بسم الله الرحمن الرحیم

به‌نام یکتا مهندس هستی...

درباره کلاس‌ها و آزمون‌های آزمایشی سری عمران بیشتر بدانیم

مؤسسه سری عمران از آغاز شکل‌گیری تاکنون (بیش از ۱۸ سال) با انجام فعالیت‌های آموزشی مختلف و ارائه خدمات متنوع در زمینه آزمون کارشناسی ارشد و دکتری، آزمون نظام مهندسی، آزمون کارشناس رسمی و آموزش نرم‌افزارهای مهندسی عمران، به عنوان برترین مؤسسه تخصصی عمران در سال‌های اخیر مطرح شده است. نشر کتاب‌های باکیفیت که منطبق بر علم روز دنیا می‌باشد، برگزاری کلاس توسط برترین اساتید کشور و نیز برگزاری کنکورهای آزمایشی استاندارد با بیشترین جامعه آماری، همگی سبب شده است تا اعتماد مهندسین عزیز به مؤسسه سری عمران بیشتر شده و هر روز تعداد بیشتری از شما عزیزان به خانوادهٔ بزرگ سری عمران اضافه شوید. عناوین ناشر نمونه سال ۹۱، ناشر تخصصی تقدیر شده در سال ۹۲، ناشر و برند منتخب سال ۹۳، برترین مؤسسه تخصصی در سال ۹۴، برترین برند آموزشی عمرانی کشور در سال ۹۵ و مؤسسه آموزشی برگزیدهٔ سال ۹۶ در جشنواره انفورماتیک ایران به منظور ارائه خدمات غیر حضوری (آنلاین و آفلاین)، و ناشر برگزیده در نمایشگاه بین‌المللی کتاب در سال ۹۷، ۹۹ ، ۱۴۰۱ ، ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ نتیجه اعتماد شما مهندسان عزیز به مؤسسه سری عمران می‌باشد.

امسال نیز همگام با سایر فعالیت‌های مؤسسه، برگزاری کلاس‌های آمادگی کنکور کارشناسی ارشد و دکتری به صورت آنلاین و آفلاین در دستور کار مؤسسه قرار دارد و علاوه بر آن با توجه به تجربه موفق آزمون‌های آزمایشی در سال‌های گذشته برگزاری کنکورهای آزمایشی مرحله‌ای و جامع جهت آمادگی هر چه بیشتر داوطلبین، مورد نظر مؤسسه می‌باشد. هدف مؤسسه سری عمران از برگزاری کلاس‌های آمادگی آزمون کارشناسی ارشد، دکتری و برگزاری کنکورهای آزمایشی، ارتقاء سطح علمی دانشجویان و مهندسان و سپس موفقیت این عزیزان در آزمون است. برخی از ویژگی‌های این خدمات آموزشی که توسط سری عمران ارائه می‌شود به شرح زیر است:

الف) کلاس‌های آمادگی آزمون کارشناسی ارشد و دکتری (آنلاین و آفلاین)

- حضور برترین اساتید کشور
- تدریس کامل و جامع کلیه مطالب درسی، ارائه نکات کنکوری و راه حل‌های سریع جهت پاسخگویی به سؤالات کنکور، حل تست‌های متنوع تألیفی و بررسی سؤالات آزمون‌های سال‌های گذشته
- برگزاری آزمون‌های کلاسی منظم جهت حفظ آمادگی دانشجویان
- کلاس‌های حل تمرین حین دوره و یا پس از آن
- جلسات مشاوره و برنامه‌ریزی درسی توسط گروه مشاوران سری عمران

ب) کنکورهای آزمایشی آزمون کارشناسی ارشد

- طرح سؤالات استاندارد و منطبق بر مطالب و سرفصل‌های کنکورهای سراسری ده سال اخیر که طراحی آنها توسط برترین اساتید کشور صورت می‌گیرد.
- شباهت فراوان سؤالات با سؤالات مطرح شده در کنکورهای سراسری و پیش‌بینی سؤالات احتمالی کنکور
- بالاترین جامعه آماری در کل کشور (بیش از ۲۰۰۰ نفر)
- ارائه خدمات جانبی پس از آزمون مثل مجله مشاوره‌ای، مصاحبه با رتبه‌های برتر و ...
- حضور دانشجویان دانشگاه‌های برتر کشور در این آزمون‌ها

جهت کسب اطلاعات بیشتر لطفاً با شماره تلفن‌های مؤسسه سری عمران ۸۸۳۰۰۴۷۴ - ۸۸۳۱۲۵۲۷ تماس حاصل نموده و یا به سایت www.serieomran.com مراجعه نمائید.

سخن مؤلف

مکانیک سیالات یکی از دروس پایه و بنیادین در بسیاری از رشته‌های مهندسی، از جمله مهندسی عمران است. یادگیری صحیح این درس از اهمیت بالایی برخوردار بوده و نیازمند آموزشی هدفمند، هوشمندانه و مبتنی بر روش‌های نوین می‌باشد. شیوه‌های سنتی آموزش مکانیک سیالات، که امروزه در دانشگاه‌های معتبر جهان کنار گذاشته شده‌اند، نه‌تنها از علاقه‌مندی دانشجویان به این درس می‌کاهند، بلکه در بسیاری از موارد باعث می‌شوند تا مفاهیم آن دشوار و غیرقابل فهم به نظر برسد. در حالی‌که واقعیت این است که مکانیک سیالات، درسی دشوار نیست؛ به شرط آن‌که آموزش آن بر پایه درک مفاهیم بنیادی و حل نظام‌مندِ مسائل متنوع استوار باشد.

پس از تألیف نخستین نسخه از کتاب مکانیک سیالات در سال ۱۳۸۸، بازنویسی آن در سال ۱۳۹۰، و سپس تألیف کتاب نسل جدید مکانیک سیالات، اکنون ویرایش تازه‌ای از این اثر به جامعه مهندسی کشور تقدیم می‌گردد. در این ویرایش، ضمن اصلاح موارد جزئی و به‌روزرسانی محتوای علمی کتاب، سؤالات برگزیده‌ای از آزمون‌های کارشناسی ارشد عمران در پنج سال اخیر (تا آزمون سال ۱۴۰۴) نیز به آن افزوده شده است. ویژگی‌های برجسته این کتاب به شرح زیر است:

۱- بیان ساده و روان مفاهیم: مطالب درسی و نکات کلیدی برای حل مسائل، با بیانی ساده و گام‌به‌گام ارائه شده‌اند. همچنین، طبقه‌بندی و جمع‌بندی مناسب مطالب هر فصل، به درک بهتر و یادگیری پایدارتر دانشجویان کمک می‌کند.

۲- توضیح مفاهیم دشوار: نکات مبهم و چالش‌برانگیز در حل مسائل، با جزئیات و دقت بالا در بخش‌هایی با عنوان «کمی توضیح بیشتر» تشریح شده‌اند تا روند یادگیری کامل‌تر گردد.

۳- تقویت مهارتِ حل مسئله: در پایان درس‌نامه هر فصل، مجموعه تمرین‌هایی با عنوان «افزایش مهارت و تسلط بیشتر» گنجانده شده است تا دانشجویان علاقه‌مند، با حل مسائل نسبتاً دشوار، به بالاترین سطح آمادگی در این درس دست یابند. در ادامه نیز خلاصه‌ای از نکات کلیدی هر فصل آورده شده تا مرور و جمع‌بندی نهایی صورت گیرد.

۴- هماهنگی آموزشی در تمرین‌ها: تمرین‌های این کتاب ترکیبی از مسائل منتخب کتاب‌های روزِ دنیا در مکانیک سیالات و پرسش‌های آزمون‌های کارشناسی ارشد عمران تا آخرین سال برگزاری کنکور هستند و در هماهنگی کامل با سیر آموزشی این جلد از کتاب تنظیم شده‌اند. جلد دوم مجموعه، شامل تست‌های تألیفی و باقی‌مانده پرسش‌های کنکور کارشناسی ارشد است که در جلد اول ارائه نشده‌اند. جلد دوم کتاب با هدف تکمیل روند آماده‌سازی دانشجویان برای آزمون کارشناسی ارشد تدوین شده‌است و مطالعه آن در کنار جلد اول، مهارت و اعتماد به نفس کافی برای پاسخگویی به سؤالات کنکور را فراهم می‌کند.

در تألیف و ویرایش جدید این کتاب، از همراهی و همکاری ارزشمند دوست گرامی جناب آقای مهندس حسین فراهانی بهره‌مند بوده‌ام. ثمره این همراهی، ارائه نسخه‌ای پربارتر و کامل‌تر از گذشته است. بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از ایشان صمیمانه ابراز می‌دارم. در نگارش این اثر تمام تلاش ممکن به‌کار گرفته شده است تا کتابی دقیق و منسجم در اختیار دانشجویان و مهندسان گرامی قرار گیرد، با این حال بروز برخی کاستی‌ها دور از انتظار نیست. از این‌رو، از استادان فرهیخته و مهندسان ارجمند درخواست می‌شود با ارسال نظرات خود به نشانی الکترونیکی serieomran@yahoo.com ما را در بهبود کیفیت اثر یاری فرمایند.

امید است تلاش مجموعه **سری عمران** در تدوین و عرضه این کتاب، مورد رضایت و بهره‌برداری دانشجویان و مهندسان گرامی قرار گیرد.

موفق و پیروز باشید

ساسان امیرافشاری

فهرست

فصل اول

خواص سیالات و قانون لزجت نیوتن

قسمت اول: خواص وزنی و حجمی سیالات ۸
قسمت دوم: مفهوم لزجت و قانون لزجت نیوتن ۱۱
قسمت سوم: کشش سطحی و اثرات آن ۳۳
قسمت چهارم: مباحث تکمیلی ۴۲
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۴۸
خلاصه و جمع‌بندی نکات مهم فصل اول ۵۲

فصل دوم

فشار و روش‌های اندازه‌گیری آن

قسمت اول: مفهوم فشار و عوامل مختلف ایجاد آن ۵۶
قسمت دوم: روش‌ها، قوانین و وسایل اندازه‌گیری فشار ۷۲
قسمت سوم: مباحث تکمیلی ۸۰
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۸۳
خلاصه و جمع‌بندی نکات مهم فصل دوم ۸۶

فصل سوم

نیروی هیدرواستاتیک

قسمت اول: محاسبه نیروی هیدرواستاتیک وارد بر سطوح تخت ۹۰
قسمت دوم: محاسبه نیروی هیدرواستاتیک وارد بر سطوح منحنی ۱۱۲
قسمت سوم: محاسبه نیروی شناوری ۱۳۰
قسمت چهارم: مباحث تکمیلی ۱۴۰
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۱۵۱
خلاصه و جمع‌بندی نکات مهم فصل سوم ۱۵۸

فصل چهارم

تعادل نسبی

قسمت اول: حرکت سیال با شتاب خطی ثابت ۱۶۴
قسمت دوم: حرکت دورانی سیال با سرعت زاویه‌ای ثابت ۱۸۱
قسمت سوم: مباحث تکمیلی ۱۹۵
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۲۰۴
خلاصه و جمع‌بندی نکات مهم فصل چهارم ۲۰۸

فصل پنجم

سینماتیک سیالات

قسمت اول: مفاهیم پایه در سینماتیک سیالات ۲۱۴
قسمت دوم: برخی تعاریف مربوط به جریان سیال و مفهوم دبی ۲۲۰
قسمت سوم: معادله انتقال رینولدز و اصل پیوستگی جریان ۲۳۳

قسمت چهارم: مباحث تکمیلی ۲۴۷
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۲۵۳
خلاصه و جمع‌بندی نکات مهم فصل پنجم ۲۵۶

فصل ششم

اصل انرژی و معادله برنولی

قسمت اول: معرفی معادله برنولی و کاربردهای آن ۲۶۰
قسمت دوم: ماشین‌های هیدرولیکی ۲۸۶
قسمت سوم: مباحث تکمیلی ۲۹۴
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۳۰۰
خلاصه و جمع‌بندی نکات مهم فصل ششم ۳۰۵

فصل هفتم

دینامیک سیالات و اصل اندازه حرکت

قسمت اول: معرفی اصل اندازه حرکت و کاربرد آن براساس مفهوم حجم کنترل ۳۱۰
قسمت دوم: نیروی ناشی از جریان جت سیال ۳۲۴
قسمت سوم: مباحث تکمیلی ۳۴۱
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۳۵۱
خلاصه و جمع‌بندی نکات مهم فصل هفتم ۳۵۵

فصل هشتم

آنالیز ابعادی و قوانین تشابه در مدل‌سازی

قسمت اول: آنالیز ابعادی ۳۵۸
قسمت دوم: قوانین تشابه در مدل‌سازی ۳۶۶
قسمت سوم: مباحث تکمیلی ۳۷۴
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۳۸۰
خلاصه و جمع‌بندی نکات مهم فصل هشتم ۳۸۲

فصل نهم

جریان سیال در مجاری تحت فشار و محاسبات افت انرژی در لوله‌ها

قسمت اول: محاسبه افت انرژی و تنش برشی در لوله‌ها ۳۸۴
قسمت دوم: بررسی سیستم لوله‌های سری و موازی ۴۱۱
قسمت سوم: مباحث تکمیلی ۴۲۲
افزایش مهارت و تسلط بیشتر ۴۳۳
خلاصه و جمع‌بندی نکات مهم فصل نهم ۴۳۹

سری عمران

فصل اول:

خواص سیالات و قانون لزجت نیوتن

مروری بر آنچه خواهیم خواند:

مکانیک سیالات یکی از علوم مهندسی می‌باشد که با فهمیدن خواص سیالات، کاربرد قوانین مکانیک و همچنین انجام آزمایش‌های منظم، شکل گرفته است. در این فصل می‌خواهیم شما را با برخی از خواص سیالات آشنا کنیم که شامل خواص وزنی و حجمی (جرم مخصوص، وزن مخصوص و ...)، لزجت، کشش سطحی و تراکم‌پذیری سیال است. علاوه بر این به هنگام توضیح مفهوم لزجت سیال، قانون لزجت نیوتن و مسائل مربوط به آن را نیز شرح می‌دهیم. بر همین اساس این فصل شامل قسمت‌های زیر می‌باشد:

خواص سیالات و قانون لزجت نیوتن ←

- قسمت اول: خواص وزنی و حجمی سیالات
- قسمت دوم: مفهوم لزجت و قانون لزجت نیوتن
- قسمت سوم: کشش سطحی و اثرات آن
- قسمت چهارم: مباحث تکمیلی

قسمت اول (خواص وزنی و حجمی سیالات)

مقدمه

از فیزیک دبیرستان یا حتی پیش از آن به یاد داریم که سیال به ماده‌ای گفته می‌شود که هرگاه داخل ظرفی قرار بگیرد، شکل آن ظرف را به‌خود خواهد گرفت. در حالت کلی سیالات به دو شکل مایعات و گازها در طبیعت یافت می‌شوند که البته خواص فیزیکی این دو، تا حد زیادی با هم متفاوت است. در این قسمت می‌خواهیم با خواص وزنی و حجمی یک سیال آشنا شویم، از این‌رو بخش‌های مختلف این قسمت را به شرح زیر، به بررسی این خواص اختصاص می‌دهیم:

خواص وزنی و حجمی سیالات ←
- جرم مخصوص (ρ)
- وزن مخصوص (γ)
- حجم مخصوص (V_s)
- چگالی نسبی (S)

توجه کنید که اغلب مباحث این فصل پیرامون مایعات (که کاربرد بیشتری در مهندسی عمران دارند) مطرح می‌شوند، ولی همین خصوصیات برای گازها نیز وجود دارد.

A-۱- جرم مخصوص (ρ)

جرم واحد حجم سیال را **جرم مخصوص (دانسیته** یا **چگالی)** نامیده و آن را با ρ نشان می‌دهیم:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

در رابطهٔ فوق M و V به‌ترتیب جرم و حجم سیال می‌باشند.

تذکر: واحدهای متداول جرم مخصوص عبارتند از kg/m^3، gr/cm^3 و نیز ton/m^3 که می‌توان ارتباط بین آنها را به‌صورت زیر بیان کرد:

$$1\ gr/cm^3 = 1000\ kg/m^3 = 1\ ton/m^3$$

همچنین دیمانسیون این کمیت نیز ML^{-3} می‌باشد.*

A-۲- وزن مخصوص (γ)

وزن واحد حجم سیال، **وزن مخصوص** نامیده می‌شود که آن را با γ نمایش می‌دهیم:

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

در رابطهٔ فوق W و V به‌ترتیب معرف وزن و حجم سیال‌اند.

---

* هر کمیتی را می‌توان براساس نمادهای کمیت‌های اصلی یعنی جرم (M)، طول (L) و زمان (T) نشان داد که به آن دیمانسیون می‌گوییم. در فصل هشتم و در مبحث آنالیز ابعادی با مفهوم و کاربرد دیمانسیون بیشتر آشنا خواهید شد.

زیر شاخه‌های قسمت اول

A-۱- جرم مخصوص (ρ)
A-۲- وزن مخصوص (γ)
A-۳- حجم مخصوص (V_s)
A-۴- چگالی نسبی (S)

لازم به ذکر است واحدهای متداول وزن مخصوص عبارتند از grf/cm^3، kgf/m^3، N/m^3 و نیز kN/m^3 که ارتباط بین آنها به‌صورت زیر است:

$$1\,grf/cm^3 = 1000\,kgf/m^3 \overset{g=9/806\,m/s^2}{=} 9806\,N/m^3 = 9/806\,kN/m^3$$

همچنین دیمانسیون γ نیز به‌صورت $ML^{-2}T^{-2}$ خواهد بود.

تذکر ۱: با توجه به رابطهٔ $W = Mg$، می‌توان ارتباط جرم مخصوص (ρ) و وزن مخصوص (γ) را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{Mg}{V} = (\frac{M}{V})g = \rho g \Rightarrow \boxed{\gamma = \rho g}$$

تذکر ۲: یکی از مهمترین و پرکاربردترین مایعات در مباحث مکانیک سیالات، آب است. در دمای $4^\circ C$ جرم مخصوص آب برابر $\rho_w = 1\,gr/cm^3 = 1000\,kg/m^3$ می‌باشد. همچنین براساس تذکر قبل می‌توان نوشت:

$$\gamma_w = \overset{1000\,kg/m^3}{\rho_w} \times \underset{m/s^2}{g} = 1000\,g\,\frac{\overset{N}{kg.m/s^2}}{m^3} = g\,kN/m^3$$

حال اگر برای سادگی محاسبات $g = 10\,m/s^2$ فرض شود، در آن‌صورت $\gamma_w = 10000\,N/m^3 = 10\,kN/m^3$ خواهد بود. توجه کنید که این فرض ($g = 10\,m/s^2$) در بسیاری از مسائل حاکم بوده و ما اغلب شتاب ثقل (g) را برابر $10\,m/s^2$ درنظر می‌گیریم.

تذکر ۳: برای به‌دست آوردن وزن یک جسم، می‌توان از رابطهٔ وزن مخصوص به شکل زیر استفاده کرد:

$$\gamma = \frac{W}{V} \Rightarrow W = \gamma V$$

همانطورکه ملاحظه می‌کنید با معلوم بودن γ و محاسبهٔ حجم جسم (در صورت امکان)، وزن آن به سادگی قابل محاسبه است.

A-۳- حجم مخصوص (V_s)

عکس جرم مخصوص را **حجم مخصوص** می‌گویند و آن را با V_s نمایش می‌دهیم. به‌عبارت دیگر حجم مخصوص یک جسم، حجمی است که توسط واحد جرم آن جسم اشغال می‌شود:

$$\boxed{V_s = \frac{V}{M} = \frac{1}{\rho}}$$

تذکر: از آنجاکه این کمیت کاربرد بسیار کمی دارد، بیش از این به آن نمی‌پردازیم.

A-۴- چگالی نسبی (S)

نسبت وزن مخصوص یک ماده به وزن مخصوص آب (و یا نسبت جرم مخصوص ماده به جرم مخصوص آب)، **چگالی نسبی (چگالی ویژه)** و یا به اختصار **چگالی** نامیده می‌شود که آن را با S نشان می‌دهیم:

$$\boxed{S = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\rho}{\rho_w}}$$

همانطور که مشاهده می‌کنید چگالی، نسبت دو کمیتِ هم واحد است، بنابراین خود آن بدون واحد خواهد بود.

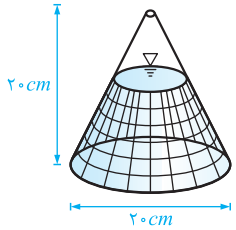
تذکر: در بسیاری از مسائل به‌جای وزن مخصوص یک سیال (یا یک ماده)، چگالی نسبی آن داده می‌شود. در این‌صورت با استفاده از تعریف چگالی نسبی، می‌توانیم به شکل زیر وزن مخصوص آن ماده را به‌دست آوریم:

$$S=\frac{\gamma}{\gamma_w} \Rightarrow \gamma=S\gamma_w$$

به‌عنوان مثال اگر چگالی نسبی روغن $S=۰/۸$ باشد و $\gamma_w=۱۰۰۰۰\ N/m^۳$ در نظر گرفته شود، در آن‌صورت وزن مخصوص آن برابر است با:

$$\gamma_{\text{روغن}}=S_{\text{روغن}}\gamma_w=۰/۸\times۱۰۰۰۰=۸۰۰۰\ N/m^۳=۸\ kN/m^۳$$

تمرین ۱: اگر ۲/۱ کیلوگرم از یک مایع در یک ظرف مخروطی مطابق شکل زیر ریخته شود، نصف ارتفاع ظرف پر می‌شود. مقدار جرم مخصوص این مایع بر حسب $ton/m^۳$ چقدر است؟ همچنین مقدار وزن مخصوص (برحسب $kN/m^۳$) و چگالی نسبی آن را نیز به‌دست آورید. ($\pi\simeq۳$ و $\gamma_w=۱۰\ kN/m^۳$)



حل: ابتدا حجم مخروط ناقص را که محتوی روغن است، به‌دست می‌آوریم:

$$V_{\text{قسمت پر شده}}=V_{\text{کل مخروط}}-V_{\text{قسمت خالی}}=(\frac{۱}{۳}\pi R^۲h)_{\text{کل}}-(\frac{۱}{۳}\pi r^۲h)_{\text{خالی}}$$

$$=\frac{۱}{۳}\pi\times۱۰^۲\times۲۰-\frac{۱}{۳}\pi\times۵^۲\times۱۰=۱۷۵۰\ cm^۳$$

سپس طبق روابط و تعاریف گفته شده، خواهیم داشت:

$$\rho=\frac{M}{V}=\frac{۲/۱\times۱۰^۳}{۱۷۵۰}=۱/۲\ gr/cm^۳=۱/۲\ ton/m^۳$$

$$S=\frac{\rho}{\rho_w}=\frac{۱/۲}{۱}=۱/۲\quad,\quad\gamma=S\gamma_w=۱/۲\times\underbrace{\boxed{۱۰}}_{\gamma_w\ \text{برحسب}\ kN/m^۳}=۱۲\ kN/m^۳$$

قسمت دوم (مفهوم لزجت و قانون لزجت نیوتن)

مقدمه

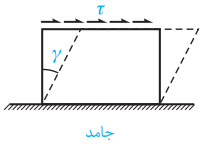
یکی از مهمترین خواص فیزیکی سیالات (به‌خصوص مایعات)، **لزجت (گرانروی یا ویسکوزیته)** می‌باشد که باعث انتقال تنش‌های برشی در لایه‌های مختلف سیال شده و نوعی جریانِ لزج برای مایع ایجاد می‌کند. ما در این قسمت ابتدا شما را با مفاهیم اصلی لزجت آشنا می‌کنیم و سپس با معرفی قانون لزجت نیوتن، چگونگی انتقال تنش برشی در لایه‌های سیال و لغزش لایه‌های یک مایع بر روی هم را بررسی خواهیم کرد. درنهایت نیز ضمن یک دسته‌بندی مناسب، با انواع مسائل لزجت آشنا می‌شویم. دانشجویان عزیز بهتر است بدانید که در این قسمت با مهمترین و پر سؤال‌ترین مبحث از فصل اول مکانیک سیالات روبرو می‌شوید. آنچه در این قسمت می‌خوانید به شرح زیر می‌باشد:

مفهوم لزجت و قانون لزجت نیوتن ←
- تعریف لزجت و آشنایی با مفهوم آن
- انواع لزجت
- قانون لزجت نیوتن
- طبقه‌بندی و بررسی انواع مسائل لزجت

B-۱- تعریف لزجت و آشنایی با مفهوم آن

اگرچه ما در قسمت قبل، تعریف سیال از دورهٔ دبیرستان را به یاد شما آوردیم، ولی باید بدانید که تعریف دقیق و علمی سیال براساس تفاوتش با جسم جامد مطرح می‌شود. یعنی در علم مکانیک سیالات برای تعریف سیال، تفاوت رفتاری آن با جسم جامد در مقابل تنش‌های برشی و نیز تغییرشکل‌های زاویه‌ای (کرنش برشی) ناشی از این تنش‌ها بررسی می‌گردد. برای درک بهتر این موضوع، بهتر است بحث را به‌صورت زیر شروع کنیم:

می‌دانیم وقتی یک جسم جامد تحت اثر تنش برشی قرار می‌گیرد، تغییر شکل محدود و مشخصی از خود نشان می‌دهد، به‌طوری‌که این تغییر شکل پس از مدتی متوقف شده و به عبارتی مستقل از زمان است. پس اگر جزئی کوچک از یک جسم جامد را مطابق شکل زیر در نظر بگیرید، در آن‌صورت خواهید دید در اثر اعمال تنش برشی τ در محدودهٔ الاستیک، تغییر شکل زاویه‌ای γ* در این جسم به وجود می‌آید که مقدار آن از رابطه $\gamma = \frac{\tau}{G}$ قابل محاسبه است.



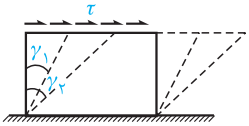
* این γ را با وزن مخصوص سیال اشتباه نگیرید!

زیر شاخه‌های قسمت دوم

B-۱- تعریف لزجت و آشنایی با مفهوم آن
B-۲- انواع لزجت
B-۳- قانون لزجت نیوتن
B-۴- طبقه‌بندی و بررسی انواع مسائل لزجت

حال ممکن است این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که آیا سیالات نیز به هنگام اعمال تنش برشی رفتار مشابهی دارند و اصولاً می‌توان تغییر شکل برشی آنها را مانند جامدات اندازه گرفت؟

پاسخ به این سؤال، تعریف سیال در علم مکانیک سیالات است. در مکانیک سیالات، سیال به ماده‌ای گفته می‌شود که وقتی تحت تنش برشی قرار می‌گیرد (هر چند آن تنش کوچک باشد) دائماً تغییر شکل می‌دهد به نحوی که نمی‌توان تغییر شکل ثابت و مشخصی را در آن مشاهده کرد. به عبارت دیگر تغییر شکل زاویه‌ای (کرنش برشی) در سیالات وابسته به زمان بوده و از لحظه‌ای به لحظهٔ دیگر تغییر می‌کند. شما می‌توانید این موضوع را در شکل مقابل ببینید، جایی که به‌ازای تنش برشی ثابت τ، کرنش برشی در لحظهٔ t_1 برابر γ_1 و در لحظهٔ t_2 برابر γ_2 شده است.



سیال

شاید اکنون از خود بپرسید که وقتی نمی‌توانیم در یک سیال γ را اندازه بگیریم، پس چه چیزی ملاک سنجش تغییر شکل‌ها خواهد بود؟

در جواب این سؤال باید بگوییم، چنانچه کرنش برشی به زمان تقسیم شود، یا دقیق‌تر بگوییم، اگر $\frac{d\gamma}{dt}$ را تعیین کنیم، در آن‌صورت به کمیت مستقل از زمانی خواهیم رسید که به آن **نرخ کرنش برشی** ($\dot{\gamma}$) گفته می‌شود. جالب است بدانید که $\dot{\gamma}$ در سیالات مانند γ در جامدات، قابل محاسبه بوده و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\mu}$$

در رابطهٔ بالا، τ تنش برشی است و μ لزجت (ویسکوزیته یا گرانروی) سیال نامیده می‌شود که عامل انتقال تنش برشی از یک لایهٔ سیال به لایهٔ‌مجاور آن می‌باشد.

بررسی یک موضوع جالب

برای درک بهتر مفهوم لزجت، رابطهٔ $\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\mu}$ را با رابطه $\gamma = \frac{\tau}{G}$ (که مربوط به جسم جامد است) مقایسه می‌کنیم.

در جامدات، G (مدول برشی که در مخرج کسر است) به نوعی عامل مقاوم در مقابل تغییر شکل‌های برشی است، به‌طوری‌که هرچه مقدار G برای جسم جامد بیشتر باشد، به‌ازای یک تنش برشی ثابت، تغییر شکل زاویه‌ای (γ) آن کمتر خواهد بود. به‌همین ترتیب می‌توان لزجت (μ) را نیز عامل مقاوم سیال در مقابل تغییر شکل‌های برشی تعریف کرد و نتیجه گرفت که هرچقدر لزجت یک سیال بیشتر باشد (سیال لزج‌تر باشد)، تحت یک تنش برشی ثابت، نرخ کرنش برشی آن ($\dot{\gamma}$) کمتر خواهد بود. تجسم و مقایسهٔ آب با روغن (که از آن لزج‌تر) است، تصور بهتری در مورد لزجت به شما می‌دهد.

B-۲- انواع لزجت

پس از آشنایی با مفهوم لزجت، اکنون در ادامهٔ بحث خود به معرفی انواع لزجت و نیز عوامل مؤثر بر این خاصیت (در هر دو حالت مایع و گاز) خواهیم پرداخت. انواع لزجت سیال را می‌توان به‌ترتیب اهمیت، به شرح صفحهٔ بعد بیان نمود:

الف) لزجت دینامیکی یا مطلق (μ)

واحدهای متداول لزجت دینامیکی ← $\begin{cases} N.s/m^2 = kg/m.s = Pa.s \\ gr/cm.s = Poise \text{ (پواز)} \end{cases} \xrightarrow{\text{دیمانسیون}} (ML^{-1}T^{-1})$

تبدیل واحد

$Pa.s = 10\ Poise$

ب) لزجت سینماتیکی (ν)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

واحدهای متداول لزجت سینماتیکی ← $\begin{cases} m^2/s \\ cm^2/s = st \text{ (استوک)} \end{cases} \xrightarrow{\text{دیمانسیون}} (L^2T^{-1})$

تبدیل واحد

$1\ m^2/s = 10^4\ cm^2/s$

در مورد لزجت و انواع آن، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱) منظور از لزجت در حالت کلی، لزجت دینامیکی (مطلق) آن است، مگر آنکه صراحتاً به لزجت سینماتیکی اشاره شود. توجه کنید که لزجت سینماتیکی یک کمیت انتزاعی (ساختگی) است که توسط ما تعریف شده است.

۲) لزجت سیال (لزجت دینامیکی) فقط به دما بستگی دارد و ارتباطی با فشار آن ندارد ولی اثر دما بر لزجت در گازها و مایعات متفاوت است. در مایعات لزجت ناشی از جاذبهٔ بین مولکول‌های مایع است، بنابراین افزایش دما که سبب کاهش جاذبه بین مولکول‌های مایع می‌شود، لزجت را کم می‌کند. این در حالی است که در گازها لزجت ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها و تبادل مومنتم بین آنها بوده و در نتیجه افزایش دما با افزودن بر فعالیت مولکول‌ها و بیشتر کردن حرکت تصادفی آنها، سبب بیشتر شدن لزجت می‌شود.

۳) لزجت سینماتیکی در مایعات، به علت ثابت بودن دانسیته، همانند لزجت دینامیکی فقط به دما بستگی دارد، این در حالی است که در گازها لزجت سینماتیکی علاوه بر دما به فشار گاز نیز مربوط می‌شود.

$$\begin{cases} \text{مایعات}: \nu = \dfrac{\mu}{\rho} \qquad (\rho = const) \\ \text{گازها}: \nu = \dfrac{\mu}{\rho} = \dfrac{\mu}{\boxed{\dfrac{P}{RT}}} = \dfrac{\mu RT}{P} \end{cases}$$

فرمول گازهای کامل که در فصل دوم به آن اشاره می‌شود.

تمرین ۲: چگالی نسبی مایعی ۰/۷۸ و لزجت سینماتیکی آن برابر $10^{-6}\ m^2/s$ است. لزجت مایع چقدر است؟

حل:

$$\mu = \rho\nu = S\rho_w\nu = 0/78 \times 1000 \times 10^{-6} = 7/8 \times 10^{-4}\ Pa.s$$

تمرین ۳: با افزایش درجه حرارت، لزجت سیالات چگونه تغییر می‌کند؟ (سراسری - ۹۶)

۱) لزجت مایعات افزایش و لزجت گازها تغییر نمی‌کند.

۲) لزجت مایعات کاهش و لزجت گازها تغییر نمی‌کند.

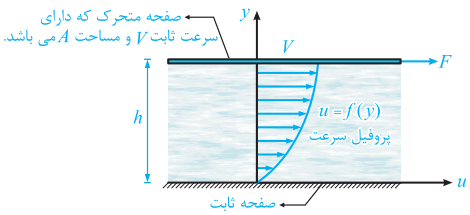
۳) لزجت گازها کاهش و لزجت مایعات افزایش می‌یابد.

۴) لزجت مایعات کاهش و لزجت گازها افزایش می‌یابد.

حل: همانطورکه گفته شد، در مایعات لزجت ناشی از جاذبهٔ بین مولکول‌های مایع است. بنابراین افزایش دما که سبب کاهش جاذبهٔ بین مولکول‌های مایع می‌شود، لزجت را کم می‌کند. این در حالی است که در گازها لزجت ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها و تبادل مومنتم بین آنها بوده و در نتیجه افزایش دما با افزودن بر فعالیت مولکول‌ها و بیشتر کردن حرکت تصادفی بین آنها، سبب بیشتر شدن لزجت می‌شود. بنابراین گزینهٔ (۴) پاسخ صحیح این تست می‌باشد.

B-۳- قانون لزجت نیوتن

برای شروع بحث، مطابق شکل زیر سیالی را در نظر بگیرید که بین دو صفحه موازی و مسطح قرار گرفته است، به‌طوری‌که صفحهٔ پایینی ثابت بوده و صفحهٔ بالایی تحت تأثیر نیروی افقی F، دارای سرعت ثابت V می‌باشد. در چنین شرایطی، یک تنش برشی به اندازهٔ $\frac{F}{A}$ به بالاترین لایهٔ سیال وارد می‌شود که البته این تنش، بین لایه‌های سیال منتقل شده و همانطور که در بخش (B-۱) گفتیم، عامل انتقال آن، لزجت سیال است. در ضمن در این شرایط لایه‌های سیال نیز به حرکت در می‌آیند که سرعت لایه‌ها را با u نشان داده و توسط پروفیل سرعت مشخص می‌شوند.



حال که با شرایط ایجاد و انتقال تنش برشی در یک سیال آشنا شدید، ممکن است این سؤال در ذهن شما ایجاد شود که **مقدار تنش برشی در لایه‌های سیال چگونه تعیین می‌شود؟**

نیوتن به‌طور تجربی و از طریق آزمایش متوجه شد که به هنگام جریان آرام (جریانی که ذرات سیال خطوط مستقیم و موازی را طی می‌کنند) در سیالاتی نظیر آب، روغن، بنزین و هوا، تنش برشی در امتداد جریان با تغییرات سرعت در امتداد عمود بر جریان متناسب است. وی بر همین اساس رابطه معروف خود را برای تعیین تنش برشی به‌صورت زیر ارائه کرد:

$$\tau \propto \frac{du}{dy} \xrightarrow{\text{اعمال ضریب تناسب}} \boxed{\tau = \mu\left(\frac{du}{dy}\right)}$$

در رابطهٔ فوق که به **قانون لزجت نیوتن** معروف است، μ لزجت دینامیکی (مطلق) سیال است* و $\frac{du}{dy}$ نیز که معرف تغییرات سرعت در امتداد عمود بر جریان است، **گرادیان سرعت** نامیده می‌شود.

---

* μ در واقع ضریب تناسب رابطهٔ $\tau \propto \frac{du}{dy}$ می‌باشد.

تذکر ۱: سیالاتی که از قانون لزجت نیوتن تبعیت می‌کنند (مثل آب، روغن و ...) سیالات نیوتنی و سیالاتی که از این قانون تبعیت نمی‌کنند (مثل خون، نشاسته و ...) سیالات غیر نیوتنی نامیده می‌شوند.

تذکر ۲: از مقایسهٔ رابطهٔ $\dot{\gamma}=\frac{\tau}{\mu}$ با رابطهٔ مربوط به قانون لزجت نیوتن می‌توان گفت:

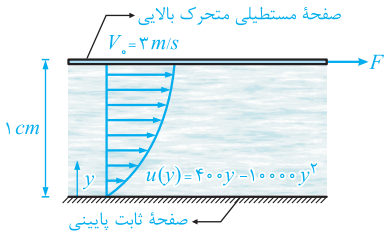
$$\begin{cases}\dot{\gamma}=\dfrac{\tau}{\mu}\\ \tau=\mu(\dfrac{du}{dy}) \Rightarrow \dfrac{du}{dy}=\dfrac{\tau}{\mu}\end{cases} \Rightarrow \boxed{\dot{\gamma}=\frac{du}{dy}}$$

پس $\frac{du}{dy}$ علاوه بر گرادیان سرعت، نشان دهندهٔ نرخ کرنش برشی (نرخ تغییر شکل زاویه‌ای) سیال نیز می‌باشد.

تذکر ۳: با داشتن تابع توزیع سرعت در سیال و به‌کارگیری رابطه قانون لزجت نیوتن می‌توان تنش برشی ایجاد شده در هر لایهٔ دلخواه از سیال را به‌دست آورد. برای این کار کافی است تا مشتق تابع سرعت نسبت به مکان را در محل موردنظر بیابیم و سپس حاصل را در لزجت سیال (μ) ضرب کنیم.

در ادامه با حل دو تمرین جامع، با نحوهٔ محاسبهٔ تنش برشی در سیالات نیوتنی بیشتر آشنا می‌شوید:

تمرین ۴: در شکل روبرو دو صفحهٔ صلب توسط یک سیال با لزجت $\mu=0/06\ kg/m.s$ و ضخامت $1\ cm$ از هم جدا شده‌اند. صفحهٔ پایینی ثابت و بی‌نهایت بزرگ است ولی صفحهٔ بالایی مستطیلی با ابعاد $40\ cm\times 50\ cm$ می‌باشد که تحت اثر نیروی F، با سرعت ثابت $3\ m/s$ به سمت راست در حرکت است. برای این مجموعه:



الف) اگر تابع توزیع سرعت در سیال به‌صورت $u(y)=400y-10000y^2$ باشد، تنش برشی در لایهٔ وسط سیال چند Pa است؟ (در تابع مذکور، $u(y)$ برحسب m/s و y برحسب m می‌باشند.)

ب) تنش برشی را در بالاترین و پایین‌ترین نقطه از سیال تعیین کنید.

ج) مقدار نیروی F برای ایجاد حرکت ذکر شده در صفحهٔ بالایی را به‌دست آورید.

حل:

الف) برای یافتن تنش برشی در لایهٔ وسط سیال ($y=0/5\ cm$) طبق قانون لزجت نیوتن می‌توان نوشت:

$$\tau_{(y=0/5\ cm=5\times10^{-3}\ m)}=\mu\left.\frac{du}{dy}\right]_{y=5\times10^{-3}}=0/06\times(400-20000y)\Big]_{y=5\times10^{-3}}$$

$$=0/06\times(400-20000\times5\times10^{-3})=18\ Pa$$

ب) مشابه قسمت (الف) تنش برشی در بالاترین ($y=1\ cm$) و پایین‌ترین ($y=0$) نقطه از سیال نیز به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\tau_{(y=1\ cm=0/01\ m)}=\mu\left.\frac{du}{dy}\right]_{y=0/01}=0/06\times(400-20000y)\Big]_{y=0/01}=0/06\times(400-20000\times0/01)=12\ Pa$$

$$\tau_{(y=0)}=\mu\left.\frac{du}{dy}\right]_{y=0}=0/06\times(400-20000y)\Big]_{y=0}=0/06\times(400-0)=24\ Pa$$

ج) برای تعیین مقدار نیروی F که بر صفحهٔ بالایی وارد می‌شود، با توجه به ثابت بودن سرعت این صفحه، رابطهٔ تعادل نیروهای وارد بر صفحهٔ مذکور را در راستای افق درنظر می‌گیریم. همانطور که در شکل نیز دیده می‌شود، علاوه بر نیروی F، یک سری تنش برشی نیز از طرف سیال بر زیر صفحه اثر می‌کنند که می‌خواهند به‌نوعی جلوی حرکت آن را بگیرند. از این‌رو می‌نویسیم:

$$\sum F_x = ۰ \Rightarrow F = \tau A = \underbrace{\left[\mu\left(\frac{du}{dy}\right)\right]_{y=۰/۰۱}}_{\text{طبق قسمت (ب)} = ۱۲\,Pa} \times A$$

$$\Rightarrow F = (۱۲)(۰/۴ \times ۰/۵) = ۲/۴\,N$$

توجه کنید که چون معادلهٔ تعادل برای صفحهٔ متحرک بالایی نوشته شده است، بنابراین تنش برشی نیز در مجاورت این صفحه (یعنی نقطهٔ بالای سیال) و به ازای $y = ۰/۱\,m$ ملاک کار است.

کمی توضیح بیشتر

پس از حل تمرین صفحهٔ قبل (تمرین ۴) ممکن است سؤالات زیر در ذهن شما ایجاد شوند:

۱- چرا جهت تنش برشی وارد بر صفحهٔ متحرک در قسمت (ج)، به سمت چپ شده است؟

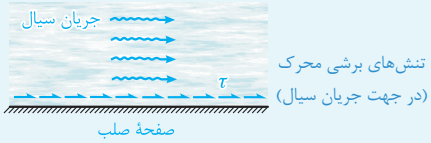
۲- جهت تنش برشی $\tau = ۲۴\,Pa$ در مجاورت صفحهٔ صلب و ساکن پایینی به کدام طرف است؟

۳- آیا می‌توان برای تنش برشی محاسبه شده در قسمت (الف)، یعنی در $y = ۰/۵\,cm$ نیز جهتی مشخص نمود؟

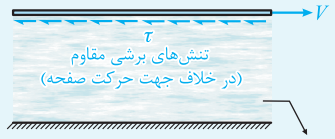
در پاسخ به این سؤالات ابتدا باید بگوییم، هنگامی می‌توان برای تنش برشی جهتی تعیین کرد که سیال در تماس با یک جسم و یا یک سطح صلب و جامد باشد و بخواهد به آن نیروی برشی τA را وارد کند. در این حالت است که تعیین جهت تنش و نیروی برشی معنی پیدا می‌کند. پس برای یک نقطه در لایه‌های میانی سیال (مثلاً $y = ۰/۵\,cm$ در قسمت الف) که صفحهٔ جامدی در آن وجود ندارد، تعیین جهت تنش و نیروی برشی بی‌معنی است. حال اگر بخواهیم در یک سیال با لزجت μ، جهت تنش برشی وارد بر صفحات صلب و جامدی را که در تماس با آن هستند مشخص کنیم، در آن‌صورت می‌توان گفت:

- اگر لغزش لایه‌های سیال بر روی هم (جریان سیال)، تمایل به حرکت دادن صفحه داشته باشند، در آن‌صورت یک سری تنش برشی محرک (در جهت حرکت سیال) به صفحه وارد می‌شود.

این وضعیت در مورد صفحهٔ صلب پایینی از تمرین صفحهٔ قبل برقرار است و همانطور که در شکل می‌بینید، سیال تحت یک عامل دیگر (در این تمرین حرکت صفحهٔ بالایی) به جریان افتاده و **تمایل دارد صفحهٔ پایینی را نیز هم‌جهت با خود به‌حرکت درآورد** (البته نمی‌تواند، چراکه صفحه به زمین چسبیده است). پس تنش برشی هم جهت با جریان یعنی به سمت راست به صفحهٔ صلب وارد می‌شود.



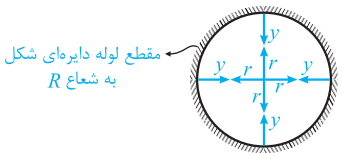
اگر حرکت صفحه باعث حرکت در سیال شده باشد، در آن‌صورت به‌علت خاصیت لزجی، سیال به‌نوعی می‌خواهد جلوی این حرکت را بگیرد و به‌همین علت یک سری تنش برشی مقاوم (در خلاف جهت حرکت صفحه) به آن وارد می‌کند. این وضعیت در مورد صفحهٔ بالایی از تمرین اخیر برقرار است و همانطورکه در شکل می‌بینید، سیالی که در ابتدا ساکن بوده است، **می‌خواهد جلوی حرکت صفحه را بگیرد**، بنابراین یک سری تنش برشی در جهت عکس حرکت صفحه به آن وارد می‌کند.



سیال که در ابتدا ساکن بوده و تحت حرکت صفحه، جریان پیدا می‌کند.

تمرین ۵: در جریان آرام (ورقه‌ای) در یک لولهٔ مدور، پروفیل توزیع سرعت به‌صورت $u = u_{max}(1-\frac{r^2}{R^2})$ می‌باشد که در آن R شعاع لوله، u_{max} سرعت حداکثر در محور لوله و u سرعت جریان در نقطه‌ای به فاصلهٔ r از محور لوله است. تنش برشی حداقل و حداکثر در لوله چقدر بوده و در کجای لوله اتفاق می‌افتد؟

حل: در یک لولهٔ‌مدور چنانچه فاصله هر نقطهٔ سیال از مرکز لوله و جداره را به ترتیب با r و y نشان دهیم، در آن صورت می‌توان رابطهٔ محاسبهٔ تنش برشی را بر حسب r نیز بیان کرد:



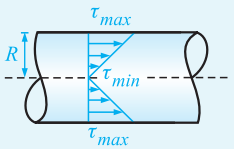
$$\begin{cases} r + y = R \\ dy = -dr \\ \tau = \mu(\frac{du}{dy}) \end{cases} \Rightarrow \tau = -\mu(\frac{du}{dr})$$

$$u(r) = u_{max}(1-\frac{r^2}{R^2})$$

$$\Rightarrow \frac{du}{dr} = u_{max}(0-\frac{2r}{R^2}) = -\frac{2u_{max}}{R^2}r \Rightarrow \tau(r) = -\mu(-\frac{2u_{max}}{R^2})r = \underbrace{\boxed{(\frac{2\mu u_{max}}{R^2})}}_{\text{مقدار ثابت}} r$$

همانطور که ملاحظه می‌کنید، توزیع تنش برشی در لوله به‌صورت خطی (r با درجهٔ یک) بوده و خواهیم داشت:

$$\tau_{max} = \tau_{\underbrace{(r=R)}_{\text{روی جدارهٔ لوله}}} = \frac{2\mu u_{max}}{R} \quad , \quad \tau_{min} = \tau_{\underbrace{(r=0)}_{\text{روی محور لوله}}} = 0$$

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مهم

در جریان آرام (ورقه ای) در لوله‌ها توزیع تنش برشی خطی است، به طوری‌که ماکزیمم آن روی جدارهٔ لوله ($r = R$) و تنش برشی مینیمم نیز در مرکز لوله ($r = 0$) ایجاد می‌گردد. از این‌رو می‌توان شکل تابع توزیع تنش برشی در این حالت را به‌صورت مقابل رسم نمود: