ها به دو دسته **جریان داخلی**^۴ و **جریان خارجی**^۵ تقسیم‌بندی می‌شوند. برای مثال، جریان عبوری از اطراف یک ساختمان جزو جریان خارجی و جریان درون لوله در صورتی که سیال کاملاً توسط سطح داخلی لوله احاطه شده باشد، جریان داخلی محسوب می‌شود [۳].



شکل ۱-۸ نواحی جریان‌های لزج و غیرلزج هنگام عبور جریان از روی یک صفحه‌ی موازی جریان [۳].



ناحیه دنباله‌ای

شکل ۹-۱ جریان خارجی بر روی توپ تنیس و تشکیل دنباله در ادامه‌ی آن.

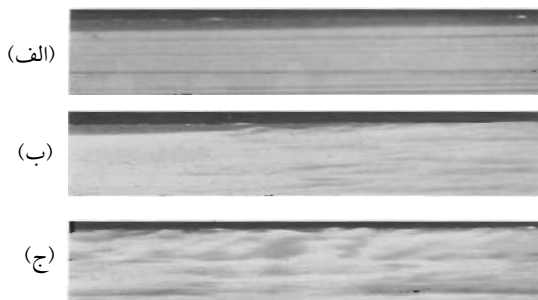
در مثال دیگر، جریان هوا بر روی یک توپ تنیس، جریان خارجی به شمار می‌آید، شکل (۹-۱). همان‌طوری که در شکل (۹-۱) نشان داده شده است، در جریان خارجی، اثرات لزجت به لایه‌ی مرزی نزدیک سطح جامد و به ناحیه‌ی دنباله‌ای^۱ در پایین دست جسم محدود می‌شود، لیکن جریان‌های داخلی تحت تأثیر لزجت در میدان جریان هستند.

۱-۲-۳ جریان‌های آرام و آشفته

برخی جریان‌ها کاملاً صاف و به صورت منظم بوده و جریان از لایه‌ای به لایه‌ای دیگر منتقل نمی‌شود، در حالی که برخی دیگر کاملاً نامنظم است. حرکت بسیار منظم سیال که به صورت لایه‌های صاف و موازی ک ۲-۱ همدیگر هستند، به نام **جریان آرام**^۲ نامیده می‌شود، شکل (۱-۱۰-الف). این نوع جریان در سیالاتی با لزجت زیاد مانند روغن و در سرعت‌های بسیار پایین مشاهده می‌شود. شکل (۱-۱۰-ج) نیز حرکتی از سیال را نشان می‌دهد که با بی‌نظمی زیاد (معمولاً در سرعت‌های بالا) و همواره با نوسانات سرعت همراه است. این نوع جریان، **جریان آشفته**^۳ نامیده می‌شود. جریان سیالاتی با لزجت کم (مانند هوا) در سرعت‌های بالا معمولاً آشفته است. حالت بینابینی دیگری نیز به نام حالت **انتقالی**^۴ وجود دارد که در عمل به ندرت اتفاق می‌افتد، شکل (۱-۱۰-ب). مطالعات آزمایشگاهی توسط **آزبرن رینولدز**^۵ در سال ۱۸۸۰ منجر به معرفی یک کمیت بی بعد به نام **عدد رینولدز**^۶ برای تشخیص آرام بودن یا آشفته بودن جریان شد. شرح عدد رینولدز در فصل ۶ به تفصیل آمده است.

۱-۲-۴ جریان‌های یک، دو و سه‌بعدی

مهم‌ترین ویژگی جریان سیال میدان سرعت است، لذا یک یا چند بعد بودن جریان سیال با توجه به توزیع سرعت آن معلوم می‌شود. در اکثر موارد جریان سیال سه‌بعدی و بسیار پیچیده است، اما با اعمال فرضیاتی



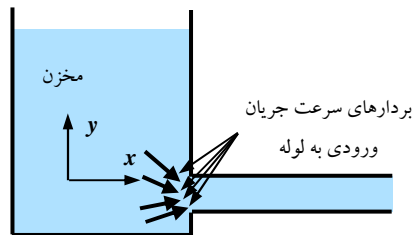
شکل ۱۰-۱ انواع جریان؛ الف) جریان آرام، ب) جریان انتقالی، ج) جریان آشفته.

۱- Wake region ۲- Laminar flow ۳- Turbulent flow ۴- Transitional ۵- Osborne Reynolds ۶- Reynolds number

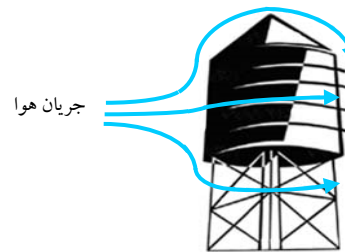
می‌توان این جریان را دوبعدی و حتی یک‌بعدی در نظر گرفت و به نتایجی با دقت کافی دست یافت. به جریانی سه‌بعدی^۱ گفته می‌شود که مؤلفه‌های سرعت آن در سه بعد دارای مقدار باشد. این جریان در دستگاه مختصات کارتزین به صورت $\vec{V}(x, y, z, t)$ بیان می‌گردد. برای مثال، در شکل (۱-۱۱) می‌توان جریان هوایی را که از اطراف منبع هوایی ذخیره‌ی آب عبور می‌کند به عنوان جریان سه‌بعدی در نظر گرفت. هوا پس از برخورد به سطوح منبع در سه جهت شتاب گرفته و آن را از بالا، اطراف و پایین دور می‌زند. لازم به ذکر است که زمان به عنوان بعد در نظر گرفته نمی‌شود.

اگر یکی از مؤلفه‌های سرعت در مقایسه با دیگر مؤلفه‌ها ناچیز باشد و بتوان از آن مؤلفه صرف‌نظر کرد، جریان دوبعدی^۲ فرض می‌گردد. برای مثال، اگر مؤلفه‌ی سرعت در جهت z ناچیز باشد، بردار سرعت برابر با $\vec{V}(x, y, t)$ در دستگاه مختصات کارتزین است. شکل (۱-۱۲) جریان ورودی آب را از مخزن به لوله نشان می‌دهد. سرعت آب در حوالی ناحیه‌ی ورودی به لوله دو مؤلفه‌ی u و v به ترتیب در جهت‌های x و y دارد و در جهت عمود بر حرکت آب، تغییرات سرعت ناچیز است. بنابراین، بررسی جریان از مخزن به لوله را می‌توان به صورت دوبعدی در نظر گرفت.

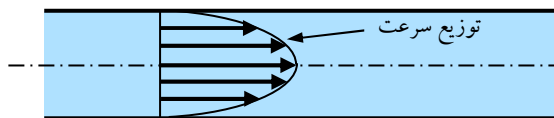
جریان یک‌بعدی^۳ دارای یک مؤلفه‌ی سرعت است و دو مؤلفه‌ی دیگر آن ناچیز فرض می‌شود. برای مثال، جریان آب داخل یک لوله در شکل (۱-۱۳) جریان یک‌بعدی فرض می‌شود. اگرچه جریان یک‌بعدی در طبیعت به ندرت یافت می‌شود، اما در بسیاری از مسایل مکانیک سیالات، جریان، یک‌بعدی در نظر گرفته می‌شود، زیرا تحلیل این جریان به مراتب ساده‌تر از جریان‌های دو و سه‌بعدی است.



شکل ۱-۱۲ جریان دوبعدی، ورود آب از مخزن به لوله.



شکل ۱-۱۱ جریان هوای سه‌بعدی در هنگام عبور از منبع آب هوایی.



شکل ۱-۱۳ جریان فرضی یک‌بعدی آب در لوله.

۵-۲-۱ جریان یکنواخت و جریان پایدار

در مکانیک سیالات با مسائلی روبه‌رو می‌شویم که در آن‌ها تغییرات مکانی و زمانی ویژگی‌های سیال وجود دارد. اگر ویژگی‌های سیال در یک زمان خاص در قلمروی مورد بررسی نسبت به مکان تغییراتی نداشته باشد، **جریان یکنواخت**^۱ برقرار است. در غیر این صورت، **جریان غیریکنواخت**^۲ است. در جریان یکنواخت، گرادیان ویژگی سیال $\nabla(\cdot) = 0$ است. ∇ عملگر گرادیان^۳ است که در دستگاه مختصات کارتزین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\nabla = \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial(\cdot)}{\partial z} \hat{k} \quad (1-1)$$

اگر ویژگی‌های سیال در یک نقطه نسبت به زمان تغییر نکنند، **جریان پایدار**^۴ است، $\partial(\cdot)/\partial t = 0$. در غیر این صورت، **جریان ناپایدار**^۵ است. در حقیقت، هیچ‌گونه تغییرات مکانی در جریان یکنواخت و تغییرات زمانی در جریان پایدار وجود ندارد. با این تقسیم‌بندی، چهار حالت زیر قابل توجه است:



ک ۴-۱

۱. جریان پایدار یکنواخت: ویژگی‌های سیال نسبت به مکان و زمان تغییراتی ندارد. برای مثال، وزش باد را در فاصله‌ای دور از سطح زمین با سرعت ثابت در نظر بگیرید. در این حالت، سرعت در تمام قلمروی مورد بررسی یکنواخت است و نسبت به زمان تغییری نمی‌کند.

۲. جریان پایدار غیریکنواخت: ویژگی‌های سیال نسبت به زمان ثابت است، اما تغییرات مکانی وجود دارد. جریان آب در لوله از این‌گونه جریان است. در یک مقطع از جریان، سرعت آب در جداره‌ی لوله صفر و در مرکز حداکثر است و لذا تغییرات مکانی وجود دارد. اما، تغییرات زمانی وجود ندارد.

۳. جریان ناپایدار یکنواخت: ویژگی‌های سیال نسبت به مکان ثابت است، اما تغییرات زمانی وجود دارد. مثالی از این‌گونه جریان‌ها جریان آب خروجی از یک روزنه است که در کف یک مخزن قرار دارد. سرعت آب خروجی دارای توزیع یکنواخت است. چون به مرور زمان از ارتفاع آب در مخزن کاسته می‌شود، مقدار سرعت کم شده و لذا تغییرات زمانی سرعت اتفاق خواهد افتاد.

۴. جریان ناپایدار غیریکنواخت: ویژگی‌های سیال نسبت به مکان و زمان متغیر است. موج دریا که به ساحل نزدیک می‌شود مثال خوبی از این‌گونه جریان‌ها است. پروفیل سرعت موج غیریکنواخت است و با رسیدن موج به ساحل سرعت آن کم می‌شود.

لازم به ذکر است که در اکثر مسائل مکانیک سیالات، در یک بازه‌ی زمانی طولانی جریان سیال شبیه حالت چهارم است و ناپایداری و غیریکنواختی جریان وجود دارد. اما، در یک بازه‌ی زمانی کوتاه جریان را می‌توان پایدار در نظر گرفت و یا با اعمال تکنیک‌های خاص می‌توان جریان را یکنواخت فرض کرد، زیرا تحلیل جریان‌های پایدار و یکنواخت آسان‌تر است.

م سایل ۱-۱
الی ۴-۱

۳-۱ واحدهای اندازه‌گیری و همگنی رابطه‌ها بر اساس ابعاد

۱-۳-۱ سیستم واحدهای اندازه‌گیری

هر کمیت فیزیکی می‌تواند در قالب ابعاد^۱ بیان شود. اندازه‌ی اختصاص داده شده به ابعاد، واحدها^۲ نامیده می‌شوند. بعضی از ابعاد پایه مانند جرم (M)، طول (L)، زمان (T) و دما (θ) به‌عنوان ابعاد اصلی^۳ یا بنیادی^۴ و بقیه‌ی ابعاد مانند سرعت (V)، انرژی (E) و حجم (∇) که در قالب ابعاد اصلی بیان می‌شوند، ابعاد ثانویه^۵ یا مشتق‌شده^۶ نامیده می‌شوند.

ابعاد ثانویه می‌توانند در قالب ابعاد اصلی بیان شوند. برای مثال، حجم می‌تواند به‌صورت^۳ L^3 مساحت به‌صورت^۲ L^2 سرعت به‌صورت^۱ LT^{-1} و چگالی به‌صورت^۳ ML^{-3} بیان شوند. در بسیاری از مسایل مکانیک سیالات تنها پارامترهای سه‌گانه‌ی L ، M و T مورد نیاز است. لیکن در برخی مراجع به‌جای M از بعد نیرو F برای بیان پارامترهای ثانویه استفاده می‌شود. طبق قانون دوم نیوتن^۲ $M \equiv F LT^{-2}$ است و بنابراین $FL^{-2} \equiv M^1 T^2$ است. علامت \equiv معرف بعد است. برای مثال می‌توان کمیت ثانویه‌ی تنش σ را که به‌صورت نیرو در واحد سطح تعریف می‌شود، به دو صورت^۲ $\sigma FL^{-2} \equiv$ و $\sigma ML^{-1} T^{-2} \equiv$ در قالب ابعاد اصلی بیان کرد. جدول (۱-۱) کمیت‌های فیزیکی معمول را در دو سیستم MLT و FLT نشان می‌دهد.

با وجود اینکه دانشمندان و محققان تلاش‌های زیادی را برای یکسان‌سازی و معرفی واحد جهانی کرده‌اند، لیکن هنوز دو سیستم ابعادی به‌طور معمول استفاده می‌شود، سیستم انگلیسی^۷ (BG) و سیستم متریک^۸ (SI). سیستم متریک یک سیستم ساده و منطقی همراه با روابط اعشاری بین واحدهای مختلف است که هم‌اکنون در اکثر کشورهای صنعتی حتی کانادا نیز استفاده می‌شود. سیستم انگلیسی دارای پایه‌ی عددی سیستماتیکی نبوده و ابعاد مختلف با تبدیل‌هایی از جمله $1 \text{ ft} = 12 \text{ in}$ ، $1 \text{ ft} = 5280 \text{ ft}$ (که گاه برای یادگیری مشکل است، به‌همدیگر مربوط هستند. جدول‌های (پ-۱) و (پ-۲) پیوست، برای تبدیل واحدها از دو سیستم به‌همدیگر برای متغیرهای معمول به‌کار می‌روند.

م سایل ۱-۵
و ۱-۶

تلاش برای توسعه‌ی یک سیستم واحد جهانی به سال ۱۷۹۰ میلادی برمی‌گردد و این مربوط به زمانی است که مجامع علمی دانشگاه‌های فرانسه سیستم واحد را پیشنهاد کردند. بعد از آن، خیلی سریع نسخه‌ی اولیه‌ی سیستم متریک در این کشور توسعه یافت، لیکن نتوانست تا سال ۱۸۷۵ مجوز بین‌المللی را دریافت کند. در این سال، ۱۷ کشور در قالب تفاهم‌نامه‌ی متریک قراردادی را امضاء کردند که در آن متر و گرم به‌عنوان واحدهای طول و جرم مورد توافق قرار گرفت و قرار شد گردهمایی‌ای تحت عنوان وزن و اندازه‌گیری هر شش سال یک‌بار تشکیل شود. در سال ۱۹۶۰، این گردهمایی سیستم متریک را معرفی کرد که در این کتاب از این سیستم استفاده شده است. سیستم متریک دارای شش کمیت اصلی کیلوگرم^۹ برای جرم، متر^{۱۰} برای طول، ثانیه^{۱۱} برای زمان، درجه‌ی کلوین^{۱۲} برای دما، آمپر^{۱۳} برای جریان الکتریکی و

۱- Dimensions ۲- Units ۳- Primary ۴- Fundamental ۵- Secondary ۶- Derived ۷- British
gravitational system ۸- International system ۹- Kilogram ۱۰- Meter ۱۱- Second ۱۲- Kelvin ۱۳- Ampere

جدول ۱-۱ ابعاد اختصاص داده شده به کمیت‌های معمول.

سیستم FLT	سیستم MLT	کمیت
FL	MLT^{-2}	انرژی
FLT^{-1}	MLT^{-3}	توان
$FL^{-1}T^2$	M	جرم
L^3	L^3	حجم
$FL^{-1}T^2$	ML^{-2}	چگالی
LT^{-1}	LT^{-1}	سرعت
LT^{-2}	LT^{-2}	شتاب
FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$	فشار
FL	MLT^{-2}	کار
FL^{-1}	MT^{-2}	کشش سطحی
FL	MLT^{-2}	گشتاور
FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$	مدول الاستیسیته
FLT^2	ML	ممان اینرسی
FT	MLT^{-1}	اندازه حرکت
F	MLT^{-2}	نیرو
FL^{-2}	$ML^{-1}T^{-2}$	وزن مخصوص
$FL^{-1}T$	$ML^{-1}T^{-1}$	لزجت دینامیکی
LT^{-1}	LT^{-1}	لزجت سینماتیکی

کاندلا^۱ برای شدت روشنایی بود. در سال ۱۹۷۱، کمیت هفتم نیز با عنوان مول^۲ برای مقدار مواد به کمیت‌های اصلی افزوده شد [۳]. پیشنهادهایی در سیستم متریک معرفی شده که در جدول (۱-۲) آمده است و لازم است خوانندگان این پیشنهادها را به سبب استفاده‌ی زیاد از آن‌ها به خاطر بسپارند. واحد نیرو، F ، نیز به عنوان یک کمیت ثانویه از قانون دوم نیوتن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$F = ma \quad (1-2)$$

که در آن m جرم و a شتاب است. در سیستم متریک، واحد نیرو بر حسب نیوتن^۳ است و یک نیوتن نیرویی است که به ۱ کیلوگرم جسم، شتابی معادل ۱ متر بر مجذور ثانیه می‌دهد. عبارت وزن^۴ اغلب به اشتباه به جای واژه‌ی جرم به کار می‌رود. لازم به ذکر است که وزن بر خلاف جرم از جنس نیرو است. وزن، W ، همان نیروی جاذبه‌ی زمین (ثقل) است که به جسم اعمال می‌شود و اندازه‌ی آن از رابطه‌ای که بر اساس قانون دوم نیوتن بنا شده، به صورت رابطه‌ی (۱-۳) به دست می‌آید:

جدول ۲-۱ پیشوندهای مورد استفاده در سیستم متریک.

پیشوند	ضرب شود در	پیشوند	ضرب شود در	پیشوند	ضرب شود در
tetra, T	10^{12}	hecto, h	10^2	mili, m	10^{-3}
giga, G	10^9	deka, da	10^1	micro, μ	10^{-6}
mega, M	10^6	deci, d	10^{-1}	nano, n	10^{-9}
kilo, K	10^3	centi, c	10^{-2}	pico, p	10^{-12}

۱- Candela

۲- Mole

۳- Newton

۴- Weight

$$W = mg$$

(۱-۳)

که در آن g شتاب ثقل^۱ محلی است. مقدار g برابر $۹/۸۰۷$ یا $۹/۸۱$ متر بر مجذور ثانیه است.

جرم جسم در همه جا و صرف نظر از مکان قرارگیری جسم ثابت است، لیکن وزن آن با تغییرات شتاب ثقل از جایی به جای دیگر تغییر می‌کند. برای مثال، وزن در بالای ارتفاعات با توجه به کاهش شتاب ثقل، کاهش می‌یابد و در سطح کره‌ی ماه، وزن فضاوردان یک ششم وزن آنها بر روی زمین است. در کنار دریا، جرم ۱ کیلوگرم وزنی معادل $۹/۸۰۷$ نیوتن دارد. لازم به ذکر است که مقدار شتاب ثقل از $۹/۸۲۹۵$ متر بر مجذور ثانیه در تراز ۴۵۰۰ متری پایین‌تر از سطح دریا تا $۷/۳۲۱۸$ متر بر مجذور ثانیه در ارتفاع ۱۰۰۰۰۰ متری بالای تراز سطح دریا تغییر می‌کند. چون تغییرات g در ارتفاع بیشتر از ۳۰۰۰۰ متری از سطح دریا نسبت به مقدار آن در سطح دریا ($۹/۸۰۷$ متر بر مجذور ثانیه) کمتر از ۱ درصد است، در عمل می‌توان شتاب ثقل را مقداری ثابت و برابر $۹/۸۱$ متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفت. جالب است که تغییرات g پایین‌تر از سطح دریا با افزایش عمق، افزایش یافته و در عمق ۴۵۰۰ متری به حداکثر مقدار خود می‌رسد، و سپس با افزایش مجدد عمق مقدار آن کاهش می‌یابد [۳].

کار نیز که شکلی از انرژی است می‌تواند به صورت حاصل ضرب نیرو در فاصله بیان شود و واحد آن نیوتن-متر است که نام دیگر آن ژول^۲ است. در سیستم متریک مقدار انرژی لازم برای بالا بردن دمای ۱ گرم آب $۱۴/۵$ درجه سانتی‌گراد به اندازه‌ی ۱ درجه سانتی‌گراد، یک کالری^۳ نامیده می‌شود و ۱ کالری معادل $۴/۱۸۶۸$ ژول است.

۲-۳-۱ همگنی و ناهمگنی رابطه‌ها

تمام رابطه‌های تحلیلی از نظر ابعادی همگن^۴ هستند. یعنی ابعاد عبارات طرف راست تساوی با ابعاد عبارات طرف چپ آن برابر است. همچنین، عبارات مشابه که قرار است با هم جمع یا از هم تفریق شوند از ابعاد یکسانی برخوردار هستند. به عنوان یک قانون کلی، تمامی رابطه‌های تشریح‌کننده‌ی پدیده‌های فیزیکی بایستی به لحاظ ابعادی همگن باشند. برای مثال، رابطه‌ی سرعت V برای جسمی با شتاب ثابت مطابق رابطه‌ی زیر است:

$$V = V_0 + at \quad (1-4)$$

که در آن V_0 سرعت اولیه و t بازه‌ی زمانی است. چنانچه ابعاد پارامترهای رابطه‌ی (۱-۴) از جدول (۱-۱) جایگزین شود، رابطه‌ی (۱-۴) به صورت زیر در می‌آید:

$$LT^{-1} \doteq LT^{-1} + LT^{-1} \doteq LT^{-1} \quad (1-5)$$

بنابراین رابطه‌ی (۱-۴) به لحاظ ابعادی همگن است، زیرا کمیت‌هایی که در حال جمع شدن هستند دارای بعد یکسان هستند و در هر دو طرف تساوی، ابعاد یکسانی وجود دارد.

۱- Gravitational acceleration

۲- Joule

۳- Calorie

۴- Dimensionally homogeneous

در برخی رابطه‌ها ضرایبی وجود دارد که بعددار هستند. برای مثال، رابطه‌ی فاصله بر حسب زمان برای جسم در حال سقوط آزاد به صورت زیر می‌باشد:

$$d = 4.9t^2 \quad (1-6)$$

جایگزینی ابعاد در رابطه‌ی (۱-۶) نشان می‌دهد که چنانچه رابطه همگن باشد، بایستی ضریب ثابت دارای بعد LT^{-2} باشد. البته حقیقتاً رابطه‌ی (۱-۶) شکل خاصی از رابطه‌ای معروف در فیزیک برای سقوط آزاد اجسام است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d = \frac{1}{2}gt^2 \quad (1-7)$$

رابطه‌ی (۱-۷) رابطه‌ای همگن است که در هر سیستم ابعادی معتبر است. برای $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ رابطه‌ی (۱-۷) به رابطه‌ی (۱-۶) تبدیل می‌شود. بنابراین، رابطه‌ی (۱-۶) تنها در سیستم متریک معتبر است. آن دسته از رابطه‌های همگن که محدود به یک سیستم واحد به خصوص باشد، به عنوان رابطه‌های همگن محدود^۱ شناخته می‌شوند.

مثال ۱-۱: تشخیص همگنی یا ناهمگنی رابطه بر اساس ابعاد.

رابطه‌ی زیر برای تعیین میزان یا نرخ حجم جریان (Q) مایع عبوری از یک روزنه استفاده می‌شود:

$$Q = 0.61A\sqrt{2gh}$$

که در آن A سطح مقطع روزنه، g شتاب ثقل و h ارتفاع مایع بالای روزنه است. مشخص کنید آیا این رابطه به لحاظ ابعادی همگن است؟

پاسخ:

با استفاده از جدول (۱-۱) ابعاد ترم‌های مختلف در رابطه‌ی داده شده به صورت زیر درمی‌آید:

$$Q \doteq L^3T^{-1} \quad ; \quad A \doteq L^2 \quad ; \quad g \doteq LT^{-2} \quad ; \quad h \doteq L$$

جایگزینی این ترم‌ها در رابطه، به صورت زیر است:

$$(L^3T^{-1}) \doteq (0.61)(L^2)(\sqrt{2})(LT^{-2})^{1/2}(L)^{1/2}$$

پس از ساده‌سازی خواهیم داشت:

$$(L^3T^{-1}) \doteq [(0.61)\sqrt{2}](L^3T^{-1}) \doteq L^3T^{-1}$$

با توجه به رابطه‌ی بالا مشخص است که این رابطه به لحاظ ابعادی همگن است، زیرا در دو طرف تساوی ابعاد یکسان است. همچنین، اعداد ۰/۶۱ و $\sqrt{2}$ بدون بعد هستند. اگر در رابطه‌ی داده شده، به جای g از مقدار آن در سیستم متریک استفاده شود (۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه)، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

۱- Restricted homogeneous

$$Q = 2.70A\sqrt{h}$$

با جایگزینی ابعاد در این رابطه موضوع بررسی می‌شود:

$$(L^3T^{-1}) \doteq (2.70)(L^{5/2})$$

بنابراین، برای اینکه این رابطه همگن باشد، ثابت معادله بایستی دارای بعد $L^{1/2}T^{-1}$ باشد. رابطه به شکل بالا یک رابطه‌ی همگن محدود است که تنها در سیستم متریک معتبر است.

م سایل ۷-۱
الی ۲۱-۱

۴-۱ ویژگی‌های سیال

تمامی قوانین فیزیک و دیگر شاخه‌های مکانیک به صورت مشابه در مکانیک سیالات نیز استفاده می‌شود. این قانون‌ها شامل قانون‌های نیوتن، اصل بقاء جرم و قانون‌های اول و دوم ترمودینامیک است. قبل از پرداختن به قانون‌های حاکم بر رفتار سیالات لازم است تا خواص و ویژگی‌های آنها بررسی شود. سیالات مختلف ویژگی‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. برای مثال، گازها تراکم‌پذیر هستند، در حالی که مایعات، سنگین و غیرقابل تراکم می‌باشند. چنانچه ظرف محتوی شربت یا آب وارونه شود، شربت به آرامی جریان یافته، در صورتی که آب به سرعت از درون ظرف خارج می‌شود. در ادامه برخی از خصوصیات سیال که نقش مهمی در آنالیز رفتار سیال ایفا می‌کنند، بررسی می‌شود. هر مشخصه از سیستم، ویژگی^۱ یا خاصیت^۲ نامیده می‌شود. خواص و ویژگی‌های سیالات به دو دسته‌ی ویژگی متمرکز^۳ و ویژگی جامع^۴ تقسیم می‌شوند. ویژگی متمرکز به آن دسته از ویژگی‌ها گفته می‌شود که مستقل از جرم است. دما، فشار و کشش سطحی نمونه‌هایی از ویژگی‌های متمرکز هستند. ویژگی جامع نیز ویژگی‌ای است که مقدار آن وابسته به جرم است. جرم کل، حجم کل و اندازه حرکت مثال‌هایی از ویژگی جامع هستند.

۴-۱-۱ معیار سنگینی

چگالی

چگالی یکی از ویژگی‌های سیال است که به صورت جرم در واحد حجم و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-8)$$

بعد چگالی ML^{-3} و واحد آن در سیستم متریک kg/m^3 است. بنا به تعریف، حجم مخصوص^۵ برابر حجم در واحد جرم است. لذا، حجم مخصوص عکس چگالی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

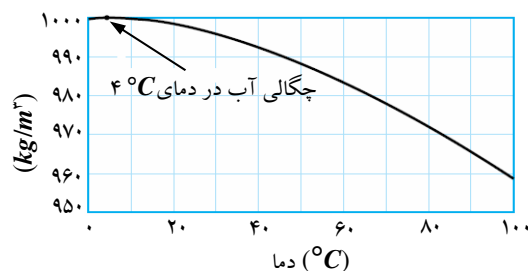
$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-9)$$

چگالی یک ماده به دما و فشار وابسته است. با توجه به اینکه مایعات و جامدات موادی تراکم‌ناپذیر محسوب می‌شوند، معمولاً از تغییرات چگالی با فشار صرف نظر می‌شود. برای مثال، در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، با تغییرات فشار از ۱ اتمسفر به ۱۰۰ اتمسفر، چگالی آب از $998 kg/m^3$ به $1003 kg/m^3$ تغییر

می‌کند که حدود ۰/۵ درصد است. تغییرات چگالی در جامدات و مایعات بیشتر تحت تأثیر تغییرات دما است تا فشار. برای مثال، در فشار ۱ اتمسفر، چگالی آب از 998 kg/m^3 در دمای 20°C به 975 kg/m^3 در دمای 75°C تغییر می‌کند که این تغییر حدود ۲/۳ درصد است [۳]. تغییرات چگالی آب نسبت به دما در شکل (۱۴-۱) آمده است. در مورد بیشتر گازها، چگالی نسبت مستقیم با فشار و نسبت معکوس با دما دارد. چگالی تعدادی از سیالات در جدول (۱-۳) آورده شده است. همچنین، چگالی آب در دماهای متفاوت و دیگر ویژگی‌های آن در جدول (پ-۳) پیوست داده شده است.

چگالی نسبی

گاهی اوقات، چگالی ماده نسبت به چگالی یک ماده‌ی مشخص بیان می‌شود.



شکل ۱۴-۱ تغییرات چگالی آب برحسب دما.

جدول ۱-۳ معیار سنگینی تعدادی از سیالات.

ماده	دما ($^\circ\text{C}$)	چگالی (ρ) (kg/m^3)	چگالی نسبی (SG)	وزن مخصوص (kN/m^3)
آب	۱۵/۶	۹۹۹	۰/۹۹۹	۹/۸۰
خون	۳۷	۱۰۶۰	۱/۰۶۰	۱۰/۴۰
آب دریا	۱۵/۶	۱۰۳۰	۱/۰۳۰	۱۰/۱
گلیسرین	۲۰	۱۲۶۰	۱/۲۶۰	۱۲/۴
الکل اتیلیک	۲۰	۷۸۹	۰/۷۸۹	۷/۷۴
جیوه	۲۰	۱۳۶۰۰	۱۳/۶۰	۱۳۳
بنزین	۱۵/۶	۶۸۰	۰/۶۸۰	۶/۶۷
روغن SAE ۳۰	۱۵/۶	۹۱۲	۰/۹۱۲	۱۵/۶
هوا	۱۵	۱/۲۳	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲
دی‌اکسید کربن	۲۰	۱/۸۳	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸
هلیوم	۲۰	۰/۱۶۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۶
هیدروژن	۲۰	۰/۰۸۳۸	۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۸۲
متان (گاز طبیعی)	۲۰	۰/۶۶۷	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰۶۵
اکسیژن	۲۰	۱/۳۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳

در این صورت به آن **ثقل مخصوص**^۱ یا **چگالی نسبی**^۲ گفته می‌شود. چگالی نسبی، نسبت چگالی ماده به چگالی یک ماده‌ی استاندارد در دمای مشخص است. ماده‌ی استاندارد معمولاً آب ۴ درجه سانتی‌گراد است: ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$)

$$SG = \frac{\rho}{\rho_w @ 4^\circ C} \quad (1-10)$$

توجه کنید که چگالی نسبی یک پارامتر بی‌بعد است. برای جیوه که چگالی آن در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر 13600 kg/m^3 است، چگالی نسبی آن $13/6$ می‌شود. توجه شود که موادی با چگالی نسبی کمتر از ۱ سبک‌تر از آب بوده و بر روی آب شناور می‌شوند. چگالی نسبی تعدادی از سیالات در جدول (۱-۳) آورده شده است.

وزن مخصوص

وزن واحد حجم یک ماده **وزن مخصوص**^۳ نامیده می‌شود. بعد وزن مخصوص FL^{-3} و واحد آن در دستگاه متریک N/m^3 است و مقدار آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\gamma = \rho g \quad (1-11)$$

وزن مخصوص تعدادی از سیالات در جدول (۱-۳) آورده شده است.

چگالی گاز ایده‌آل

جداول ویژگی‌های مواد، اطلاعات جامع و دقیقی را از ویژگی‌های مواد در اختیار قرار می‌دهند، ولی بعضی اوقات داشتن رابطه‌هایی ساده بین ویژگی‌های مختلف ماده مفید است. هر رابطه‌ای که ارتباط بین فشار، دما و چگالی یک ماده را بیان کند، **رابطه‌ی حالت**^۴ نامیده می‌شود. ساده‌ترین و معروف‌ترین رابطه‌ی حالت ماده در گازها، **رابطه‌ی گاز ایده‌آل**^۵ است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$p = \rho RT \quad (1-12)$$

که در آن p فشار مطلق، ρ چگالی، T دمای مطلق و R ثابت گاز است. مقدار ثابت گاز برای هر گاز متفاوت است و از رابطه‌ی $R = R_u/M$ محاسبه می‌شود که در آن M جرم مولی (وزن ملکولی) گاز و R_u ثابت جهانی گاز بوده که برابر با $8/314 \text{ kJ/kmol}$ است. مقادیر R برای برخی گازها در جدول (پ-۴) پیوست آمده است.

واحد دمای مطلق در رابطه‌ی گاز کامل در سیستم متریک، کلون است. لازم به یادآوری است که واحدهای دمای مختلف توسط رابطه‌هایی قابل تبدیل به‌همدیگر هستند. برای مثال، رابطه‌ی زیر می‌تواند برای تبدیل دما از درجه‌ی سانتی‌گراد به درجه‌ی کلون به کار گرفته شود:

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15 \quad (1-13)$$

برای گاز ایده‌آل با حجم V ، جرم m و تعداد مول ($N = m/M$)، رابطه‌ی حالت گاز ایده‌آل به صورت

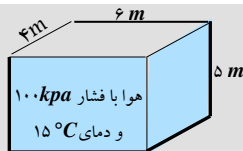
۱- Specific gravity ۲- Relative density ۳- Specific weight

۴- Equation of state

۵- Ideal gas

$p\forall = NR_uT$ نیز نوشته می شود. برای گاز ایده آل در دو حالت مختلف نیز می توان رابطه ی زیر را به کار برد:

$$\frac{p_1 \forall_1}{T_1} = \frac{p_2 \forall_2}{T_2} \quad (1-14)$$



مثال ۱-۲: محاسبه ی چگالی، چگالی نسبی و جرم هوا در اتاق.

چگالی، چگالی نسبی و جرم هوا در یک اتاق به ابعاد $4\text{ m} \times 5\text{ m} \times 6\text{ m}$ در فشار 100 kPa و دمای 15°C محاسبه کنید.

پاسخ:

در شرایط داده شده، هوا به عنوان گاز ایده آل در نظر گرفته شود، می توان از رابطه ی گاز ایده آل استفاده کرد. با استفاده از جدول (ب-۴) پیوست در دمای 15°C درجه سانتی گراد $R = 0.287\text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$ است.

بنابراین، چگالی و چگالی نسبی هوا نیز از رابطه های (۱-۱۲) و (۱-۱۰) به صورت زیر به دست می آید:

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{(100\text{ kPa})}{(0.287\text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K})(15 + 273.1)\text{K}} = \underline{\underline{1.21\text{ kg}/\text{m}^3}}$$

$$SG = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{1.21\text{ kg}/\text{m}^3}{1000\text{ kg}/\text{m}^3} = \underline{\underline{0.00121}}$$

سرانجام حجم و جرم هوا در درون اتاق به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\forall = (4\text{ m})(5\text{ m})(6\text{ m}) = 120\text{ m}^3$$

$$m = \rho\forall = (1.21\text{ kg}/\text{m}^3)(120\text{ m}^3) = \underline{\underline{145.1\text{ kg}}}$$

۴ سایل ۱-۲۲
الی ۱-۲۷

این موضوع جالب توجه است که در فشار پایین و دمای بالا، چگالی گاز واقعی^۱ کاهش می یابد و رفتار آن به رفتار گاز ایده آل نزدیک می شود. در عمل برای بسیاری از گازها مانند هوا، نیتروژن، اکسیژن، هلیوم و حتی گازهای سنگین تر مانند دی اکسید کربن، می توان از رابطه ی گاز ایده آل با درصد خطای کمتر از ۱ درصد استفاده کرد.

۱-۴-۲ معیار جاری شدن (لزجت)

هنگامی که دو سطح جامد نسبت به همدیگر شروع به حرکت کنند، نیروی اصطکاک در سطح تماس در خلاف جهت حرکت به وجود می آید. برای مثال، چنانچه میزی بر روی زمین به حرکت در آید، بایستی نیرویی بر نیروی اصطکاک بین پایه های میز و کف غلبه کند.



ک ۱-۵

شرایط بالا در زمانی که سیال بر روی سطح جامد حرکت می کند و یا در زمانی که دو لایه ی سیال در کنار یکدیگر حرکت می کنند، نیز ایجاد می شود. راه رفتن در هوا به مراتب از راه رفتن در آب و روغن آسان تر است. همچنین آزمایش ها نشان می دهد که سقوط یک توپ شیشه ای درون استوانه که با روغن پر

۱- Real gas

۲- Viscosity

شده است، بسیار کندتر از حرکت آن در آب است. به نظر می‌رسد که خاصیتی از سیال وجود دارد که معرف مقاومت سیال در برابر جریان یافتن و یا سیالیت است. این خاصیت از سیال، لزجت^۲ نامیده می‌شود. به منظور محاسبه‌ی رابطه‌ی برای لزجت در جریان آرام، لایه‌ای از سیال را در بین دو صفحه با فاصله‌ی L در نظر بگیرید، شکل (۱-۱۵). در این حالت چنانچه نیروی ثابت (F) به صفحه‌ی بالایی وارد شود و در عین حال صفحه‌ی پایینی ثابت نگاه داشته شود، صفحه‌ی بالایی با سرعت ثابت و برابر V به صورت پیوسته به حرکت در می‌آید. سیال در تماس با لایه‌ی بالایی به صفحه چسبیده (بنا بر اصل عدم لغزش) و با همان سرعت صفحه‌ی بالایی حرکت می‌کند و در نتیجه تنش برشی اعمالی به لایه‌ی سیال برابر $\tau = F/A$ است که A سطح تماس بین صفحه و سیال است.

با توجه به اصل عدم لغزش سیال، سرعت سیال در تماس با صفحه‌ی پایینی برابر با سرعت صفحه پایینی یعنی صفر است. در جریان پایدار و آرام، سرعت سیال بین دو صفحه به صورت خطی بین دو مقدار صفر و V تغییر می‌کند. بنابراین توزیع سرعت و گرادیان سرعت به صورت زیر به دست می‌آید [۳]:

$$u(y) = \frac{y}{L}V \quad ; \quad \frac{du}{dy} = \frac{V}{L} \quad (1-15)$$

که در آن y فاصله‌ی عمودی از صفحه‌ی پایینی است. در بازه زمانی dt صفحه‌ی بالایی به حرکت درآمده و نقطه‌ی N به اندازه‌ی $da = Vdt$ در امتداد صفحه حرکت کرده تا به نقطه‌ی N' می‌رسد. لذا، ذرات سیال در امتداد خط MN به اندازه‌ی $d\beta$ می‌چرخند. تغییر مکان زاویه‌ای یا کرنش به صورت زیر به دست می‌آید:

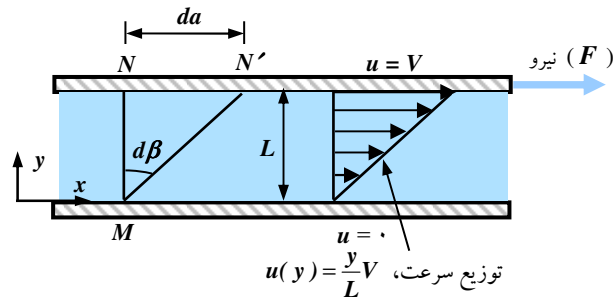
$$d\beta \approx \tan(d\beta) = \frac{da}{L} = \frac{Vdt}{L} = \frac{du}{dy} dt \quad (1-16)$$

با ساده‌سازی رابطه‌ی بالا نرخ کرنش در اثر تنش برشی τ ، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1-17)$$

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش المان سیال، معادل گرادیان سرعت (du/dy) است. به علاوه، مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای سیالات در جریان آرام، نرخ کرنش (گرادیان سرعت) با تنش برشی τ متناسب است. بنابراین، رابطه‌ی (۱-۱۷) به صورت زیر درمی‌آید:

$$\tau \propto \frac{d\beta}{dt} \quad \text{یا} \quad \tau \propto \frac{du}{dy} \quad (1-18)$$



شکل ۱-۱۵ رفتار سیال در جریان آرام بین دو صفحه‌ی موازی، هنگامی که صفحه‌ی بالایی با سرعت ثابت V حرکت کند [۳].

سیالاتی که در آنها ارتباط تنش برشی و نرخ کرنش خطی است، سیالات نیوتنی^۱ نامیده می‌شوند. انتخاب این نام به این دلیل می‌باشد که این نظریه برای اولین بار در سال ۱۶۸۷ توسط اسحاق نیوتن^۲ بیان گردید. بیشتر سیالات مانند آب، هوا، گازوییل و روغن جزو سیالات نیوتنی محسوب می‌شوند. خون و مایعات پلاستیک نمونه‌ای از سیالات غیر نیوتنی^۳ محسوب می‌شوند. در جریان‌های آرام یک‌بعدی سیالات نیوتنی، تنش برشی توسط رابطه‌ای خطی به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-19)$$

که در آن μ ضریب لزجت^۴، لزجت دینامیکی^۵ و یا لزجت نامیده می‌شود. لزجت دینامیکی دارای بعد FTL^{-2} و واحد آن $kg/(m.s)$ یا $N.s/m^2$ یا $Pa.s$ است. واحد معمول دیگر لزجت دینامیکی پویز^۶ است که برابر با $Pa.s$ $1/10$ است. لزجت آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۱ سانتی‌پویز^۷ است [۳].



ک ۱-۶

چنانچه برای سیال نیوتنی، نمودار تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ کرنش (گرادیان سرعت) ترسیم شود، خط مستقیمی حاصل می‌شود که شیب این خط ضریب لزجت سیال است، شکل (۱-۱۶).

$$F = \tau A = \mu \frac{du}{dy} A \quad (1-20)$$

بنابراین نیروی مورد نیاز برای حرکت صفحه‌ی بالایی با سرعت ثابت V در شکل (۱-۱۵) برابر است با:

$$F = \mu \frac{V}{L} A \quad (1-21)$$

با اندازه‌گیری نیرو در آزمایشگاه، می‌توان از رابطه‌ی (۱-۲۱) ضریب لزجت را محاسبه کرد.



معرفی یک دانشمند

اسحاق نیوتن (۱۶۴۲-۱۷۲۷)

این دانشمند در شهر کوچک گرانثام در کشور انگلستان و در روز تولد حضرت مسیح (عید کریسمس) در سال ۱۶۴۲ به دنیا آمد. پدرش سه ماه قبل از به دنیا آمدن نیوتن در جنگ کشته شد و پس از ازدواج مجدد مادرش، سرپرستی وی به مادر بزرگش سپرده شد. از همان ابتدا نیوتن فردی بسیار سخت‌کوش و دارای حس کنجکاوی فوق‌العاده‌ای بود. در سال ۱۶۶۵ و در پی شایع شدن بیماری طاعون در کشور، وی دانشگاه کمبریج را ترک کرد. در همین هنگام او بر روی قانون جاذبه مطالعه می‌کرد. نیوتن علاوه بر اینکه یک فیزیک‌دان معروف بود، یک ریاضی‌دان معروف نیز به‌شمار می‌آید. جالب است که او به فعالیت‌های سیاسی نیز علاقمند بود و در دو دوره در سال‌های ۱۶۸۹ و ۱۷۰۲ در مجلس انگلیس عضویت داشت.

۱- Newtonian fluids

۲- Issac Newton

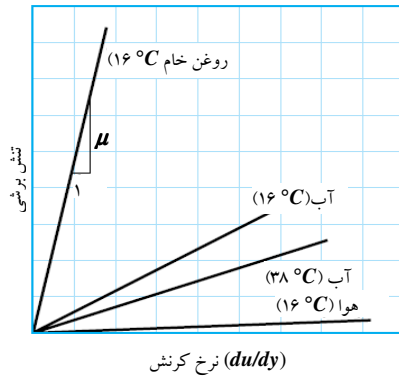
۳- Non-newtonian fluids

۴- Coefficient of viscosity

۵- Dynamic viscosity

۶- Poise

۷- Centi poise



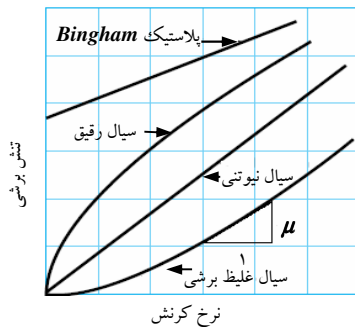
شکل ۱۶-۱ نمودار تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ کرنش (گرادیان سرعت) برای سیالات نیوتنی.



ک ۱-۷

برای سیالات غیرنیوتنی، ارتباط بین تنش برشی و نرخ کرنش غیرخطی است، شکل (۱۷-۱). شیب منحنی تنش برشی بر حسب du/dy در هر نقطه نشانگر لزجت ظاهری^۱ است. سیالات غیرنیوتنی خود انواع مختلفی دارند. سیالاتی که در آنها لزجت ظاهری با افزایش نرخ کرنش، افزایش می یابند، یعنی هرچه تنش برشی بیشتری به سیال وارد شود، لزجت آن بیشتر می شود، سیالات غلیظ برشی^۲ نامیده می شوند. مخلوط آب و ماسه نمونه ای از این سیالات به شمار می رود. برعکس، سیالاتی که در آنها لزجت ظاهری با افزایش نرخ کرنش، کاهش می یابد، یعنی هرچه تنش برشی بیشتری به سیال وارد شود، لزجت آن کمتر می شود، سیالات رقیق برشی^۳ یا شبه پلاستیک^۴ نامیده می شوند. محلول های پلیمری و رنگ، نمونه ای از این سیالات به شمار می روند. برخی مواد نیز مانند خمیردندان تا حدی می توانند در برابر تنش برشی مقاومت کنند (شبه جامدات) و پس از اینکه تنش برشی از حد تسلیم ماده فراتر رود، مانند سیال به صورت پیوسته تغییر شکل می دهند. این نوع مواد، پلاستیک بینگهام^۵ نامیده می شوند [۳].

در مکانیک سیالات و انتقال حرارت، نسبت لزجت دینامیکی به چگالی معمولاً در رابطه ها ظاهر می شود. این نسبت لزجت سینماتیکی^۶ نامیده شده است و به صورت رابطه ی (۲۲-۱) بیان می شود:



شکل ۱۷-۱ تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ کرنش (گرادیان سرعت) برای انواع سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی [۲].

۱- Apparent viscosity ۲- Shear thickening fluids ۳- Shear thinning fluids ۴- Pseudoplastic ۵- Bingham plastic
۶- Kinematic viscosity

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-22)$$

بعد لزجت سینماتیکی $L^2 T^{-1}$ و واحد آن m^2/s است. علت انتخاب واژه سینماتیکی این است که در واحد آن اثری از نیرو نبوده و فقط پارامترهای سینماتیکی m و s در آن وجود دارد. واحد معمول دیگری با نام استوک^۱ نیز برای لزجت سینماتیکی به کار می‌رود که یک استوک معادل $10^{-4} m^2/s$ است.

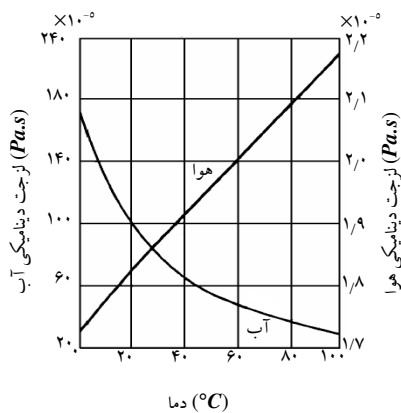
لزجت سیال هم به فشار و هم به دما بستگی دارد. البته وابستگی آن به فشار کمتر از دماست. در مایعات، لزجت دینامیکی و لزجت سینماتیکی هر دو مستقل از تغییرات فشار هستند (مگر در فشارهای خیلی زیاد). در مورد گازها، لزجت دینامیکی در فشارهای کم تا متوسط مستقل از تغییرات فشار است، لیکن لزجت سینماتیکی با توجه به اینکه چگالی با فشار تغییر می‌کند، همواره به فشار وابسته است.

لزجت سیال در اثر نیروی چسبندگی بین ملکول‌ها در مایعات و برخورد ملکولی در گازها ایجاد می‌شود. لزجت در مایعات با افزایش دما، کاهش می‌یابد، ولی در گازها با افزایش دما افزایش می‌یابد، شکل (۱-۱۸). علت این امر آن است که در گازها با افزایش دما، انرژی جنبشی ملکول‌ها افزایش یافته و سرعت برخورد آنها به همدیگر بیشتر می‌شود و در نتیجه لزجت افزایش می‌یابد. لیکن در مایعات با افزایش دما، چسبندگی بین ملکولی کاهش و در نتیجه لزجت کاهش می‌یابد. مقادیر لزجت دینامیکی برای تعدادی از سیالات در جدول (۱-۴) آمده است.

لازم به ذکر است که در رابطه نیوتن به صورت $\tau = \mu du/dy$ مبنای سنجش y از مرز جامد است. برای استفاده از رابطه نیوتن در لوله‌ها، دیسک‌ها و شکل‌های متقارن محوری بهتر است از شکل شعاعی این رابطه به صورت زیر استفاده شود:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dr} \quad (1-23)$$

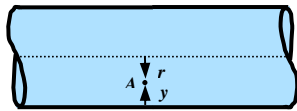
که در آن r فاصله هر نقطه مانند A از محور تقارن جسم است، شکل (۱-۱۹).



شکل ۱-۱۸ تغییرات لزجت دینامیکی بر حسب دما برای دو سیال آب و هوا.

جدول ۴-۱ لزجت دینامیکی (μ) برای تعدادی از سیالات.

سیال	لزجت دینامیکی $kg/(m.s)$	سیال	لزجت دینامیکی $kg/(m.s)$
گلیسرین در دمای: $-20^{\circ}C$	۱۳۴	آب: $0^{\circ}C$	0.0018
$0^{\circ}C$	10.5	$40^{\circ}C$	0.0015
$20^{\circ}C$	1.52	$15.6^{\circ}C$	0.00112
$40^{\circ}C$	0.31	$20^{\circ}C$	0.00100
		$100^{\circ}C$ (مایع)	0.00028
		$100^{\circ}C$ (بخار)	0.00012
روغن موتور (در دمای $20^{\circ}C$):		هوا (در دمای $15^{\circ}C$)	0.00018
SAE 10W	0.1	هیدروژن (در دمای $20^{\circ}C$)	0.0000884
SAE 10W30	0.17	هلیوم (در دمای $20^{\circ}C$)	0.000194
SAE 30	0.29	گاز طبیعی (در دمای $20^{\circ}C$)	0.00011
SAE 50	0.86	اکسیژن (در دمای $20^{\circ}C$)	0.000204
آب دریا (در دمای $20^{\circ}C$)	0.0029	دی اکسید کربن (در دمای $20^{\circ}C$)	0.000147
جیوه (در دمای $20^{\circ}C$)	0.0015	نیترژن (در دمای $20^{\circ}C$)	0.000176
خون (در دمای $37^{\circ}C$)	0.0040		



شکل ۱۹-۱ مبنای سنجش l و r برای

استفاده در رابطه های (۱-۱۹) و (۱-۲۳).

مثال ۳-۱: محاسبه تنش برشی.

منحنی تغییرات سرعت درون لوله ای به شعاع 0.5 m از رابطه $u/U = [1 - (r/R)^2]$ محاسبه شود که در آن U حداکثر سرعت روی محور لوله است. مطلوب است محاسبه تنش برشی τ به ازا (r/R) برابر با صفر، 0.2 ، 0.5 ، 0.8 و یک. حداکثر سرعت در محور لوله 10 m/s و $\mu = 0.02\text{ Pa.s}$ است.

پاسخ:

اگر حداکثر سرعت (U) و μ در رابطه ی توزیع سرعت قرار داده شود، رابطه ی زیر به دست می آید:

$$u = 10 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

با مشتق گیری از رابطه ی بالا گرادینان سرعت در راستای شعاع r به دست می آید:

$$\frac{du}{dr} = -20 \left(\frac{r}{R} \right) \left(\frac{1}{R} \right) = -20 \left(\frac{r}{R} \right) \left(\frac{1}{0.5\text{ m}} \right) = -40 \left(\frac{r}{R} \right)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۱-۲۳) مقدار تنش برشی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dr} = -0.002 \times (-40) \frac{r}{R} = 0.08 \frac{r}{R}$$

با جایگزینی مقادیر مختلف (r/R) در رابطه‌ی فوق، مقادیر تنش برشی در هر فاصله از محور محاسبه می‌شود. با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول مشاهده می‌شود که تغییرات تنش برشی بر حسب (r/R) خطی است. لذا تغییرات تنش برشی همیشه یک درجه از تغییرات سرعت پایین تر است. یعنی چنانچه تغییرات سرعت خطی باشد، تغییرات تنش برشی ثابت است و چنانچه توزیع سرعت سهمی باشد، تغییرات تنش برشی خطی است. همچنین، بیشترین مقدار تنش برشی بر روی جداره‌ی لوله اتفاق می‌افتد.

تنش برشی (Pa)	r/R
۰/۰۰۰	۰/۰
۰/۰۱۶	۰/۲
۰/۰۴۰	۰/۵
۰/۰۶۴	۰/۸
۰/۰۸۰	۱/۰

مثال ۱-۴، م.ک، ۸۲

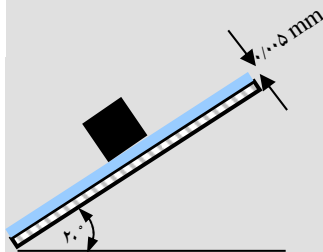
توزیع سرعت سیالی با ویسکوزیته‌ی $0.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ و هوسیله‌ی $V = 2y - 2y^2$ تعیین می‌شود. تنش برشی در $y = 0.5 \text{ m}$ بر حسب نیوتن بر متر مربع چقدر است؟

پاسخ:

با توجه به رابطه‌ی (۱-۱۹)، ابتدا بایستی du/dy محاسبه شود. چنانچه از رابطه‌ی سرعت بر حسب y مشتق‌گیری شود، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{du}{dy} = \frac{d}{dy}(2y - 2y^2) = 2 - 4y$$

در $y = 0.5 \text{ m}$ مقدار du/dy برابر صفر خواهد شد و لذا تنش برشی در این نقطه صفر است.



مثال ۱-۵: محاسبه‌ی تنش برشی و سرعت نهایی جسم بر روی سطح شیب‌دار.

یک بلوک مکعبی شکل به وزن 1 kN و با ضلع 200 mm بر روی سطح شیب‌داری مطابق شکل روی یک ورقه‌ی نازک از روغن با لزجت $\mu = 0.007 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ به پایین می‌لغزد. چنانچه توزیع سرعت درون لایه‌ی روغن، خطی فرض شود، سرعت نهایی بلوک چقدر است؟

پاسخ:

تنش برشی در کف بلوک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

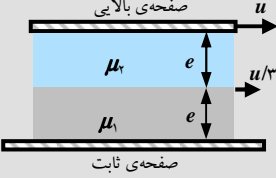
$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = (0.007 \text{ Pa}\cdot\text{s}) \frac{(U - 0)}{(0.005 \times 10^{-3} \text{ m})} = 1400U$$

در رابطه‌ی بالا، U سرعت نهایی بلوک مکعبی است. لازم به ذکر است که سرعت نهایی در شرایط تعادل بلوک مکعبی حاصل می‌شود. قانون دوم نیوتن در راستای حرکت بلوک به صورت زیر درمی‌آید:

$$\sum F = 0 \quad ; \quad \tau A - W \sin \alpha = 0$$

$$1400U [(0.2 \text{ m})(0.2 \text{ m})] - (1000 \text{ N}) \sin(20^\circ) = 0 \quad ; \quad \underline{U = 6.11 \text{ m/s}}$$

مثال ۱-۶، مش، ۸۰



دو سیال مخلوط نشدنی با ضخامت کم و برابر، روی یک سطح ساکن قرار گرفته‌اند. صفحه‌ای که بر روی سیال بالایی قرار دارد با سرعت u حرکت می‌کند. در صورتی که سرعت در سطح تماس دو سیال $u/3$ باشد، ارتباط لزجت دو سیال را محاسبه کنید.

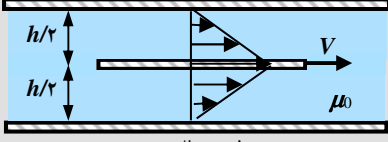
پاسخ:

تنش برشی وارده از طرف سیال بالایی و پایینی در سطح تماس دو سیال، با استفاده از رابطه‌ی (۱۹-۱) به دست می‌آید و با برابر قرار دادن مقدار آنها خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \tau_1 = \mu_1 \frac{u/3}{e} \\ \tau_2 = \mu_2 \frac{(u - u/3)}{e} \end{cases} \quad ; \quad \mu_1 \frac{u/3}{e} = \mu_2 \frac{(u - u/3)}{e} \quad ; \quad \underline{\underline{\mu_1 = 2\mu_2}}$$

مثال ۱-۷، مع، ۸۴

در بین دو صفحه‌ی موازی که به فاصله‌ی h از همدیگر قرار گرفته و با روغنی به لزجت دینامیکی μ پر شده است، یک ورق نازک به مساحت A با سرعت ثابت V مطابق شکل کشیده می‌شود. نیروی مقاومت در مقابل حرکت ورق را محاسبه کنید.



صفحه‌ی ثابت

پاسخ:

در بالا و پایین ورق دو نیروی مقاوم از طرف سیال بر صفحه وارد می‌شود. بنابراین، با توجه به تقارن موجود کافی است یکی از نیروها محاسبه شده و حاصل آن دو برابر شود:

$$F = 2F_1 = 2(\tau A) = 2 \left[\mu_0 \frac{V}{(h/2)} \right] A = 4\mu_0 \frac{V}{h} A$$

چنانچه لایه‌ای از سیال به ضخامت t در فاصله‌ی کوچک بین دو استوانه‌ی هم‌محور مطابق شکل (۱-۲۰) در نظر گرفته شود (مانند قرارگیری لایه‌ای نازک از روغن در یکک یاطاقان گرد)، می‌توان فاصله‌ی بین دو استوانه را با دو صفحه‌ی موازی صاف که بین آنها لایه‌ی سیال قرار گرفته است، مدل کرد. چنانچه استوانه‌ی خارجی ثابت نگاه داشته شود و استوانه‌ی داخلی با نیروی F بچرخد، مقدار گشتاور ایجاد شده برابر با $T = FR$ (شعاع استوانه‌ی داخلی)، سرعت مماسی برابر با $V = R\omega$ (سرعت زاویه‌ای) و مساحت سطح خارجی استوانه‌ی داخلی برابر با $2\pi RL$ (طول استوانه) خواهد بود.

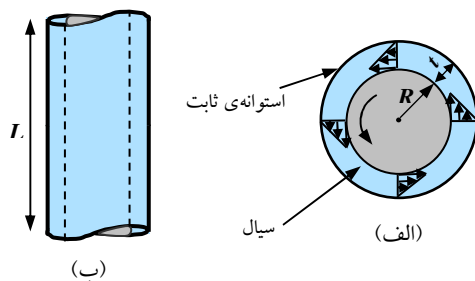
برای به دست آوردن گشتاور مورد نیاز برای چرخاندن استوانه‌ی داخلی و با فرض خطی بودن توزیع سرعت در لایه‌ی سیال، می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد:

$$T = F.R = \left(\mu \frac{du}{dy} A \right) R = \mu \frac{R\omega}{t} (2\pi RL) R = \mu \frac{2\pi R^3 \omega L}{t} = \mu \frac{4\pi^2 R^3 \dot{n} L}{t} \quad (1-24)$$

که در آن \dot{n} تعداد دور بر ثانیه چرخش استوانه‌ی داخلی است. رابطه‌ی زیر بین سرعت زاویه‌ای ω (رادیان بر ثانیه) و \dot{n} برقرار است:

$$\omega = 2\pi\dot{n} \quad (1-25)$$

در آزمایشگاه سیالات، معمولاً دستگاهی به نام ویسکومتر^۱ با دو استوانه‌ی هم‌محور موجود است که می‌توان با داشتن گشتاور و سرعت زاویه‌ای، مقدار لزجت را محاسبه کرد.



شکل ۱-۲۰ لایه‌ای از سیال در فضای بین دو استوانه‌ی هم‌محور؛ الف) دید از بالا، ب) دید از کنار.

مثال ۱-۸: محاسبه‌ی لزجت سیال توسط دستگاه ویسکومتر.

یک ویسکومتر از دو استوانه‌ی هم‌محور به ارتفاع $m/4$ تشکیل شده است، شکل (۱-۲۰). قطر استوانه‌ی داخلی $m/12$ و فاصله‌ی بین دو استوانه $1/5 \text{ mm}$ است. چنانچه استوانه‌ی داخلی با سرعت 300 دور بر دقیقه بچرخد و گشتاور ایجاد شده برابر $1/8 \text{ N.m}$ باشد، لزجت سیال را محاسبه کنید.

پاسخ:

با فرض توزیع خطی سرعت، می توان لزجت سیال را از رابطه ی (۱-۲۴) به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\mu = \frac{Tt}{4\pi^2 R^3 nL} = \frac{(1.8 N \cdot m)(0.0015 m)}{4\pi^2 (0.06 m)^3 \left(\frac{300}{60} 1/s\right)(0.4 m)} = 0.158 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

مثال ۱-۹، م، ۲۹

دو استوانه ی متحدالمرکز طویل و به طول b را در نظر بگیرید. سیالی با ضریب لزجت μ بین آن دو قرار دارد. استوانه ی داخلی (با شعاع R_1) را با سرعت زاویه ای ω و گشتاور T می چرخانیم، ولی استوانه ی خارجی (با شعاع R_2) ساکن است. در حالت دایم تنش برشی روی سطح استوانه ی خارجی را محاسبه کنید.

پاسخ:

تنش برشی اعمال شده بر روی سطح استوانه داخلی به صورت زیر به دست می آید:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{(T/R_1)}{2\pi R_1 b} = \frac{T}{2\pi R_1^2 b}$$

با توجه به رابطه ی (۱-۲۴)، چنانچه مقدار T (گشتاور چرخشی) در رابطه ی بالا جایگزین شود، رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\tau = \frac{T}{2\pi R_1^2 b} = \frac{\mu \left[\frac{2\pi R_1^3 \omega b}{(R_2 - R_1)} \right]}{2\pi R_1^2 b} = \frac{\mu \omega R_1}{(R_2 - R_1)}$$

با توجه به اینکه توزیع سرعت خطی فرض شده است، مقدار تنش در لایه ی بین دو استوانه ثابت است و تنش برشی اعمالی بر سطح استوانه ی خارجی نیز همین مقدار است.

مسائل ۱-۴۰
الی ۱-۴۹

۳-۴-۱ معیار تراکم پذیری

مدول حجمی

یکی از سؤال های مهمی که در مورد رفتار سیالات مطرح می شود، آن است که چگونه حجم سیال در اثر تغییر فشار یا تنش اعمالی بر آن تغییر می کند. تراکم پذیری یکی از ویژگی مواد است که بیانگر تغییرات کرنش یا حجم سیال در اثر تنش یا فشار اعمالی بر آن است. خاصیتی که معمولاً برای بیان تراکم پذیری استفاده می شود، مدول حجمی^۱ نامیده می شود که به صورت زیر بیان می شود:

$$E_v = -\frac{dp}{dV/V} \quad (1-26)$$

که در آن dp تغییرات جزئی در فشار مورد نیاز برای تغییر جزئی حجم جسم به اندازه ی dV است. علامت

۱- Bulk modulus

منفی در رابطه نیز نشان دهنده آن است که افزایش فشار باعث کاهش حجم می‌شود. با توجه به اینکه کاهش حجم جرم مشخصی از سیال باعث افزایش چگالی بر اساس رابطه $m = \rho V$ می‌گردد، بنابراین رابطه (۱-۲۶) به صورت زیر نیز می‌تواند ساده شود:

$$E_v = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (1-27)$$

بعد مدول حجمی FL^{-2} (به مدول حجمی، مدول الاستیسیتهی حجمی^۱ نیز گفته می‌شود) و واحد آن در سیستم متریک N/m^2 (Pa) است که معادل واحد فشار است. مقادیر زیاد مدول حجمی نشان‌دهندهی تراکم‌ناپذیری سیال است، زیرا برای تغییر حجم نیاز به تغییر فشار زیادی خواهد بود. برای مثال، در فشار آتمسفر و دمای ۱۶ درجه سانتی‌گراد برای کاهش حجم واحد آب به میزان ۱ درصد نیاز به ۲۱۵۲۸ کیلوپاسکال فشار است. از آنجایی که فشار زیادی برای تغییر حجم مایعات لازم است، مایعات در کاربردهای عملی جزء سیال‌های تراکم‌ناپذیر محسوب می‌شوند. در جدول (۱-۵) مدول الاستیسیتهی تعدادی از مایعات داده شده است.



ک ۱-۸

تراکم‌پذیری و انبساط در گازها

هنگامی که گازها فشرده یا منبسط می‌شوند، ارتباط بین فشار و حجم به طبیعت فرایند آنها وابسته است. چنانچه فشردگی و انبساط در فرایند هم‌دما^۲ اتفاق بیفتد، رابطه‌ی زیر حاکم است:

$$\frac{p}{\rho} = RT = \text{ثابت} \quad (1-28)$$

اگر فشردگی و انبساط بدون اصطکاک بوده و هیچ تبادل حرارتی با اطراف وجود نداشته باشد، یعنی فرایند هم‌رفت^۳ وجود داشته باشد، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{ثابت} \quad (1-29)$$

که در آن k نسبت گرمای ویژه است که معادل نسبت گرمای ویژه در فشار ثابت (c_p) به گرمای ویژه در حجم ثابت (c_v) است. دو نسبت گرمای ویژه با ثابت گازها (R) توسط رابطه‌ی زیر در ارتباط هستند:

$$R = c_p - c_v \quad (1-30)$$

جدول ۱-۵ مدول حجمی (E_v) برای تعدادی از مایعات.

مدول حجمی	سیال	مدول حجمی	سیال
Pa		Pa	
$4,52 \times 10^9$	گلیسرین (در دمای $20^\circ C$)	$2,15 \times 10^9$	آب (در دمای $15,6^\circ C$)
$2,85 \times 10^{10}$	جیوه (در دمای $20^\circ C$)	$1,06 \times 10^9$	اتانول (در دمای $20^\circ C$)
$1,5 \times 10^9$	روغن $SAE30$ (در دمای $15^\circ C$)	$1,3 \times 10^9$	بنزین (در دمای $15,6^\circ C$)
$2,34 \times 10^9$	آب دریا (در دمای $15,6^\circ C$)	$1,31 \times 10^9$	تتراکلرید کربن (در دمای $20^\circ C$)
$1,66 \times 10^9$	روغن پارافین (در دمای $15,6^\circ C$)	$9,2 \times 10^8$	استون (در دمای $15,6^\circ C$)

۱- Bulk modulus of elasticity

۲- Isothermal process

۳- Isentropic process

از آنجایی که در رابطه‌های (۱-۲۸) و (۱-۲۹) ارتباط بین فشار و چگالی مشخص گردید، می‌توان با مشتق‌گیری از فشار بر حسب چگالی و قرار دادن در رابطه‌ی (۱-۲۷) مدول حجمی را برای فرایندهای مختلف گاز محاسبه کرد. برای شرایط هم‌دما، با استفاده از رابطه‌های (۱-۱۲) و (۱-۲۸) خواهیم داشت:

$$\frac{dp}{d\rho} = RT = \frac{p}{\rho} \quad (1-31)$$

با جایگزینی مقدار $dp/d\rho$ در رابطه‌ی (۱-۲۷)، مقدار مدول حجمی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_v = \frac{dp}{d\rho/\rho} = p \quad (1-32)$$

به صورت مشابه، برای شرایط هم‌رفت مقدار مدول حجمی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$E_v = kp \quad (1-33)$$

برای هوا در شرایط استاندارد با فشار 101.33 کیلوپاسکال و $k = 1.4$ مدول حجمی برابر با 141.9 کیلوپاسکال برای شرایط هم‌رفت است. برای آب در شرایط مشابه این عدد 2.15×10^6 کیلوپاسکال است که نشان‌دهنده‌ی این است که هوا تقریباً 15000 مرتبه تراکم‌پذیرتر از آب است [۲].

مثال ۱-۱۰: محاسبه‌ی فشار لازم برای تغییر حجم سیال.

چنانچه مدول حجمی آب در شرایط استاندارد برابر 2.15×10^6 kPa فرض شود، مطلوب است محاسبه‌ی افزایش فشار لازم برای یک درصد کاهش حجم آب و یک درصد کاهش حجم هوا در شرایط هم‌رفت.

پاسخ:

با توجه به رابطه‌ی (۱-۲۶) و با جایگزینی $dV/V = -0.01$ مقدار افزایش فشار برای تغییر حجم آب از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$E_v = -\frac{dp}{dV/V} \quad ; \quad dp = -E_v \frac{dV}{V} = -(2.15 \times 10^6 \text{ kPa})(-0.01) = 21500 \text{ kPa}$$

برای هوا در شرایط هم‌رفت، مدول حجمی از رابطه‌ی (۱-۳۳) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_v = kp = 1.4(101.325 \text{ kPa}) = 141.9 \text{ kPa}$$

بنابراین افزایش فشار لازم برای تغییر حجم هوا به صورت زیر به دست می‌آید:

$$dp = 0.01(141.9 \text{ kPa}) = 1.42 \text{ kPa}$$

نگاهی به نتایج نشان می‌دهد که اختلاف فشار مورد نیاز برای تغییر حجم آب به اندازه‌ی ۱ درصد، تقریباً 15000 برابر فشار مورد نیاز برای ۱ درصد مشابه کاهش حجم هوا است.

سرعت صوت

یکی دیگر از فرایندهای تراکم‌پذیری سیالات این است که آشفتگی‌های ایجاد شده در بعضی از نقاط سیال با سرعت محدود منتشر می‌شود. برای مثال، چنانچه سیالی در لوله در جریان باشد و ناگهان شیر انتهای لوله بسته شود، اثرات بسته شدن شیر بلافاصله در بالادست شیر احساس نمی‌شود، بلکه مدت زمانی

طول خواهد کشید تا افزایش فشار ناشی از بسته شدن شیر به مناطق بالادست برسد. به طور مشابه، هنگامی که دیافراگم بلندگویی ارتعاش می‌کند، تغییرات جزئی فشار در هوا با سرعت محدودی منتشر می‌شود. سرعت انتشار آشفته‌گی‌های کوچک، **سرعت صوت**^۱ نامیده می‌شود. سرعت انتشار صوت در رابطه با تغییرات فشار و چگالی سیالی است که در آن منتشر می‌شود و توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (1-34)$$

با توجه به رابطه‌ی (۱-۲۸)، رابطه‌ی (۱-۳۴) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$c = \sqrt{\frac{E_v}{\rho}} \quad (1-35)$$

در گازها از آنجایی که آشفته‌گی‌های ایجاد شده کوچک هستند، می‌توان از انتقال حرارت صرف نظر کرد و فرایند را همرفت در نظر گرفت. بنابراین، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$c = \sqrt{\frac{k\rho}{\rho}} \quad (1-36)$$

و با توجه به قانون گاز کامل، رابطه‌ی سرعت انتشار صوت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$c = \sqrt{kRT} \quad (1-37)$$

بنابراین، سرعت انتشار صوت برای گاز ایده‌آل با جذر دمای مطلق متناسب است. رابطه‌ی (۱-۳۵) برای سرعت صوت در مایعات نیز برقرار است. برای مثال، برای آب در دمای 20°C که مدول حجمی آن برابر با 2.19 GPa و چگالی آن 998.2 kg/m^3 است، سرعت صوت $c = 1481 \text{ m/s}$ خواهد بود. توجه شود که سرعت انتشار صوت در آب به مراتب از سرعت انتشار آن در هوا بیشتر است [۲].

مسائل ۱-۵۹
الی ۱-۶۱

۴-۱- تعدادی دیگر از ویژگی‌های سیال

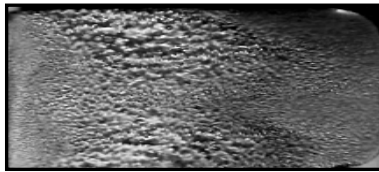
فشار بخار

یکی از پدیده‌های معمول در مورد مایعات این است که چنانچه در ظرف روباز و در تماس با آتمسفر قرار گیرند، پس از مدتی تبخیر در آنها صورت می‌گیرد. تبخیر بدین علت رخ می‌دهد که برخی ملکول‌های سطح مایع دارای اندازه حرکت کافی برای غلبه بر نیروهای چسبندگی بین ملکولی هستند و این ملکول‌ها از سطح سیال به آتمسفر وارد می‌شوند. چنانچه ظرف حاوی مایع سربسته باشد به نحوی که در بالای سطح مایع فضای خالی وجود داشته باشد و در این فضای خالی مکشی ایجاد شود تا در آن خلأ شکل بگیرد، فشاری در نتیجه‌ی بخار حاصل از ملکول‌های خارج شده از سطح ایجاد می‌شود. هنگامی که شرایط تعادلی ایجاد شود، یعنی تعداد ملکول‌های خارج شده از سطح سیال با تعداد ملکول‌های وارد شده به سطح برابر شود، بخار اشباع شده و فشاری که بخار بر سطح مایع وارد می‌کند، **فشار بخار**^۲ نامیده می‌شود. از آنجایی که فشار بخار به فعالیت‌های ملکولی بستگی زیادی دارد، پس فشار بخار برای یک مایع مشخص به

۱- Speed of sound

۲- Vapor pressure

دما بستگی دارد. مقادیر فشار بخار برای آب در دماهای مختلف در جدول (پ-۳) پیوست آمده است. جوشیدن^۱، که تشکیل حباب های بخار درون سیال است، هنگامی آغاز می شود که فشار مطلق درون سیال به فشار بخار مایع برسد. برای مثال، آب در شرایط فشار استاندارد، هنگامی به جوش می آید که دمای آن به 100°C برسد و لذا فشار بخار آب در دمای 100°C برابر با $101/3$ کیلوپاسکال است. حال چنانچه در ارتفاع 3000 متری که فشار آتمسفر 69 کیلوپاسکال است، بخواهند آب به جوش آید، لازم است تا دمای آن به $89/4^{\circ}\text{C}$ برسد. در این دما، فشار بخار آب 69 کیلوپاسکال است. بنابراین، جوشیدن می تواند در یک فشار مشخص با بالا بردن دما و یا در یک دمای مشخص با کاهش فشار اعمالی بر سیال ایجاد شود. یکی از دلایل توجه به فشار بخار مایع، پدیده ی **خلأزایی**^۲ است. در سیال جاری ممکن است مناطق کم فشار شکل بگیرد و چنانچه فشار از فشار بخار پایین تر رود، جوشیدن اتفاق افتاده و حباب های هوا در درون آب شکل می گیرند. این حباب های هوا، همراه جریان به مناطق پرفشار هدایت شده و در این مناطق به صورت ناگهانی متلاشی شده و انرژی زیادی را به صورت ارتعاش ایجاد می کنند که باعث خوردگی و آسیب سازه ای می شود. مراحل شکل گیری حباب های هوا و انتقال آنها به مناطق پرفشار و متلاشی شدن آنها را خلأزایی می نامند. این پدیده به خصوص روی بدنه ی سرریزها و پروانه های توربین ها مشاهده می شود که باعث خوردگی و کاهش راندمان آنها می شود. شکل (۲۱-۱) نمونه ای از تخریب یک صفحه ی آلومینیومی را در اثر پدیده ی خلأزایی نشان می دهد.



شکل ۲۱-۱ خوردگی صفحه ی آلومینیومی در اثر پدیده ی خلأزایی [۳].

مثال ۱-۱: محاسبه ی حداقل فشار برای اجتناب از وقوع خلأزایی.

در سیستم توزیع آب، دمای آب 30 درجه سانتی گراد است. حداقل فشار لازم در سیستم برای جلوگیری از وقوع خلأزایی چقدر است؟

پاسخ:

به منظور جلوگیری از وقوع خلأزایی، بایستی در هر نقطه ی سیال، فشار سیال از فشار بخار آن کمتر نشود. بنابراین لازم است تا فشار بخار آب در این دما از جدول (پ-۳) استخراج شود. فشار بخار آب در دمای 30°C معادل $4/25 \text{ kPa}$ است. بنابراین، در هیچ نقطه ای از سیال نبایستی فشار از $4/25 \text{ kPa}$ کمتر شود.

مسائل ۱-۶۲
الی ۱-۶۴

کشش سطحی

اغلب مشاهده می‌شود که یک قطره‌ی خون بر روی شیشه‌ی افقی، شکل قوس محدب (برآمده) را به خود می‌گیرد یا یک قطره‌ی جیوه، شکلی کاملاً کروی بر روی سطح صاف دارد و می‌تواند مانند یک توپ فولادی بر روی سطح بلغزد. همچنین، قطرات آب باران و شبنم از شاخه‌ها و برگ‌های درختان آویزان می‌شوند. چکیدن قطرات از شیر آب به شکل کروی، حباب‌های صابون کروی در هوا و قطره‌قطره شدن آب بر روی گلبُرگ گل‌ها [شکل (۱-۲۲)]، نمونه‌های دیگری از رفتار سیال تحت این خاصیت است [۳].



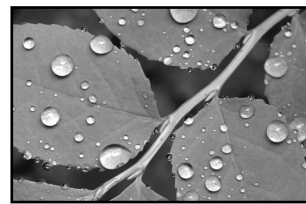
ک ۱-۹

در موارد قید شده، رفتار قطرات مایع مانند یک بالن کوچک پر از مایع است که سطح آن توسط یک عضو الاستیک کششی احاطه شده است. این نیروهای کششی در اثر نیروهای جاذبه‌ی بین‌مولکولی در سطح مایع به وجود می‌آید. اندازه‌ی این نیرو در واحد طول **کشش سطحی**^۱ نامیده می‌شود که معمولاً با σ نشان داده می‌شود. بعد کشش سطحی FL^{-1} و واحد آن در سیستم متریک N/m است. کشش سطحی در سطح مشترک مایع و گاز و یا دو مایع مخلوط نشدنی به وجود می‌آید و عملکرد آن به نحوی است که همانند غشایی سطح سیال را دربر می‌گیرد. به همین دلیل است که چنانچه یک سوزن نازک به آرامی بر روی سطح آب قرار گیرد، بر روی آب شناور مانده و درون آب فرو نمی‌رود. مثال جالب از وجود کشش سطحی در سطح آب، فرود آمدن حشرات و حتی راه رفتن آنها بر روی سطح آب است، شکل (۱-۲۳). در این حالت نیروی وزن حشره با نیروی کشش سطحی در تعادل است.

برای بررسی چگونگی شکل‌گیری کشش سطحی، دو ملکول واقع در سطح و داخل مایع در شکل (۱-۲۴) نشان داده شده است. بر ملکول واقع در داخل مایع از طرف ملکول‌های اطراف آن نیروی جاذبه‌ی بین‌مولکولی اثر کرده و به علت تقارن، این نیروها در توازن با همدیگر هستند. لیکن، در مورد ملکول‌های واقع بر روی سطح آب و با توجه به اینکه در بالای آنها ملکولی وجود ندارد، تنها نیروهای بین‌مولکولی حاصل از ملکول‌های کنار و پایین آنها وجود دارد. بنابراین، برآیند تمام نیروهای وارده بر ملکول‌های واقع در سطح آب، نیرویی به سمت پایین خواهد بود که سعی دارد ملکول‌های سطح را به سمت داخل بکشاند و مساحت سطح تماس با هوا را به حداقل برساند.

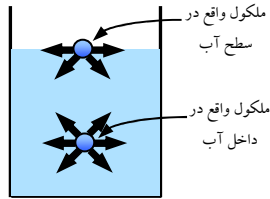


شکل ۱-۲۳ فرود آمدن و راه رفتن بعضی حشرات بر روی سطح آب در اثر کشش سطحی.



شکل ۱-۲۲ قطره‌قطره شدن آب بر روی گلبُرگ گل‌ها در اثر کشش سطحی.

۱- Surface tension



شکل ۱-۲۴ نیروهای جاذبه‌ی ملکولی اعمال‌شده بر ملکول‌های واقع در سطح و داخل آب.

به‌منظور درک بهتر اثرات کشش سطحی، یک غشاء نازک از سیال (مانند غشاء نازک از حباب‌های صابون) را که بر روی یک قاب U شکل از یک مفتول با انتهای متحرک قرار دارد، مطابق شکل (۱-۲۵) در نظر بگیرید. به‌صورت طبیعی غشاء مایع، مفتول متحرک را به‌طرف داخل می‌کشد. به‌منظور جلوگیری از حرکت مفتول متحرک، لازم است در جهت مخالف آن نیرویی برابر با F اعمال شود. به علت اینکه هر دو طرف غشاء نازک با هوا در ارتباط هستند، طولی که در راستای آن نیروهای کششی اعمال می‌شود برابر $2b$ است. با توجه به تعادل نیروها رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

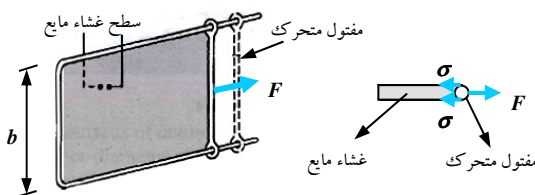
$$F = 2b\sigma \quad (1-38)$$

چنانچه $b = 0.5 \text{ m}$ باشد، نیروی اندازه‌گیری‌شده با کشش سطحی برابر می‌شود. چنانچه بتوان نیرو را با دقت اندازه‌گیری کرد، آن نیرو می‌تواند برای اندازه‌گیری کشش سطحی به کار رود [۳].

کشش سطحی برای هر مایع نسبت به مایع دیگر متفاوت است و در یک مایع مشخص با تغییرات دما تغییر می‌کند. در جدول (۱-۶) مقادیر کشش سطحی برای مایعات مختلف آمده است. برای مثال، کشش سطحی آب در 20°C برابر 0.073 N/m است. با توجه به اینکه کشش سطحی جیوه به‌حد کافی زیاد است، قطرات جیوه شکلی کاملاً کروی بر روی سطح صاف خواهند داشت. کشش سطحی مایعات به‌طور کلی با افزایش دما، کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که اثرات فشار بر کشش سطحی قابل ملاحظه نیست.

ناخالصی‌ها، اثرات قابل ملاحظه‌ای بر کشش سطحی دارند. مواد شیمیایی مشخص مانند **مواد فعال در سطح**^۱ می‌توانند برای کاهش کشش سطحی به مایع افزوده شوند. برای مثال، صابون و مواد شوینده، کشش سطحی را کاهش داده و قادرند تا روزه‌های کوچکی را بین الیاف ایجاد کنند که به شستشوی موثرتر کمک می‌کند.

کشش سطحی اندازه‌ی قطرات تشکیل‌شده‌ی مایعات را تعیین می‌کند. چنانچه در درون یک قطره جرم بیشتری وارد شود، قطره تا حدی بزرگ خواهد شد که کشش سطحی بتواند ملکول‌ها را در کنار همدیگر



شکل ۱-۲۵ اعمال نیروی کششی برای ثابت نگاه‌داشتن مفتول متحرک و کشیده‌شدن غشاء سیال در اثر آن [۳].

جدول ۶-۱ کشش سطحی برای تعدادی از مایعات.

سیال	کشش سطحی (N/m)	سیال	کشش سطحی (N/m)
آب در دمای: ۰°C	۰,۰۷۶	اتانول (در دمای ۲۰°C)	۰,۰۲۲۸
۲۰°C	۰,۰۷۳	روغن SAE۳۰ (در دمای ۱۵°C)	۰,۰۳۶
۱۰۰°C	۰,۰۵۹	محلول صابون	۰,۰۲۱
بترین (در دمای ۱۵/۶°C)	۰,۰۰۲۲	گلیسرین (در دمای ۲۰°C)	۰,۴۶۶
		جیوه (در دمای ۲۰°C)	۰,۰۴۴/۴۸

نگاه دارد. این درست شبیه دمیدن هوا در بادکنک است. هنگامی که فشار درون بادکنک از مقاومت مواد تشکیل دهنده آن فراتر رود، بادکنک می‌ترکد [۳].

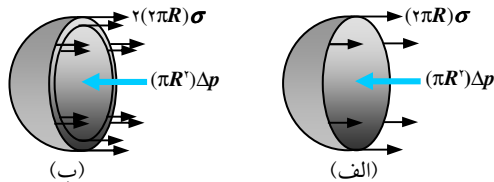
منحنی سطح مشترک (در تماس با هوا) بیان‌کننده اختلاف فشار سطح مشترک و فشار وارد بر طرف مقعر است. برای مثال، یک قطره از مایع در هوا، یا حباب هوا در آب و یا حباب صابون در هوا را در نظر بگیرید. مقدار فشار اضافی Δp افزون بر فشار آتمسفر با توجه به دیاگرام آزاد نیمی از قطره مطابق شکل (۱-۲۶-الف) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$(2\pi R)\sigma = (\pi R^2)\Delta p \quad ; \quad \Delta p = p_i - p_o = \frac{2\sigma}{R} \quad (1-39)$$

همچنین، فشار اضافی Δp برای حباب صابون مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [شکل (۱-۲۶-ب)]:

$$2(2\pi R)\sigma = (\pi R^2)\Delta p \quad ; \quad \Delta p = p_i - p_o = \frac{4\sigma}{R} \quad (1-40)$$

در رابطه‌های بالا، p_i و p_o به ترتیب فشار داخلی و خارجی حباب هوا یا صابون است. هنگامی که حباب هوا یا صابون در معرض هوا باشد، p_o برابر با فشار آتمسفر است. ضریب ۲ در رابطه‌ی مربوط به حباب صابون به این علت است که قشر صابون دارای دو سطح داخلی و خارجی و دو محیط در سطح مقطع است.



شکل ۱-۲۶ دیاگرام آزاد نیمه‌جسم؛ الف) حباب هوا، ب) حباب صابون [۳].

مثال ۱-۱۲: محاسبه‌ی نیروی لازم برای غلبه بر کشش سطحی.



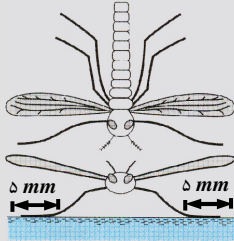
یک سیم دایره‌ای شکل بسیار نازک بر روی سطح آب قرار دارد. برای برداشتن این سیم از روی سطح آب به چه مقدار نیرو (علاوه بر وزن سیم) نیاز است؟ قطر دایره‌ی سیمی ۰/۴ متر و کشش سطحی آب $0,0734 \text{ N/m}$ است.

پاسخ:

نیروی لازم برای بلند کردن سیم از روی سطح آب برابر با نیروی کشش سطحی در سطح تماس سیم با آب است. با توجه به اینکه داخل و بیرون سیم دایره‌ای شکل با آب در تماس است، نیروی لازم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F = 2[(2\pi R)\sigma] = 2\{[2\pi(0.2m)](0.0734 N/m)\} = \underline{\underline{0.185 N}}$$

مثال ۱-۱۳: محاسبه جرم سنجاقک به منظور جلوگیری از فرو رفتن در آب.



یک سنجاقک به کمک کشش سطحی بر روی آب قرار گرفته است. سنجاقک دارای ۶ عدد پا است که سطح تماس هر کدام از پاها با آب ۵ mm است. جرم سنجاقک چقدر باید باشد که در آب فرو نرود؟ کشش سطحی آب $0.0734 N/m$ است.

پاسخ:

در حالت تعادل، وزن سنجاقک بایستی با نیروی کشش سطحی برابر باشد. با توجه به اینکه سنجاقک ۶ عدد پا دارد و برای هر کدام از پاها، دو سطح تماس با آب وجود دارد، جرم جسم از رابطه‌ی زیر می‌تواند محاسبه شود:

$$\sum F_z = 0 \quad ; \quad L\sigma - W = 0$$

$$(2 \times 6)\ell\sigma - mg = 0 \quad ; \quad m = \frac{12\sigma\ell}{g}$$

با جایگزینی مقادیر کشش سطحی (σ) و سطح تماس هر کدام از پاها با آب (ℓ) در رابطه‌ی بالا، مقدار جرم آن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$m = \frac{12(0.0734 N/m)(0.005 m)}{(9.81 m/s^2)} = \underline{\underline{4.99 \times 10^{-4} kg}}$$

مسائل ۱-۶۵

الی ۱-۶۸

مویستگی

از نتایج جالب دیگر کشش سطحی، اثرات مویستگی^۱ است. هنگامی که لوله‌ای با قطر کم درون مایع قرار داشته باشد، بالا آمدن یا پایین رفتن سطح مایع در یک لوله با قطر کم مویستگی است. بالا آمدن نفت چراغ از فتیله‌ی نخ‌ی که در درون مخزن نفت خام چراغ قرار دارد، ناشی از اثر مویستگی است. بالا آمدن آب از ریشه‌ی درختان به بالای آن‌ها نیز در اثر مویستگی است.

به طور معمول دیده می‌شود که انحناى آب نزدیک به کناره‌ها که با شیشه در تماس است، کمی به طرف بالا است، شکل (۱-۲۷-الف). لیکن در جیوه به طور برعکس، انحنا به طرف پایین است، شکل

۱- Capillary

(۲۷-۱-ب). اثرات این پدیده چنین بیان می‌شود که آب سطح شیشه را با چسبیدن به آن خیس می‌کند، ولی جیوه سطح شیشه را خیس نمی‌کند. قدرت اثرات مویینگی توسط **زاویه تماس^۱** مشخص می‌شود. زاویه‌ی تماس (ϕ) زاویه‌ای است که خط مماس بر سطح مایع در نقطه تماس، با سطح جامد می‌سازد. نیروی کشش سطحی در راستای خط مماس به طرف سطح جامد است. اگر برای مایعی $\phi < 90^\circ$ (مانند آب) باشد، آن را **خیس‌شدنی^۲** می‌نامند. برای مایه‌هایی که $\phi > 90^\circ$ (مانند جیوه) است، آن را **خیس‌نشدنی^۳** می‌نامند. در آتمسفر، زاویه‌ی تماس آب با ظرف تقریباً نزدیک صفر است. از آنجایی که جهت نیروی کشش سطحی در پیرامون ترشده‌ی آب با شیشه به طرف بالا است، بنابراین این نیرو آب را به سمت بالا می‌کشاند و آب تا جایی بالا می‌آید که وزن مایع در بالای سطح مخزن با نیروی کشش سطحی برابر شود. لازم به ذکر است که زاویه‌ی تماس جیوه برابر با 130° و برای نفت چراغ این زاویه حدود 26° است [۳].

پدیده‌ی مویینگی به لحاظ میکروسکوپیکی نیز می‌تواند مطالعه شود. دو دسته نیروی چسبندگی بر ملکول‌های مایع واقع در سطح مشترک مایع با شیشه وجود دارد. دسته‌ی اول نیروهای چسبندگی است که از طرف ملکول‌های کناری مایع بر این ملکول‌ها وارد می‌شوند و دسته‌ی دوم مربوط به چسبندگی بین ملکول‌های مایع و شیشه است. چنانچه نیروی چسبندگی بین ملکول‌های مایع و شیشه از نیروی چسبندگی بین ملکول‌های مایع بیشتر باشد، ملکول‌های مایع به جداره‌ی شیشه چسبیده و بالا می‌آیند، درست شبیه آنچه در مورد آب اتفاق می‌افتد.

برای محاسبه‌ی مقدار بالاآمدگی آب در لوله‌ی مویین، بایستی ابتدا مطابق شکل (۲۸-۱)، وزن ستون سیال مشخص شود. وزن ستون سیال بالای سطح آزاد مایع به صورت زیر به دست می‌آید:

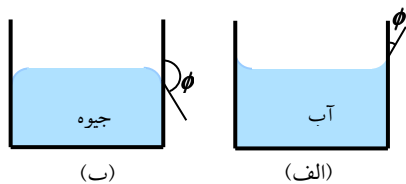
$$W = mg = \rho \forall g = \gamma(\pi R^2 h) \quad (1-41)$$

با مساوی قرار دادن مؤلفه‌ی قایم نیروی کشش سطحی با وزن، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$W = F_\sigma \cos \phi \quad ; \quad \gamma(\pi R^2 h) = 2\pi R \sigma \cos \phi \quad (1-42)$$

$$h = \frac{2\sigma}{\gamma R} \cos \phi \quad (1-43)$$

از رابطه‌ی (۱-۴۳) برای مایعات خیس‌نشدنی مانند جیوه نیز استفاده می‌شود. در این مایعات $\phi > 90^\circ$ و در نتیجه $\cos \phi < 0$ می‌شود. بنابراین، مقدار h منفی به دست می‌آید که نشان‌دهنده‌ی افت سطح مایع در لوله‌ی مویین است.

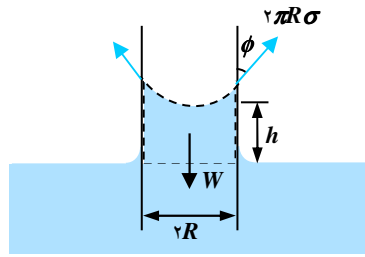


شکل ۱-۲۷ زاویه‌ی تماس؛
الف) آب، ب) جیوه.

۱- Contact angle

۲- Wetting

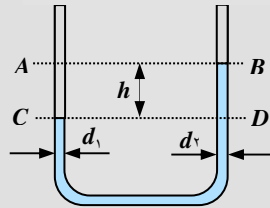
۳- Non-wetting



شکل ۱-۲۸ نیروهای اعمالی بر ستون سیال بالا آمده در اثر خاصیت موینگی.

همان طور که از رابطه ی (۱-۴۳) مشخص است، مقدار بالا آمدگی مایع در لوله ی موین، با شعاع لوله به صورت معکوس متناسب است. یعنی در لوله های نازک میزان بالا آمدگی (یا پایین افتادگی) مایع بیشتر است. در عمل چنانچه قطر لوله از ۱۰ میلی متر بیشتر باشد، می توان از اثرات موینگی صرف نظر کرد. همچنین، مقدار بالا آمدگی مایع در لوله های موین با چگالی مایع به طور معکوس متناسب است و لذا سیال های سبک تر تا ارتفاع بیشتری در لوله ی موین بالا می روند [۳].

مثال ۱-۱۴: محاسبه مقدار بالا آمدگی آب در لوله ی U شکل موین.



یک لوله U-شکل از دو لوله ی موین با قطر ۱ و ۱/۵ میلیمتر تشکیل شده است. لوله به صورت قائم قرار گرفته و درون آن آب با کشش سطحی 0.075 N/m و با زاویه ی تماس صفر درجه وجود دارد. با توجه به اثر موینگی میزان اختلاف سطح آب در دو لوله، h را محاسبه کنید.

پاسخ:

مقدار کشش سطحی در لوله با قطر d_1 و d_2 به ترتیب برابر با $\pi d_1 \sigma$ و $\pi d_2 \sigma$ است و جهت اثر نیرو نیز به سمت بالا است. تفاوت دو نیروی کشش سطحی بایستی با وزن ستون سیال برابر باشد. این اختلاف سطح از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\pi d_2 \sigma - \pi d_1 \sigma = \frac{\pi d_2^2}{4} (\gamma h) \quad ; \quad h = \frac{4(d_2 - d_1) \sigma}{\gamma d_2^2}$$

با جایگزینی مقادیر کشش سطحی و قطر لوله ها در رابطه ی بالا، مقدار h به صورت زیر محاسبه می شود:

$$h = \frac{4[(1.5 \text{ mm}) - (1 \text{ mm})](0.075 \text{ N/m})}{(9810 \text{ N/m}^3)(0.0015 \text{ m})^2} \quad ; \quad \underline{\underline{h = 6.8 \text{ mm}}}$$

