



هیدرولیک لوله‌ها و مجاری بسته

(رشته مهندسی آب)

دکتر مهدی کرمی مقدم دکتر مهدی نورزاده حداد

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخشنودی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاوردهای انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «إِقْرَأْ وَرَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار	یازده
فصل اول: یادآوری مباحث مکانیک سیالات	۱
هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری	۱
مقدمه	۱
۱-۱ تبدیل واحد	۲
۲-۱ سیال	۴
۳-۱ خواص سیال	۵
۱-۳-۱ لزجت	۵
۲-۳-۱ جرم مخصوص، وزن مخصوص، چگالی و فشار	۶
۴-۱ استاتیک سیالات (سکون سیالات)	۹
۱-۴-۱ فشار	۹
۲-۴-۱ نیروی وارد بر سطوح تخت یا مسطح	۱۲
۳-۴-۱ نیروی وارد بر سطوح منحنی	۲۰
۵-۱ دینامیک سیال (جریان سیال)	۲۶
۱-۵-۱ معادله پیوستگی	۲۶
۲-۵-۱ معادله برنولی	۲۸
۳-۵-۱ معادله مومنتم (اندازه حرکت)	۳۳
خلاصه فصل اول	۳۷
خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول	۳۸

۴۳	فصل دوم: طبقه‌بندی و شناخت هیدرولیک جریان در مجاری تحت فشار
۴۳	هدف کلی
۴۳	هدف‌های یادگیری
۴۳	مقدمه
۴۴	۱-۲ جریان آرام (ورقه‌ای) و آشفته (درهم یا متلاطم)
۵۰	۲-۲ جریان یکنواخت و غیریکنواخت
۵۱	۳-۲ جریان دائمی (پایدار یا ماندگار) و غیردائمی (ناپایدار یا غیرماندگار)
۵۲	۴-۲ جریان ایده‌آل (غیرلزج) و حقیقی (لزج)
۵۲	۵-۲ ناحیه ورودی و جریان کاملاً توسعه‌یافته
۵۵	۶-۲ جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته
۵۵	۱-۶-۲ معادله توزیع سرعت در جریان آرام
۵۶	۲-۶-۲ معادله افت فشار در جریان آرام
۵۸	۳-۶-۲ تنش برشی
۶۵	۷-۲ جریان آشفته کاملاً توسعه‌یافته
۶۶	۱-۷-۲ توزیع سرعت در جریان آشفته
۷۰	۲-۷-۲ تنش برشی در جریان آشفته
۸۳	خلاصه فصل دوم
۸۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۹۱	فصل سوم: افت در لوله‌ها و کاربرد آن در قوانین هیدرولیک
۹۱	هدف کلی
۹۱	هدف‌های یادگیری
۹۱	مقدمه
۹۲	۱-۳ افت طولی یا اصطکاکی (h_L)
۹۹	۲-۳ افت موضعی
۱۰۴	۳-۳ کاربرد افت در معادله برنولی
۱۰۶	خلاصه فصل سوم
۱۰۶	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم

فصل چهارم: اصول طراحی لوله‌های انتقال آب و شبکه‌های آبرسان (سیستم‌های

چندلوله‌ای و اتصال مخازن)

۱۱۵

هدف کلی

۱۱۵

هدف‌های یادگیری

۱۱۵

مقدمه

۱۱۵

۴-۱ سیستم چندلوله‌ای

۱۱۶

۴-۱-۱ سیستم چندلوله‌ای سری

۱۱۶

۴-۱-۲ سیستم چندلوله‌ای موازی

۱۱۸

۴-۱-۳ سیستم چندلوله‌ای مختلط

۱۲۶

۴-۲ سیستم اتصال مخازن

۱۲۷

۴-۳ اتصال لوله‌ها به روش شبکه‌ای (حلقه)

۱۳۶

۴-۳-۱ سیستم شبکه‌ای با حلقه داخلی (روش هاردی کراس)

۱۳۷

۴-۳-۲ سیستم شبکه با شبه‌حلقه

۱۴۴

۴-۴ اصول طراحی لوله‌های انتقال آب و شبکه‌های آبرسانی

۱۴۵

۴-۴-۱ اندازه فشار در نقاط مختلف شبکه

۱۴۵

۴-۴-۲ میانگین سرعت و انتخاب قطر لوله

۱۴۷

خلاصه فصل چهارم

۱۴۸

خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم

۱۴۹

فصل پنجم: آشنایی با ماشین‌های آبی (توربوماشین‌ها) و وسایل اندازه‌گیری دبی

جریان

۱۵۳

هدف کلی

۱۵۳

هدف‌های یادگیری

۱۵۳

مقدمه

۱۵۳

۵-۱ توربوماشین

۱۵۴

۵-۲ تقسیم‌بندی پمپ

۱۵۸

۵-۲-۱ پمپ دینامیکی

۱۵۸

۵-۲-۲ پمپ جابه‌جایی مثبت

۱۶۰

۵-۳ منحنی‌های تئوری و واقعی هد برحسب دبی

۱۶۱

۵-۴ منحنی‌های پمپ گریز از مرکز

۱۶۳

۵-۴-۱ منحنی هد برحسب دبی ($h_p - Q$)

۱۶۳

۱۶۶	۲-۴-۵ منحنی توان برحسب دبی ($W_p - Q$)
۱۶۶	۳-۴-۵ منحنی راندمان برحسب دبی ($\eta - Q$)
۱۶۸	۴-۴-۵ منحنی هد خالص مثبت مکش برحسب دبی ($NPSH - Q$)
۱۷۲	۵-۵ منحنی سیستم و نقطه بهره‌برداری
۱۷۲	۱-۵-۵ تک‌پمپ
۱۷۶	۲-۵-۵ پمپ‌های موازی
۱۷۷	۳-۵-۵ پمپ‌های سری
۱۸۰	۶-۵ قوانین تشابه
۱۸۱	۱-۶-۵ تأثیر تغییرات دور پمپ
۱۸۲	۲-۶-۵ تأثیر تغییرات ابعاد
۱۸۲	۳-۶-۵ سرعت مخصوص
۱۸۳	۷-۵ اندازه‌گیری دبی جریان در لوله‌ها
۱۸۴	۱-۷-۵ اُریفیس
۱۸۶	۲-۷-۵ نازل
۱۸۷	۳-۷-۵ ونتوری‌متر
۱۸۸	۴-۷-۵ رتامتر
۱۸۹	۵-۷-۵ توربین‌متر
۱۸۹	۶-۷-۵ دبی‌سنج ماورای صوت
۱۹۰	۷-۷-۵ دبی‌سنج حجمی
۱۹۲	خلاصه فصل پنجم
۱۹۲	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۱۹۹	فصل ششم: جریان غیرماندگار (غیردائمی)
۱۹۹	هدف کلی
۱۹۹	هدف‌های یادگیری
۱۹۹	مقدمه
۲۰۰	۱-۶ جریان غیرماندگار تراکم‌ناپذیر
۲۰۱	۱-۱-۶ جریان غیردائمی تدریجی بین دو مخزن با ارتفاع متغیر
۲۰۸	۲-۱-۶ جریان غیردائمی تدریجی به‌هنگام عبور سیال از شیر
۲۱۱	۲-۶ جریان غیردائمی و تراکم‌پذیر (ضربه قوچ)
۲۱۲	۱-۲-۶ مشخصه‌های مختلف موج در اثر ضربه قوچ

۲۱۵	۲-۲-۶ انواع موج
۲۱۵	۳-۲-۶ بررسی تغییرات فشار
۲۱۶	۴-۲-۶ بستن سریع و تدریجی شیر
۲۱۸	۵-۲-۶ سرعت پیشروی موج
۲۱۹	خلاصه فصل ششم
۲۲۰	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۲۲۷	پاسخ‌نامه
۲۵۷	پیوست
۲۵۷	پیوست ۱. منحنی مشخصات پمپ‌های گریز از مرکز افقی
۲۶۹	پیوست ۲. ضرایب تبدیل واحد از سیستم
۲۷۱	پیوست ۳. مشخصات برخی از سیالات
۲۷۳	منابع

پیشگفتار

علوم و اطلاعات و جنبه‌های تئوری و عملی آن به سرعت روبه‌افزایش است و علوم مربوط به مهندسی آب از این قاعده مستثنی نیست و لزوم توسعه آن در سطح کشور به‌خوبی احساس می‌شود. توجه به منابع آب و انتقال آن از مخازن سد به شهرها و یا از شهری به شهر دیگر جهت تأمین نیازهای شربی، کشاورزی، صنعتی و.... همواره به‌عنوان ضرورت مورد توجه بوده است. با بررسی برخی از پروژه‌های انتقال آب که در گذشته اجرا شده‌است، به این نکته پی می‌بریم که تنها به کاهش سرمایه‌گذاری اولیه تأسیسات مختلف این پروژه‌ها توجه شده‌است. اما امروزه کل هزینه گردش مجموعه شامل سرمایه اولیه، استهلاک و سایر مخارج روزمره نیز موردنظر است، بنابراین آشنایی با اصول طراحی انتقال آب از اهمیت فراوانی برخوردار است.

در این کتاب دانشجویان با روابط و اصول طراحی لوله‌های انتقال آب آشنا می‌شوند. با عنایت به اینکه تسلط بر مباحث مکانیک سیالات و هیدرولیک لوله‌ها مستلزم تمرین و ممارست به نسبت زیادی است، بنابراین سعی شده پس از ذکر مطالب و روابط یک مبحث مشخص، مثال‌های متعددی در آن زمینه ارائه شود. همچنین افزون بر مثال‌های متعدد در حین ذکر مباحث، در پایان هر فصل تمرین‌هایی به‌صورت چندگزینه‌ای ارائه شده و در پایان کتاب پاسخ پرسش‌های هر فصل به‌صورت مفصل ارائه گردیده است. علی‌رغم اینکه سعی شده مطالب این کتاب با حساسیت و دقت بالایی ارائه گردد، اما از آنجاکه تألیف هیچ اثری بی‌نقص نیست، بنابراین از دانشجویان و اساتید گرامی و محترم تقاضا می‌شود که نقایص کتاب را برای مؤلفین این اثر ارسال

فرمایند و همچنین از ارائه هرگونه پیشنهادی در جهت بالابردن کیفیت این اثر دریغ
نفرمایند. در پایان از تمام عزیزانی که ما را در تألیف این کتاب یاری نمودند به‌ویژه
داوران محترم و سرکار خانم دکتر نگار نورمهناد ویراستار علمی این اثر تشکر می‌کنم.
همچنین از همسر عزیزم که باعث دلگرمی من در خلق این اثر بوده، صمیمانه قدردانی
و این اثر را به روح پاک و بلند پدر بزرگ عزیزم مرحوم حاج محمد طاهری تقدیم
می‌کنم.

مهدی کرمی مقدم

فصل اول

یادآوری مباحث مکانیک سیالات

هدف کلی

آشنایی و یادآوری مباحث مهم در بحث مکانیک سیالات

هدف‌های یادگیری

در این فصل دانشجو با مباحث زیر آشنا می‌شود:

۱. تعریف سیال و خواص آن
۲. استاتیک و دینامیک سیال
۳. محاسبه نیروی وارد بر سطوح تخت (افقی، قائم و مایل)
۴. محاسبه نیروی وارد بر سطوح منحنی
۵. معادلات مهم پیوستگی، برنولی و مومنتم و کاربرد آن‌ها

مقدمه

مطالعه سیالات (مایع و گاز) در حالت سکون را استاتیک سیالات و مطالعه سیالات در حال حرکت را دینامیک سیالات می‌گویند. همچنین مطالعه سیالات هم در حالت سکون و هم در حالت حرکت را مکانیک سیالات می‌خوانند.

۱-۱ تبدیل واحد

به لحاظ اینکه ممکن است در این کتاب پارامترهای سیال برحسب واحدهای مختلفی بیان شده باشد و نیز در برخی مواقع لازم است واحد یک پارامتر مشخص مثل فشار، لزجت و... به واحدی دیگر تبدیل شود (مثلاً gr/cm^3 به Kg/m^3 یا واحد لزجت از سیستم متریک Kg/m.s به سیستم انگلیسی slug/ft.s)، در اینجا به نحوه تبدیل واحد پرداخته می‌شود. به‌طور کلی برای تبدیل واحد به‌صورت زیر عمل می‌شود:

مرحله نخست: ابتدا به تعداد واحدهایی که قرار است تبدیل شود، خط کسری در نظر می‌گیریم. مثلاً اگر بخواهیم دو واحد gr و cm^3 را به kg و m^3 تبدیل کنیم، دو خط کسری در نظر می‌گیریم.

مرحله دوم: اگر واحدی که قرار است تبدیل شود در صورت کسر باشد، همان واحد را در مخرج کسر ایجاد می‌کنیم و برعکس هنگامی که واحدی که قرار است تبدیل شود در مخرج کسر باشد، همان واحد را در صورت کسر ایجاد می‌کنیم. (به‌صورت معکوس)

مرحله سوم: واحدهایی که قرار است به آن تبدیل شود در صورت و مخرج قرار می‌دهیم.

مرحله چهارم: رابطه بین دو واحد را در صورت و مخرج قرار می‌دهیم. مرحله پنجم: با توجه به خاصیت ضرب کسرها، واحد یا واحدهایی را که قرار است تبدیل شوند، از صورت و مخرج حذف می‌کنیم.

مرحله ششم: با ضرب مقادیر کسرها تبدیل واحد صورت می‌پذیرد. در قسمت پیوست کتاب ضرایب تبدیل واحد سیستم متریک به سیستم انگلیسی و برعکس آمده است.

مثال ۱-۱: لزجت دینامیکی 5 slug/ft.s را برحسب سیستم متریک kg/m.s تبدیل کنید.

$$\mu = 5 \frac{\text{slug}}{\text{ft.s}}$$

مرحله نخست: چون دو واحد slug (اسلاگ) و ft (فوت) باید به‌ترتیب به kg و

m تبدیل شوند، پس دو خط کسری را در نظر می‌گیریم. $\mu = 5 \frac{\text{slug}}{\text{ft.s}} \times \dots =$

یادآوری مباحث مکانیک سیالات ۳

مرحله دوم: چون واحد ft در منخرج قرار دارد، آن را در کسر اول در صورت ایجاد می‌کنیم. همچنین چون واحد Slug در صورت قرار دارد، آن را در کسر بعدی در منخرج ایجاد می‌کنیم.

$$\mu = 5 \frac{\text{slug}}{\text{ft.s}} \times \frac{\text{ft}}{\text{slug}} \times \frac{\text{slug}}{\text{slug}} =$$

مرحله سوم: واحدهایی که قرار است به آن تبدیل شوند یعنی m و kg را در صورت و منخرج قرار می‌دهیم.

$$\mu = 5 \frac{\text{slug}}{\text{ft.s}} \times \frac{\text{ft}}{\text{m}} \times \frac{\text{kg}}{\text{slug}} =$$

مرحله چهارم: چون 1 slug برابر ۱۴/۵۹ kg و هر ۱ ft برابر ۰/۳۰۴۸ m است، این روابط را در صورت و منخرج کسرها قرار می‌دهیم.

$$\mu = 5 \frac{\text{slug}}{\text{ft.s}} \times \frac{1 \text{ ft}}{0.3048 \text{ m}} \times \frac{14.59 \text{ kg}}{1 \text{ slug}} =$$

مرحله پنجم: با توجه به خاصیت ضرب کسرها واحد یا واحدهایی که قرار است تبدیل شوند، یعنی ft و slug را از صورت و منخرج حذف می‌کنیم.

$$\mu = 5 \frac{\cancel{\text{slug}}}{\cancel{\text{ft}}.s} \times \frac{\cancel{\text{ft}}}{0.3048 \text{ m}} \times \frac{14.59 \text{ kg}}{\cancel{1 \text{ slug}}} =$$

مرحله ششم: با ضرب مقادیر کسرها، تبدیل واحد صورت می‌پذیرد.

$$\mu = \frac{5 \times 14.59}{0.3048 \times 1} \times \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} = 239.34 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$$

مثال ۱-۲: جرم مخصوص ۳ gr/cm³ را برحسب Kg/m³ تبدیل کنید.

با توجه به اینکه ۱ kg برابر ۱۰۰۰ gr و ۱ m³ برابر ۱۰⁶ cm³ است و با توجه به

مطالب یادشده داریم:

$$\rho = 3 \frac{\cancel{\text{gr}}}{\cancel{\text{cm}}^3} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \cancel{\text{gr}}} \times \frac{10^6 \cancel{\text{cm}}^3}{1 \text{ m}^3} = \frac{3 \times 10^6}{1000 \times 1} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 3000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

۲-۱ سیال

همان‌طور که می‌دانیم ماده به یکی از سه حالت جامد، مایع و گاز وجود دارد. بعضی از خواص مایعات موارد زیر را دربرمی‌گیرد. ۱. شکل ظرف را به خود می‌گیرند؛ ۲. در آن‌ها سطح آزاد تشکیل می‌شود (مانند سطح آب در یک جریان)؛ ۳. تراکم‌ناپذیر است؛ ۴. حجم معینی را اشغال می‌کند.

گازها نیز خواصی ویژه‌ای دارند؛ از جمله: ۱. مانند مایعات شکل ظرف را به خود می‌گیرند؛ ۲. در آن‌ها سطح آزاد تشکیل نمی‌شود (مانند پخش شدن گاز در یک اتاق که سطح آزاد مشخصی در آن تشکیل نمی‌شود)؛ ۳. تراکم‌پذیر است؛ ۴. تا وقتی حجم ظرف اجازه دهد منبسط می‌شود.

سیال ماده‌ای است که تحت اثر یک تنش برشی هرچند کوچک، بی‌وقفه تغییر شکل دهد. تنش برشی به نسبت نیروی برشی به مساحت سطح گفته می‌شود و نیروی برشی همان مؤلفه مماسی نیروی وارد به سطح است. با این تعریف می‌توان نتیجه گرفت که فقط مایعات و گازها به‌عنوان سیال شناخته می‌شوند. برای روشن‌تر شدن موضوع فرض کنید مطابق شکل ۱-۱ صفحه‌ای به مساحت A بر روی یک صفحه ثابت قرار داده شده باشد. اگر ماده‌ای در بین دو صفحه قرار داشته باشد و صفحات به فاصله کم y از یکدیگر قرار داشته باشند و صفحه بالایی را با سرعت ثابت u بکشیم، صفحه بالایی به‌طور دائمی حرکت خواهد کرد و نیروی برشی به‌اندازه F و تنش برشی به‌اندازه $\tau = \frac{F}{A}$ به ماده بین دو صفحه وارد می‌شود. با توجه به تعریف سیال، این اتفاق فقط هنگامی رخ می‌دهد که ماده بین دو صفحه، سیال باشد. رابطه نیروی برشی و تنش برشی به‌صورت زیر خواهد بود. (انتظاری، ۱۳۸۰. امیرافشاری، ۱۳۸۹. نبهانی، ۱۳۸۴)

$$F = \mu \frac{u}{y} A \quad \text{نیروی برشی} \quad (1-1)$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{u}{y} \quad \text{تنش برشی} \quad (2-1)$$

F = نیروی برشی (N)

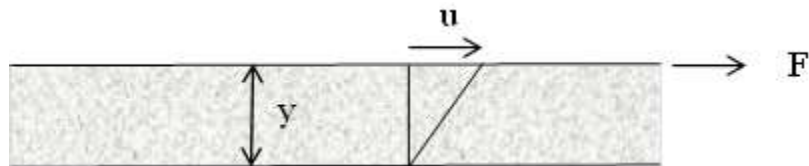
u = سرعت صفحه متحرک (m/s)

y = ضخامت بین دو صفحه (m)

A = مساحت صفحه متحرک (m^2)

τ = تنش برشی (N/m^2 یا Pa)

μ = لزجت دینامیکی یا ویسکوزیته ($Kg/m.s$)



شکل ۱-۱. تغییر شکل ناشی از تنش یا نیروی برشی ثابت

۱-۳ خواص سیال

۱-۳-۱ لزجت

در مطالعه جریان سیال، لزجت نقش قابل توجهی ایفا می‌کند. فرض کنید در شکل ۱-۱ سیال بین دو صفحه، روغن باشد. به حرکت درآوردن صفحه با سرعت ثابت u ، تنش برشی τ و نیروی برشی به اندازه F ایجاد می‌کند و برای اینکه این جسم در آستانه حرکت قرار گیرد، حداقل نیرویی به این مقدار لازم است. حال اگر سیال بین دو صفحه را قیر قرار دهیم و بخواهیم، صفحه را با همان سرعت ثابت u بکشیم، آیا با همان اندازه نیروی F می‌توان این کار را انجام داد؟ جواب منفی است. چرا که در این حالت باید بر نیروی اصطکاک بزرگ‌تری غلبه کنیم و بنابراین احتیاج به نیروی بزرگ‌تری خواهیم داشت. این مسئله به‌خاطر متفاوت بودن خاصیت لزجت بین دو صفحه است. لزجت سیالاتی مانند قیر بسیار بیشتر از سیالاتی مانند آب، هوا یا روغن هستند. بنابراین لزجت خاصیتی است که سیال به‌واسطه آن در برابر حرکت مقاومت می‌کند. با افزایش دما، لزجت سیالات مایع کاهش می‌یابد، مثلاً اگر روغن یا قیر را گرم کنیم لزجت آن‌ها کاهش می‌یابد یا به اصطلاح روان‌تر می‌شوند، حال آنکه لزجت سیالات گاز با افزایش دما، افزایش می‌یابد. این مسئله به‌خاطر تأثیر دو عامل نیروی جاذبه بین مولکولی و تبادل مومنتم مولکولی است. در مایعات فاصله بین مولکول‌ها بسیار نزدیک‌تر از گازهاست. بنابراین نیروی جاذبه بین مولکولی در مایعات بسیار بیشتر از گازهاست و عامل اصلی لزجت مایعات، همین نیروی جاذبه ملکولی است. هنگامی که مایع را گرم

می‌کنیم، نیروی جاذبه مولکولی در آن کاهش می‌یابد، بنابراین لزجت مایع کاهش می‌یابد. ولی در گازها، هنگامی که آن را حرارت می‌دهیم، حرکت مولکول‌ها شدید شده و به یکدیگر برخورد می‌کنند و باعث تبادل مومنتم مولکولی می‌شوند که این مسئله افزایش لزجت گاز را به همراه خواهد داشت. همان‌طور که در روابط ۱-۱ و ۲-۱ نیز مشاهده می‌شود، نیروی برشی و تنش برشی رابطه مستقیمی با لزجت یا ویسکوزیته سیال (μ) دارند. به عبارتی دیگر هر چند سیال لزج‌تر باشد، نیروی برشی و تنش برشی ایجادشده بزرگ‌تر خواهد بود.

۱-۳-۲ جرم مخصوص، وزن مخصوص، چگالی و فشار

هنگامی که می‌خواهیم بدانیم برای نمونه هر سانتی‌متر مکعب (cm^3) یا هر مترمکعب (m^3) آب (یا هر سیال دیگری) چند گرم (gr) یا چند کیلوگرم (kg) است، در واقع به دنبال جرم مخصوص یا دانسیته آب یا آن سیال هستیم. جرم مخصوص یا دانسیته که با ρ نشان می‌دهند، جرم واحد حجم سیال است یا به عبارتی نسبت جرم سیال به حجم سیال.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3-1)$$

با توجه به واحدهای جرم (گرم یا کیلوگرم) و واحد حجم (سانتی‌متر مکعب یا مترمکعب)، واحد جرم مخصوص گرم بر سانتی‌متر مکعب (gr/cm^3) یا کیلوگرم بر مترمکعب (kg/m^3) است. برای نمونه هر مترمکعب آب در دمای 20°C حدود $998/2$ کیلوگرم جرم دارد. بنابراین جرم مخصوص آب در این دما $998/2 \text{ kg/m}^3$ است. حال اگر بخواهیم بدانیم به فرض هر مترمکعب آب (یا هر سیال دیگری) چند نیوتن وزن دارد، در واقع به دنبال وزن مخصوص آب یا آن سیال هستیم. پس وزن مخصوص، وزن واحد حجم یک ماده است یا به عبارتی دیگر نسبت وزن (w) به حجم (V) وزن مخصوص را با γ نمایش می‌دهند.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \frac{m}{V} \times g = \rho g \Rightarrow \gamma = \rho g \quad (4-1)$$

یادآوری مباحث مکانیک سیالات ۷

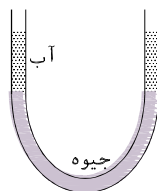
واحد وزن مخصوص، نیوتن بر مترمکعب (N/m^3) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وزن مخصوص رابطه مستقیمی با شتاب جاذبه ثقل (g) دارد و چون در فاصله‌های مختلف از زمین، شتاب جاذبه ثقل متفاوت است، پس وزن مخصوص نیز متفاوت خواهد بود. در دمای $20^{\circ}C$ هر مترمکعب آب ۹۷۸۹ نیوتن وزن دارد، پس وزن مخصوص آب در این دما، $9789 N/m^3$ خواهد بود.

وزن مخصوص نسبی (چگالی نسبی)، به نسبت وزن مخصوص یک سیال (γ) به وزن مخصوص سیال مرجع (γ_o) در دمای $20^{\circ}C$ گفته می‌شود. سیال مرجع برای مایعات آب و برای گازها هواست. اگر بخواهیم بدانیم یک سیال مشخص نظیر جیوه نسبت به آب سنگین‌تر است یا سبک‌تر، در واقع به دنبال چگالی نسبی آن سیال هستیم. چگالی نسبی یک سیال مایع برابر نسبت جرم مخصوص آن سیال به جرم مخصوص آب یا نسبت وزن مخصوص سیال به وزن مخصوص آب است. چگالی را با S نشان می‌دهند و بدون واحد است.

$$S = \frac{\rho_{\text{سیال}}}{\rho_{\text{آب}}} = \frac{\gamma_{\text{سیال}}}{\gamma_{\text{آب}}} \quad (5-1)$$

اگر چگالی سیال بزرگ‌تر از یک باشد به این معناست که وزن مخصوص سیال مایع (γ) بزرگ‌تر از وزن مخصوص آب ($\gamma_{\text{آب}}$) است ($\gamma_{\text{سیال}} > \gamma_{\text{آب}}$) بنابراین سیال موردنظر از آب سنگین‌تر است. برای نمونه چگالی (چگالی نسبی) جیوه حدود $13/6$ است. این بدان معناست که وزن مخصوص جیوه $13/6$ برابر وزن مخصوص آب است. بنابراین جیوه از آب سنگین‌تر است. و اگر هر دو را در داخل یک ظرف (مانومتر) قرار دهیم، جیوه که سنگین‌تر است در پایین قرار خواهد گرفت (شکل ۱-۲).

$$S_{\text{جیوه}} = \frac{\rho_{\text{جیوه}}}{\rho_{\text{آب}}} = \frac{\gamma_{\text{جیوه}}}{\gamma_{\text{آب}}} = 13/6 \Rightarrow \gamma_{\text{جیوه}} = 13/6 \gamma_{\text{آب}}$$



شکل ۱-۲. وضعیت جیوه و آب نسبت به یکدیگر

یکی دیگر از خواص سیال، فشار است. فشار متوسط عبارت است از نسبت نیروی عمودی فشاری وارد بر یک سطح به مساحت آن سطح. فشار در یک نقطه عبارت است از حد نسبت فوق، هنگامی که سطح به سمت صفر (با سطح کوچکی) میل کند. به عنوان مثال اگر بر روی یک صفحه به مساحت یک مترمربع (1 m^2) جسمی به وزن ۵ نیوتن (N) قرار داده شود، فشار متوسط وارد بر این صفحه 5 N/m^2 خواهد بود. واحد فشار N/m^2 یا Pa (پاسکال) است.

$$P = \frac{F}{A} \quad (6-1)$$

F = نیرو یا وزن (N)

A = مساحت (m^2)

P = فشار متوسط (N/m^2 یا Pa)

مثال ۱-۳: اگر $2/2\text{ kg}$ روغن در یک ظرف استوانه‌ای به قطر 20 cm و ارتفاع 30 cm پر شود، مقدار جرم مخصوص روغن برحسب تن بر مترمکعب (ton/m^3)، وزن مخصوص و چگالی روغن را محاسبه کنید.

ابتدا حجم کل ظرف را محاسبه می‌کنیم (۷)

$$V = A \times h = \frac{\pi D^2}{4} \times h = \frac{\pi \times 0.2^2}{4} \times 0.3 = 9.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

بنابراین با توجه به رابطه جرم مخصوص داریم:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{2/2\text{ kg}}{9.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3} = 233.54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

چون در مسئله جرم مخصوص برحسب ton/m^3 خواسته شده است، باید با توجه به مطالب گفته شده در بخش‌های پیشین تبدیل واحد انجام دهیم.

$$\rho = 233.54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1\text{ ton}}{1000\text{ kg}} = \frac{233.54\text{ ton}}{1000\text{ m}^3} = 0.23354 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

برای محاسبه وزن مخصوص از رابطه زیر استفاده می‌کنیم. $g = 9.806\text{ m/s}^2$

$$\gamma = \rho g = 233.54 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2291 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} = 2.291 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

چگالی نیز از رابطه زیر به دست می آید. γ آب برابر 9806 N/m^3 است.

$$S = \frac{\gamma_{\text{روغن}}}{\gamma_{\text{آب}}} = \frac{2291}{9806} = 0.23$$

۴-۱ استاتیک سیالات (سکون سیالات)

۴-۱-۱ فشار

همان طور که گفته شد، فشار متوسط عبارت از نسبت نیروی عمودی فشاری وارد بر یک صفحه به مساحت آن صفحه است.

$$P = \frac{F}{A}$$

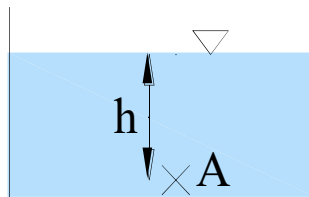
فشار در یک نقطه عبارت است از نسبت حد یادشده هنگامی که مساحت در آن نقطه به سمت صفر میل کند. در یک سیال ساکن، در هر نقطه فشار در تمام جهات یکسان است. ظرفی مانند شکل زیر را در نظر بگیرید. در شکل ۱-۳ اگر نقطه A در فاصله h از سطح سیال ساکن قرار داشته باشد، مقدار فشار در نقطه A بر حسب N/m^2 یا Pa به صورت زیر حاصل می شود.

$$P_A = \gamma h$$

P_A : فشار در نقطه A (N/m^2 یا Pa)

γ : وزن مخصوص سیال (N/m^3)

h: فاصله نقطه A تا سطح سیال (m)



شکل ۱-۳. محاسبه فشار در نقطه A

فشار در یک نقطه از سیال ممکن است به دو صورت بیان شود، یا به صورت ارتفاع معادل یا بر حسب Pa. مثلاً در شکل بالا، اگر سیال آب باشد فشار در نقطه A معادل P_A پاسکال یا معادل h متر آب است.