
بسم الله الرحمن الرحيم

شرح جامع

مکانیک سیالات

«مهندسی شیمی»

مولفان: علی خدایاری - امیر مصیبی

انتشارات ارشد

پیشگفتار ناشر

خداوند بزرگ را شاکریم که فرصتی عنایت فرمود تا بتوانیم قدمی در جهت گسترش علم و فرهنگ کشور عزیزمان برداریم و مسیری هموار را در اختیار مخاطبان و داوطلبان علاقمند به ادامه تحصیل قرار دهیم. از آنجائی که درحوزه کتاب‌های درسی و کمک درسی کارشناسی ارشد کتاب‌های زیادی به رشته تحریر در آمده است با این حال وجود یک مجموعه جامع، دقیق، کامل و دارای رفرنس(منابع) مستند احساس می‌شود.

همیشه دغدغه داشتیم که ای کاش می‌شد تمامی منابع پراکنده و گاهاً دست نایافتنی کنکور در یک مجموعه به گونه‌ای جذاب و شیوا آماده می‌شد و همچنین سوالات دوره‌های قبل کنکور نیز به گونه‌ای تشریحی پاسخ داده می شدند، که خدشه‌ای بر آنها وارد نشود و خیال داوطلبان عزیز آنقدر آسوده باشد که اطلاعات مندرج در پاسخنامه‌ها را برای بهره‌گیری در آزمون خود بکار گیرند. این کار با یاری خداوند بزرگ و همکاری نخبه‌ترین دانشجویان و اساتید کشور در انتشارات ارشد هماهنگ گردید و در تمامی مقاطع تحصیلی از کاردانی به کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در حوزهٔ آزمون‌های سراسری – آزاد و پیام نور بسته‌های آموزشی شامل کتاب‌های بانک سوالات و کتاب‌های شرح جامع درس آماده گردید. در تهیه مجموعه‌های فوق‌الذکر از فارغ‌التحصیلان کارشناسی ارشد و دکتری که حائز رتبه‌های تک رقمی کنکور می‌باشند، استفاده کرده‌ایم، تا شما عزیزان بتوانید در راستای افزایش توان علمی خود در جهت نیل به مقصود خویش نایل آیید. بدون تردید می‌توان گفت که برای اولین بار در نظام آموزشی کشور مجموعه‌ای به این سبک عرضه می‌شود که در کیفیت و کمیت بی‌نظیر بوده و تمامی نیازهای دانشجویان و داوطلبان عزیز را پوشش می‌دهد. امید است که استفاده از این مجموعه عزیزان را در جهت موفقیت در آزمون یاری رسانده باشد. در پایان لازم به ذکر است که بی نقصی محض از آن خداوند متعال می‌باشد، بنا براین از تمامی خوانندگان و داوطلبان عزیز خواهشمندیم نظرات سازنده خود را در مورد این کتاب به سایت انتشارات ارشد اعلام نمایند تا ما را در جهت هر چه بهتر آماده کردن این محصولات یاری رسانند.

با تشکر

ناشـــــر

www.arshadbook. ir

پیشگفتار مولف

درس مکانیک سیالات به بررسی رفتار سیالات در حالت سکون و در حال حرکت اشاره دارد. این درس از جمله دروس پایه در رشته‌های مهندسی از جمله مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی، مهندسی معدن، مهندسی عمران، مهندسی نفت، مهندسی هسته‌ای، مهندسی هوافضا و مهندسی پلیمر محسوب می‌شود. به علت اهمیت و متنوع بودن سرفصل‌های موجود، این درس از اهمیت ویژه‌ای در دوران تحصیل دوره کارشناسی و همچنین آزمون کارشناسی ارشد رشته‌های مربوطه را دارد. به روز شدن اطلاعات و همچنین هماهنگ شدن با محتویات کتب مرجع دانشگاه‌های معتبر جهان ما را بر آن داشت تا با بروز کردن مطالب و سرفصل‌های مربوطه، مجموعه جامع و به روز شده‌ای از مکانیک سیالات برای دانشجویان مقطع کارشناسی و هم در آزمون کارشناسی ارشد را فراهم کنیم. در این کتاب سعی شده است تا متن کتاب به صورت تشریحی نگاشته شود تا دانشجویان عزیز بتوانند هم در مقطع کارشناسی و هم در آزمون کارشناسی ارشد از آن استفاده نمایند. همچنین کتاب دیگری نیز در زمینه مکانیک سیالات توسط همین ناشر به چاپ رسیده است که به بررسی آزمون‌های ورودی بیست دوره اخیر مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی در دانشگاه سراسری و آزاد پرداخته که به همراه این کتاب مکمل بسیار خوبی برای داوطلبان آزمون کارشناسی ارشد محسوب می‌شود.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم که تشکر ویژه‌ای از آقای مهندس کامیار امیر انتظاری داشته باشم که همکار بنده در نگارش این کتاب بوده‌اند. همچنین مراتب قدردانی و سپاس خود را از خانم مهندس گلرخ شعبانی اعلام می‌دارم که زحمت ویراستاری ادبی کتاب را بر عهده داشته و زحمات زیادی در نگارش کتاب را متحمل شده‌اند.

از آن جا که هیچ کتابی خالی از اشکال نیست از تمامی دانشجویان و اساتید محترم خواهشمند است که اشکالات تایپی و علمی کتاب حاضر را منت گذاشته و از طریق ناشر یادآور شوند تا در چاپ‌های بعدی کتابی با حداقل اشکالات در اختیار خوانندگان محترم قرار گیرد.

علی خدایاری

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ناشر ۳

فصل اول:کلیات

تجزیه و تحلیل رفتار سیالات ۱۱
اندازه‌گیری‌های جرم و وزن سیالات ۱۲
شکل (۱-۱) ۱۴
تأثیر دما بر هوای ویسکوزیته ۱۴
لزجت سینماتیک ۱۴
ضریب کشسانی حجمی: (مدول بالک) ۱۵
تراکم و انبساط گازها ۱۵
سرعت صوت ۱۶
فشار بخار ۱۶
کشش سطحی و موئینگی ۱۷
موئینگی ۱۷

فصل دوم: آنالیز ابعادی و تشابه

آنالیز ابعادی و تشابه ۲۷
آنالیز ابعادی ۲۷
قضیه پی با کینگهام ۲۸
تعیین گروه‌های بدون بعد ۲۸
گروه‌های بی‌بعد مهم در مکانیک سیالات ۳۰
تشابه ۳۲
تشابه هندسی ۳۳
تشابه سینماتیکی ۳۳
تشابه دینامیکی ۳۳

فصل سوم: استاتیک و سیالات

مقدمه ۴۵
استاتیک سیالات ۴۵
۲-۲ قانون پاسکال ۴۵
۲-۳ معادله اساسی فشار ۴۷

عنوان **صفحه**

۲-۴ تغییر فشار در سیال ساکن ۴۸
۲-۵ اندازه‌گیری فشار ۵۰
۲-۶ نیروی هیدرواستاتیکی وارد بر سطوح غوطه‌ور در سیال ۵۳
نیروی وارده بر سطوح منحنی ۵۵
۲-۷ شناوری، غوطه‌وری و پایداری ۵۵

فصل چهارم: جریان بر روی اجسام غوطه‌ور

جریان بر روی اجسام غوطه‌ور ۶۹
شکل (۴-۲) ۷۰
مفهوم نیروهای درگ و لیفت ۷۰
لایه مرزی در جریان درهم ۸۱
۳-۹ درگ ۸۵
۴-۹ لیفت ۸۶

فصل پنجم: جریان سیالات

مقدمه ۹۹
۵ ـ ۲ تعاریف ۹۹
۵ ـ ۳ قانون بقای جرم ۱۰۱
۵ ـ ۴ تابع جریان ۱۰۲
۴ ـ ۵ اندازه حرکت ۱۰۳
جریان غیر لزج ۱۰۴
معادله برنولی ۱۰۴
پتانسیل سرعت ۱۰۶

فصل ششم: پمپ‌ها

مقدمه ۱۲۱
۶ ـ ۲ انواع پمپ ۱۲۱
۶ ـ ۳ انتخاب پمپ ۱۲۲
۶ ـ ۴ ارتفاع مکش خالص مثبت (Net Positive Suction Head NPSH) ۱۲۴
۶ ـ ۵ کاربرد آنالیز ابعادی در پمپ‌ها ۱۲۴
۶ ـ ۶ به هم بستن پمپ‌ها ۱۲۵

فصل هفتم: حجم کنترل

مقدمه ۱۳۵
قانون بقای جرم ۱۳۵
حالت‌های خاص ۱۳۷
معادله تکانه ۱۳۸
معادله اویلر در امتداد خط جریان ۱۳۸
معادله برنولی ۱۳۹

عنوان **صفحه**

خط تراز انرژی و هیدرولیک ۱۳۹
جریان لزج در داخل لوله‌ها و کانال‌ها ۱۴۱
فشار و تنش برشی ۱۴۲
شکل (۷-۶) ۱۴۳
جریان آرام در لوله ها ۱۴۳
جریان درهم در لوله ها ۱۴۵
شکل (۷-۱۱) ۱۴۷
توزیع سرعت در جریان درهم ۱۴۸
اتلافات موضعی ۱۵۰
جریان در مجراهای غیر دایره‌ای ۱۵۴
سیستم‌های خط لوله ۱۵۴
شکل (۷-۱۹) ۱۵۴
خطوط لوله موازی ۱۵۵
خطوط انشعابی ۱۵۵
خطوط شبکه‌ای ۱۵۶

فصل هشتم: جریان لزج در داخل لوله‌ها و کانال‌ها

مقدمه‌ای بر جریان لزج ۱۷۱
لایه مرزی ۱۷۳
معادلات لایه مرزی ۱۷۴
لایه مرزی آرام ۱۷۵
لایه مرزی آشفته ۱۷۶
خلاصه فصل ۱۷۷

فصل نهم: بسترهای پرشده

مقدمه ۱۸۳
تعاریف ۱۸۳
بررسی سیالیت بستر ۱۸۴

فصل دهم: جریان‌های تراکم‌پذیر

مقدمه ۱۹۳
محاسبه سرعت صوت ۱۹۳
عدد ماخ ۱۹۴
اثر تغییر سطح مقطع بر جریان سیالات تراکم پذیر ۱۹۴

فصل اول

کلیات

عناوین اصلی

- تجزیه و تحلیل رفتار سیالات
- اندازه‌گیری‌های جرم و وزن سیالات
- تأثیر دما بر هوای ویسکوزیته
- لزجت سینماتیک
- ضریب کشسانی حجمی: (مدول بالک)
- تراکم و انبساط گازها
- سرعت صوت
- فشار بخار
- کشش سطحی و موئینگی
- موئینگی

فصل اول

کلیات

مکانیک سیالات علمی است که به بررسی رفتار سیالات (مایعات و گازها)، در حالت سکون و یا حرکت می‌پردازد. این علم پهنه وسیعی از مسائل دنیای پیرامون ما را، در بر می‌گیرد، از قبیل عبور خون در رگ‌هایی خونی به قطر چندین میکرون و جریان نفت و گاز در خطوط لوله انتقال با ابعاد بسیار بزرگ گرفته تا بررسی سطوح بال‌های هواپیما به منظور پرواز بهتر و چگونگی ساخت توپ‌های گلف برای افزایش کارایی آن‌ها در بر می‌گیرد، بدین ترتیب با استفاده از علم مکانیک سیالات به سؤالات پاسخ داده خواهد شد. همانطورکه مطلع‌اید مسائل بسیاری در زمینه سیالات موجود می‌باشد که با توجه به اهمیت نقش مکانیک سیالات در طراحی در آنالیز سیستم‌های مرتبط، این علم می‌تواند به مهندسین کمک شایانی نماید.

به چه چیزی سیال می‌گوییم:

اولین سؤالی که مطرح می‌شود این است که سیال چیست و تفاوت جامد و سیال در چه چیزی می‌باشد؟

همانطور که می‌دانیم جامدات به علت نیروهای بین مولکولی قوی به راحتی تغییر شکل نمی‌یابند، در حالی که سیالات (مایعات، گازها) با کوچکترین نیرویی حرکت کرده و تغییر شکل می‌دهند. بنابر تعریف، سیال ماده‌ایی است که با کوچکترین تنش برشی وارده به آن، به طور پیوسته تغییر شکل یابد. تنش برشی هنگامی ایجاد می‌شود که یک نیروی مماسی بر روی سطح اعمال شود. بنابراین موادی مانند آب، نفت، هوا و .... به عنوان سیال در نظر گرفته می‌شوند. از طرفی موادی همچون خمیر دندان، قیر، بتونه، دوغاب‌ها و ... تا هنگامی تنش برشی کم باشد به عنوان جامد در نظر گرفته می‌شوند ولی هنگامی که این تنش از حد بحرانی فراتر رود، رفتاری سیال گونه از خود نشان می‌دهند. مطالعه‌ی اینگونه مواد را اصطلاحاً رئولوژی (علم جریان و تغییر شکل ماده) گویند که البته در دسته‌بندی مکانیک سیالات کلاسیک قرار نمی‌گیرد.

تجزیه و تحلیل رفتار سیالات

در علم مکانیک سیالات قوانینی استفاده می‌شود که بر گرفته از علوم دیگری است که شاید قبلاً با آن‌ها آشنایی پیدا کرده باشیم. از جمله این قوانین می‌توان به حرکت نیوتن، قانون بقای جرم و قانون اول و دوم ترمودینامیک اشاره نمود. بنابراین شباهت‌های بسیار زیادی میان قوانین حاکم بر اجسام صلب و سیالات وجود دارد که این مسئله کمک بسزایی در فهم رفتار سیالات خواهد نمود.

گستره‌ی موضوعات مکانیک سیالات به دو دسته‌ی استاتیک سیالات (بررسی رفتار سیالات در حالت سکون) و دینامیک سیالات (بررسی رفتار سیالات در حال حرکت) تقسیم می‌شود. که در فصول آینده به بررسی آن‌ها خواهیم پرداخت.

پیش از آغاز لازم است تا خواصی از سیالات را که در این مطالعات مورد نیاز، هستند تعریف نماییم.

اندازه‌گیری‌های جرم و وزن سیالات

دانسیته (جرم حجمی)

دانسیته یک سیال با علامت ρ نشان داده می‌شود و به صورت جرم سیال در واحد حجم تعریف می‌شود. از جمله واحدهای دانسیته می‌توان به $\frac{kg}{m^3}$ در سیستم SI و $\frac{slug}{ft^3}$ در سیستم BG نام برد.

دانسیته تابعی از دما و فشار می‌باشد و در سیالات مختلف می‌تواند بسیار متفاوت باشد. تأثیر دما و فشار بردانسیته مایعات بسیار کم و بر دانسیته گازها زیاد می‌باشد. حجم ویژه (v)، نیز به صورت حجم در واحد جرم تعریف می‌شود و معادل عکس دانسیته می‌باشد:

$$V = \frac{1}{\rho} \qquad (1-1)$$

وزن مخصوص

وزن مخصوص یک سیال با علامت γ (گاما) نمایش داده می‌شود و به صورت وزن در واحد حجم تعریف می‌شود. بنابراین نسبت وزن مخصوص به دانسیته به صورت معادله $\frac{\gamma}{\rho} = g$ بیان می‌شود.

که g شتاب ثقل می‌باشد. همانطور که از دانسیته برای مشخص کردن جرم یک سیال استفاده می‌شود وزن مخصوص نیز برای تعیین وزن یک سیال به کار می‌رود. در BG واحد γ, $\frac{lb}{ft^3}$ و در SI $\frac{W}{m^3}$ می‌باشد. در شرایط استاندارد شتاب ثقل ($g = 32.174\frac{ft}{s^2} = 9/807\frac{m}{s^2}$)، و وزن مخصوص آب در ۶۰°f برابر $62/4\frac{lb}{ft^3}$ و یا $9/80\frac{kg}{m^3}$ می‌باشد.

آب در دارای وزن مخصوص است.

TABLE 1.5
Approximate Physical Properties of Some Common Liquids (BG Units)

Liquid	Temperature (°F)	Density, ρ (slugs/ft³)	Specific Weight, γ (lb/ft³)	Dynamic Viscosity, μ (lb · s/ft²)	Kinematic Viscosity, ν (ft²/s)	Surface Tension,[a] σ (lb/ft)	Vapor Pressure, p_v [lb/in.² (abs)]	Bulk Modulus,[b] E_v (lb/in.²)
Carbon tetrachloride	68	3.09	99.5	2.00 E − 5	6.47 E − 6	1.84 E − 3	1.9 E + 0	1.91 E + 5
Ethyl alcohol	68	1.53	49.3	2.49 E − 5	1.63 E − 5	1.56 E − 3	8.5 E − 1	1.54 E + 5
Gasoline[c]	60	1.32	42.5	6.5 E − 6	4.9 E − 6	1.5 E − 3	8.0 E + 0	1.9 E + 5
Glycerin	68	2.44	78.6	3.13 E − 2	1.28 E − 2	4.34 E − 3	2.0 E − 6	6.56 E + 5
Mercury	68	26.3	847	3.28 E − 5	1.25 E − 6	3.19 E − 2	2.3 E − 5	4.14 E + 6
SAE 30 oil[c]	60	1.77	57.0	8.0 E − 3	4.5 E − 3	2.5 E − 3	—	2.2 E + 5
Seawater	60	1.99	64.0	2.51 E − 5	1.26 E − 5	5.03 E − 3	2.26 E − 1	3.39 E + 5
Water	60	1.94	62.4	2.34 E − 5	1.21 E − 5	5.03 E − 3	2.26 E − 1	3.12 E + 5

[a]In contact with air.
[b]Isentropic bulk modulus calculated from speed of sound.
[c]Typical values. Properties of petroleum products vary.

TABLE 1.6
Approximate Physical Properties of Some Common Liquids (SI Units)

Liquid	Temperature (°C)	Density, ρ (kg/m³)	Specific Weight, γ (kN/m³)	Dynamic Viscosity, μ (N · s/m²)	Kinematic Viscosity, ν (m²/s)	Surface Tension,[a] σ (N/m)	Vapor Pressure, p_v [N/m² (abs)]	Bulk Modulus,[b] E_v (N/m²)
Carbon tetrachloride	20	1,590	15.6	9.58 E − 4	6.03 E − 7	2.69 E − 2	1.3 E + 4	1.31 E + 9
Ethyl alcohol	20	789	7.74	1.19 E − 3	1.51 E − 6	2.28 E − 2	5.9 E + 3	1.06 E + 9
Gasoline[c]	15.6	680	6.67	3.1 E − 4	4.6 E − 7	2.2 E − 2	5.5 E + 4	1.3 E + 9
Glycerin	20	1,260	12.4	1.50 E + 0	1.19 E − 3	6.33 E − 2	1.4 E − 2	4.52 E + 9
Mercury	20	13,600	133	1.57 E − 3	1.15 E − 7	4.66 E − 1	1.6 E − 1	2.85 E + 10
SAE 30 oil[c]	15.6	912	8.95	3.8 E − 1	4.2 E − 4	3.6 E − 2	—	1.5 E + 9
Seawater	15.6	1,030	10.1	1.20 E − 3	1.17 E − 6	7.34 E − 2	1.77 E + 3	2.34 E + 9
Water	15.6	999	9.80	1.12 E − 3	1.12 E − 6	7.34 E − 2	1.77 E + 3	2.15 E + 9

[a]In contact with air.
[b]Isentropic bulk modulus calculated from speed of sound.
[c]Typical values. Properties of petroleum products vary.

چگالی نسبی

چگالی نسبی یک سیال (SG) به صورت نسبت دانسیته سیال به دانسیته آب در شرایط دمایی یکسان و معین تعریف می‌شود. معمولاً دمای تعیین شده $۴^{\circ}C(۳۹/۲^{\circ}F)$ می‌باشد که در این دما چگالی آب $۱/۹۴\frac{slugs}{ft^{۳}}$ یا $۱۰۰۰\frac{kg}{m^{۳}}$ می‌باشد:

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_۲O@۴^{\circ}C}} \qquad (۱-۲)$$

لازم به ذکر است که SG مقداری بدون واحد می‌باشد.

لزجت (ویسکوزیته)

کمیتهای مانند فشار، دما و جرم مخصوص، متغیرهای ترمودینامیکی هستند که از خاصیت‌های یک سیستم به شمار می‌روند. خصوصیتهای دیگری نیز وجود دارند که نمایش دهنده رفتار مکانیکی سیال می‌باشد که از آن جمله می‌توان به لزجت اشاره نمود که تنشهای موضعی یک جزء سیال متحرک را به میزان کرنش وارد بر آن مرتبط می‌سازد. به عبارت دیگر لزجت خاصیتی از سیال است که بواسطه آن، سیال در مقابل تنش برشی مقاومت می‌کند.

لزجت سیالات ناشی از دو عامل نیروی جاذبه به بین مولکولی و تبادل مومنتم مولکولی می‌باشد. در مایعات به دلیل اینکه فاصله مولکولها به یکدیگر کمتر از گازهای می‌باشد، نیروی جاذبه مولکولی بیشتر خواهد بود و به نظر می‌رسد که عامل اصلی لزجت مایعات، نیروی جان بین مولکولی باشد. ولی در گازها میزان جاذبه بین مولکولی بسیار کمتر بوده و نیروی غالب، تبادل مومنتم مولکولی خواهد بود.

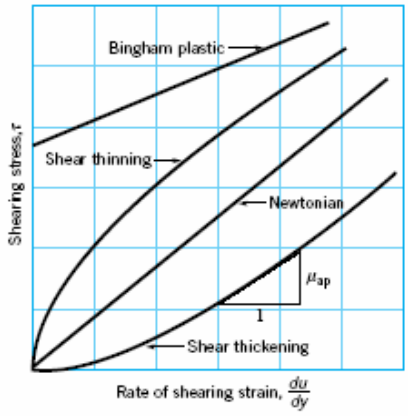
لزجت سیالات تابعی از دما و فشار می‌باشد. بنابراین با افزایش دما، نیروی جاذبه بین مولکولی کمتر شده و در نتیجه لزجت کاهش می‌یابد. در گازها نیروی جاذبه بین مولکولی اهمیت چندانی نسبت به تبادل موفتم مولکولی ندارد، حرکات مولکولی درگازها باعث به وجود آمدن یک تنش برشی ظاهر می‌شود که مقدار آن بسیار بیشتر از تنش برشی ناشی از نیروی جاذبه مولکولی است. بنابراین از آنجا که با افزایش دما، حرکات مولکولی تشدید می‌شود، لزجت گازها نیز با افزایش دما، زیاد می‌شود. در فشارهای معمولی، لزجت سیال مستقل از فشار است و در فشارهای بسیار زیاد نحوه تغییر لزجت گازها و اکثر مایعات با تغییر فشار نامنظم است.

اگر سیال ساکن باشد یا حرکت آن طوری باشد که هیچ لایه‌ای نسبت به لایه کندی خود حرکت نکند هیچ تنش برشی ایجاد نشده و می‌توان گفت که در تمام نقاط سیال $\frac{du}{dy}$ صفر می‌باشد.

بنابراین در استاتیک سیالات تنش برشی را در نظر نمی‌گیریم. لزجت را با μنمایش می‌دهیم که بیان کننده نسبت تنش برشی به تغییرات سرعت می‌باشد.

چون دیمانسیون $y:L,\ x:LT^{-۱},C:FL^{-۲}$ می‌باشد $\mu=\frac{z}{\frac{dx}{dy}}$ با توجه به موارد بیان شده می‌توان گفت که واحد لزجت سینماتیک در سیستم SI. نیوتن – ثانیه بر متر مربع $(\frac{N.S}{m^{s}})$ یا $(\frac{kg}{m.s})$ می‌باشد.

$\frac{N.S}{m^{۲}}$ را می‌توان به صورت پاسکال ثانیه (Pa.s) نیز بیان کرد.



■ FIGURE 1.5 Variation of shearing stress with rate of shearing strain for several types of fluids, including common non-Newtonian fluids.

شکل (۱-۱)

تأثیر دما بر هوای ویسکوزیته

تأثیر دما برای ویسکوزیته توسط دو معادله‌ی تجربی به خوبی تخمین زده می‌شود. برای گازها معادله‌ی ساترلند به صورت:

$$\mu = \frac{CT^{\frac{3}{2}}}{T+S} \qquad (۱-۴)$$

که در آن C و S ضرایب تجربی و T دمای مطلق می‌باشد. بنابراین وقتی ویسکوزیته در دو دمای مشخص باشد. C و S بدست می‌آیند.

و برای مایعات معادله‌ی تجربی زیر را داریم:

$$\mu = De^{\frac{B}{T}} \qquad (۱-۵)$$

که D و B ثابت و T دمای مطلق است و معادله‌ی بالا به معادله‌ی اندراد معروف است.

لزجت سینماتیک

بسیاری از اوقات ویسکوزتیه به صورت ترکیب با چگالی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \qquad (۱-۶)$$

این نسبت ویسکوزیته (لزجت) سینماتیک نامیده می‌شود. بعد آن $\frac{L^2}{T}$ می‌باشد و در سیستم BG واحد آن $\frac{ft^2}{s}$ می‌باشد و در سیستم BG واحد آن $\frac{ft^2}{S}$ و در سیستم SI $\frac{m^2}{s}$ می‌باشد.

ویسکوزیته‌ی دینامیک گاهی اوقات در سیستم GGS (سانتی‌متر- گرم- ثانیه) استفاده می‌شود که واحد $\frac{dyn.s}{cm^2}$ دارد که این ترکیب پویز (Poise) نامیده می‌شود و در این سیستم لزجت سینماتیک دارای واحد $\frac{cm^2}{s}$ است که استوک(stoke) نامیده می‌شود.

ضریب کشسانی حجمی: (مدول بالک)

معمولاً یک سیال مایع به صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود مگر در مواردی که تحت فشار زیادی قرار بگیرد. با تغییر درجه حرارت مسئله تراکم‌پذیری اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. تراکم‌پذیری یک مایع توسط ضریب چگالی حجمی بیان می‌شود. اگر فشار در واحد حجم مایعی به اندازه‌ی dP زیاد شود می‌توان در نظر گرفت که حجم مورد نظر به اندازه dv کاهش خواهد یافت. نسبت $-\frac{dP}{dV}$ را ضریب کشسانی حجمی یا مدول الاستیسیته حجمی می‌نامند و با علامت (K یا E_V) نمایش می‌دهند. برای هر حجمی مانند V از سیال مقدار K از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$E_۲ = K = \frac{-dP}{\frac{dV}{V}} \qquad (۱-۷)$$

چون مقدار $\frac{dV}{V}$ بی‌بعد است می‌توان واحد K را بر حسب فشار بیان نمود. برای آب در دمای $K = ۲۲GPa, ۲۰°C$ است و برای آب، $۴۰°C$، $K = ۳۱۱۰۰۰\frac{lb}{m^۲}$ به دست می‌آید. برای درک بهتر مسئله فرض کنید فشاری مساوی با ۰/۱ MPa (تقریباً یک اتمسفر) بر یک متر مکعب آب اثر کند. در این صورت داریم:

$$-dV = \frac{VdP}{K} = \frac{(۱/۰m^۳)\times(۰/۱MPa)}{۲/۲GPa} = \frac{۱}{۲۲۰۰۰}m^۳ = ۴۵/۵cm^۳$$

وقتی یک مایع فشرده می‌شود مقاومتش در برابر ازدیاد فشار زیاد می‌شود به همین دلیل می‌بینیم که در ۳۰۰۰ اتمسفر مقدار K برای آب دو برابر می‌شود.

بنابراین وقتی که مایع متراکم می‌شود مدول بالک افزایش می‌یابد. ولی مدول بالک در فشارهای اتمسفریک ثابت است. اگرچه می‌توان مدول بالک (که گاهی مدول الاستیسیته‌ی بالک نیز نامیده می‌شود) را برای گازها هم استفاده کرد ولی معمولاً در تعیین خصوصیات مایعات مورد استفاده است.

تراکم و انبساط گازها

وقتی که گازها متراکم یا منبسط می‌شوند ارتباط بین فشار و دانسیته به طبیعت فرآیند بستگی می‌یابد. اگر فرآیند در شرایط ثابت دمایی (ایزوترمال) باشد معادله $\frac{P}{\rho} = cte$ صادق خواهد بود. و اگر فرآیند بی‌اصطکاک و بدون انتقال حرارت (آیزنتروپیک) باشد $\frac{P}{\rho^k} = cte$ خواهد بود که k برابر $\frac{C_P}{Cv}$ می‌باشد. (نسبت ظرفیت‌های گرمایی ویژه در فشار ثابت (C_P) حجم ثابت (C_v)).

بنابراین با برقراری رابطه بین فشار و دانسیته، مدول بالک را برای گازها می‌توان با بدست آوردن مقدار $\frac{dP}{d\rho}$ و جایگذاری در رابطه‌ی مدول بالک بدست آورد.

مثال

یک فوت مکعب هلیوم در فشار مطلق ۱۴/۷ Psi به صورت آیزنتروپیک متراکم می‌شود و به حجم $\frac{۱}{۲}ft^۳$ می‌رسد. فشار نهـایی را حساب کنید؟

حل: در شرایط آیزنتروپیک: $\frac{P_۱}{P_۱^k}=\frac{P_۲}{P_۲^k}$

$$\Rightarrow P_۲=(\frac{P_۲}{P_۱})^k P_۱$$

چون حجم نصف می‌شود بنابراین دانسیته دو برابر می‌شود بنابراین: $P_f=۲^{۱/۶۶}(۱/۴/۷Psi)=۴۶.۵Psi(abs)$

سرعت صوت

نتیجه‌ی دیگر تراکم سیالات اغتشاش‌هایی است که تولید را با سرعت محدود در سیال حرکت می‌کند. برای مثال هنگامی که یـک سیال در یک لوله در جریان است، یک شیر در خروجی مسیر را به طور ناگهانی ببندیم که این حرکت منجر به ایجاد یـک اغتـشاش متمرکز می‌شود، تأثیر بسته شدن شیر فوراً در انتهای جریان احساس نمی‌شود. در واقع یک زمان، محدودی مورد نیاز است تا افزایش فشار ایجاد شده توسط شیر در سیال منتشر شود. مانند یک بلندگو که با یک لرزش یک صفحه‌ی دیافراگم کـه موجـب ایجـاد یـک اغتشاش متمرکز می‌شود و یک تغییر کوچک در فشار ایجاد می‌کند این تغییر فشار نیز در هوا با سرعت ثابت منتشر می‌شود. سرعت انتشار این اغتشاش کوچک را سرعت صوت می‌گویند که تابعی از فشار و چگالی می‌باشد:

$$C=\sqrt{\frac{dP}{d\rho}}=\sqrt{\frac{E_v}{\rho}} \quad \text{(در شرایط آیزنتروپیک)} \qquad (۱-۸)$$

و برای گازها معادله روبرو صادق خواهد بود.

$$C=\sqrt{\frac{KP}{\rho}}=\sqrt{KRT} \qquad (۱-۹)$$

فشار بخار

به دلیل تبخیر سطحی مایعات، فشاری از طرف مولکول‌های بخار که از سطح مایع جدا شده‌اند در فضا ایجـاد مـی‌شـود کـه فشار بخار نامیده می‌شود. اگر این فضا محدود باشد تعداد مولکول‌هایی که در واحد زمان از سطح جدا می‌شـوند بـا تعـداد مولکول‌هایی که به سطح مایع باز می‌گردند برابر می‌شود و تعادل به وجود می‌آیـد. فـشار بخـار یـک سـیال تـابعی از درجـه حرارت سیال است و با زیاد شدن آن افزایش می‌یابد.

هنگامی که فشار روی سطح مایع با فشار بخار مساوی شود مایع به جوش می‌آید بعبارت دیگر اگـر فـشار را بـه مقـدار کافی کاهش دهیم آب در دمای اتاق می‌جوشد.

در اغلب سیستم‌هایی که سیال آن‌ها آب است، احتمال کاهش فشار تا حدی که فشار مساوی یـا کمتـر از فـشار بخـار سیال شود وجود دارد. تبخیر سریع مایع سبب ایجاد پدیده‌ای به نام کاویتاسیون می‌شود. در این پدیده حباب‌های کوچک یا حفره‌هایی تشکیل می‌شوند که سریعاً انبساط یافته و از مکان اولیه‌ی خود به طرف منطقه‌ای که فـشار بیـشتری نـسبت بـه فشار بخار دارد حرکت می‌کنند و در آنجا متلاشی مـی‌شـوند. ایـن فرآینـد تـشکیل انهـدام حبـاب‌هـای بخـار در منطقـه‌ی کاویتاسیون در پمپ و توربین‌های هیدرولیکی سبب خوردگی پره‌ها و فلزات دستگاه می‌شود.

کشش سطحی و موئینگی

اگر یک سوزن را به آرامی روی سطح آب قرار دهیم سوزن در آب فرو نمی‌رود و این پدیده به علت وجود نیروی جاذبه‌ایی است که بین مولکول‌های آب قرار دارد. در واقع در درون مایعات هر مولکولی توسط مولکول‌های دیگر و از طریق جاذبه‌ی مولکولی کشیده می‌شود. به این پدیده کشش سطحی می‌گویند.

انرژی سطحی عبارت است از کار لازم برای بالا آوردن مولکولها به سطح مایع بر واحد سطح. کشش سطحی نیز عبارت است از نیروی کششی لازم برای است با نسبت انرژی سطحی به واحد طول فیلم.

کشش سطحی باعث می‌شود فشار داخل قطرات جت‌های باریک مایع، از فشار محیط بیشتر شود. به عنوان مثال در یک قطره‌ی کروی به شعاع r، فشار داخلی مورد نیاز برای مقابله با نیروی کشش سطحی در شرایطی که نیروهای وارده بر یک جسم آزاد نیم کره را در نظر بگیریم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P\pi r^{2} = 2\pi r\sigma \Rightarrow P = \frac{2\sigma}{V} \qquad (1-10)$$

برای یک جت استوانه‌ایی مایع با شعاع r (در لوله‌ها) داریم:

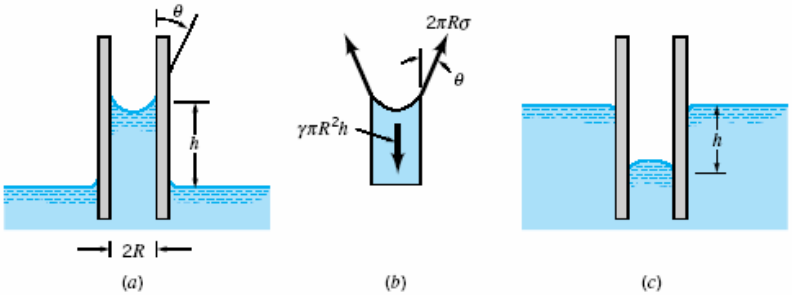
$$P = \frac{\sigma}{r} \qquad (1-11)$$

بنابراین مشاهده می‌کنیم که با کاهش r، P افزایش می‌یابد و در حباب‌ها وقتی P از فشار بخار مایع بیشتر شود حباب می‌ترکد.

در حالت کلی اگر یک سطح اشتراک خمیده را در نظر بگیریم که دارای شعاع‌های انحنای R_1, R_2 باشد به رابطه‌ی زیر می‌رسیم که نشان دهنده‌ی افزایش فشار در سطح مقعر است: (شکل سطح منحنی).

$$\Rightarrow \text{بعد از موازنه‌ی نیروها} \Rightarrow \Delta P = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \qquad (1-12)$$

و قطره‌ی کوچک آب به این علت کروی است که تمایل دارد کمترین سطح ممکن را در یک حجم معین داشته باشد.



■ FIGURE 1.8 Effect of capillary action in small tubes. (*a*) Rise of column for a liquid that wets the tube. (*b*) Free-body diagram for calculating column height. (*c*) Depression of column for a nonwetting liquid.

موئینگی

موئینگی ناشی از کشش سطحی و مقدار نسبی نیروهای چسبندگی و پیوستگی است. نیروی پیوستگی جاذبه مولکولهای مایع به یکدیگر و نیروی چسبندگی یعنی نیروی جاذبه مولکولهای مایع و جامد.

هرگاه یک لوله‌ی نازک را درون مایعی فرو بریم مایع در این لوله بالا یا پایین می‌رود که این پدیده را مـوئینگی گوینـد. اگـر میزان چسبندگی مایع به جامد از پیوستگی (کشش سطحی) مایع بیشتر باشد مانند آب، مایع درون لوله موئین بالا می‌رود و سطح آزاد مایع مقعر خواهد بود و سطح آزاد جیوه محدب خواهد بود.

میزان صعود مایع در یک لوله‌ی شیشه‌ایی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\gamma r} \qquad (1-13)$$

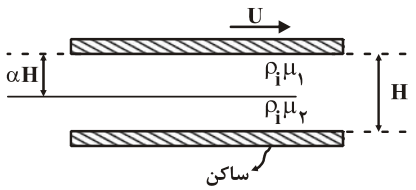
بنابراین اگر $\theta < 90^\circ$ باشد، h مثبت است و اگر $\theta > 90^\circ$ باشد مقدار h منفی است (مایع در لوله پایین می‌رود).

تست‌های آخر فصل

۱- صفحه‌ای به ابعاد $۴m\times ۴m$ در داخل آب با سرعت $v=۱۰\frac{m}{s}$ و با نیروی F کشیده می‌شود. اگر ضخامت آب در دو طرف صفحه ۲cm و ۴ cm باشد، نیروی F را بر حسب N پیدا کنید. (گرانروی آب $\mu=۰/۰۱\frac{gr}{cm.s}$ می‌باشد.)

۱) ۱۰ ۲) ۱۲ ۳) ۱۴ ۴) ۱۶

۲- دو مایع غیرقابل اختلاط با دانسیته یکسان و ویسکوزیته‌های متفاوت فضای بین دو صفحهٔ تخت افقی را پر کرده‌اند و صفحهٔ بالایی با سرعت ثابت U حرکت می‌کند. اگر فاصلهٔ دو صفحهٔ H ، ضخامت مایع اول aH و ضخامت مایع دوم (1-a)H باشد، سرعت سطح تماس دو مایع را محاسبه کنید. در جهت حرکت مایع فشار ثابت است.



۱) $U.\frac{\frac{\mu_۱}{\mu_۲}(۱-a)}{(۱-a)+a\frac{\mu_۱}{\mu_۲}}$

۲) $U.\frac{(۱-a)}{a+(۱-a)\frac{\mu_۱}{\mu_۲}}$

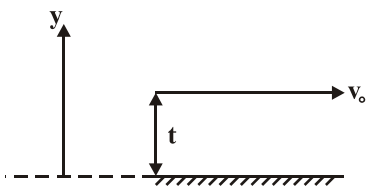
۳) $U.\frac{\frac{\mu_۱}{\mu_۲}(۱-a)}{a+(۱-a)\frac{\mu_۱}{\mu_۲}}$

۴) $U.\frac{a\frac{\mu_۱}{\mu_۲}}{a+(۱-a)\frac{\mu_۱}{\mu_۲}}$

۳- توزیع سرعت جریانی روی یک صفحه به صورت $u=۲y-۲y^۳+y^۴$ بیان شده است. اگر ویسکوزیته سیال $۱۰^{-۳}\frac{kg}{m.s}$ باشد مقدار تنش برشی روی صفحه‌ای که در $y=۰/۱m$ واقع است چند $\frac{N}{m^۲}$ است؟

۱) $۰/۲\times۱۰^{-۳}$ ۲) $۰/۱۹۴۴\times۱۰^{-۳}$ ۳) $۱/۹۴۴\times۱۰^{-۳}$ ۴) ۲×۱۰^{-۳}

۴- در شکل زیر منحنی تغییرات سرعت بین دو صفحه به صورت $v=\frac{v_۰}{t}y$ می‌باشد. نیروی لازم جهت کشیدن صفحه بالائی متناسب است با:



۱) $\frac{v_۰t}{۳}$ ۲) $\frac{۸\mu}{v_۰}$ ۳) $\frac{v_۰}{۳t}$ ۴) $\frac{v_۰\mu}{t}$

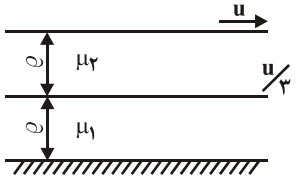
۵- توزیع سرعت یک سیال نیوتنی در داخل لوله‌ای با قطر ۱۰cm به صورت $V = ۲(۱-۳r^{\frac{۲}{۳}})$ می‌باشد. اگر ویسکوزیته سیال ۳cp و طول لوله ۱۰۰ متر باشد، نیروی وارد شده از طرف سیال به جدارهٔ لوله در جهت حرکت جند نیوتن می‌باشد؟

۱) ۰/۵۱۱ ۲) ۱/۰۲۳ ۳) ۱۰۲/۳ ۴) −۱/۰۲۳

۶- سیالی در یک لوله به طول ۳۰ متر جریان دارد. اگر افت بار انرژی در این لوله $۶\frac{N.m}{N}$ باشد، شیب خط تغییرات انرژی (EGL) برابر است با:

۱) ۰/۱ ۲) ۰/۲ ۳) ۰/۳ ۴) ۰/۴

۷- دو سیال مخلوط نشدنی با ضخامت کم و برابر، روی یک سطح ساکن قرار گرفته‌اند. صفحه‌ای که بر روی سیال بالایی قرار دادر با سرعت u حرکت می‌کند. در صورتی که سرعت در سطح تماس دو سیال $\frac{u}{۳}$ باشد ارتباط یسکوزیته دو سیال کدام است؟



۱) $\mu_۱ = \frac{\mu_۲}{۳}$ ۲) $\mu_۱ = \frac{\mu_۲}{۶}$
۳) $\mu_۱ = ۳\mu_۲$ ۴) $\mu_۱ = ۲\mu_۲$

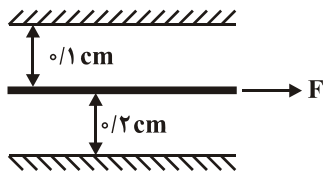
۸- در سیالات شبه پلاستیک (pseudo plastic) با افزایش تنش برشی،ویسکوزیته ظاهری ...

۱) کاهش می‌یابد ۲) تغییر نمی‌کند.
۳) به صورت خطی افزایش می‌یابد. ۴) به صورت نمائی افزایش می‌یابد.

۹- کدام یک از عبارتهای زیر صحیح است؟

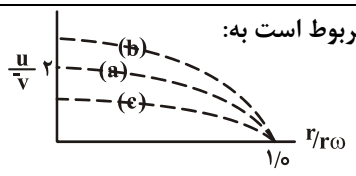
۱) برای کلیه سیالات ویسکوزیته یک خاصیت سیال است.
۲) فقط برای سیال نیوتنی ویسکوزیته خاصیت سیال محسوب می‌شود.
۳) برای سیال نیوتنی ویسکوزیته وابسته به تنش برشی است.
۴) برای سیال نیوتنی ویسکوزیته وابسته به تنش برشی است.

۱۰- صفحه‌ای نازک به مساحت $۲۰cm^۲$ به صورت افقی در داخل یک سیال با ویسکوزیته ۱/۲ سانتی‌پوز کشیده می‌شود. نیروی لازم برای کشیدن صفحه با سرعت $۲۰\frac{cm}{sec}$ بر حسب دین (dyne) برابر است با:



۱) ۷۲ dyne
۲) ۴۸ dyne
۳) ۲۴ dyne
۴) ۸ dyne

۱۱- اگر منحنی (a) نشاندهنده پروفایل سرعت سیال نیوتنی در جریان آرام باشد، پروفایل(b) مربوط است به:



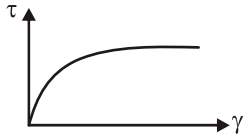
۱) سیال شبیه پلاستیک ۲) سیال Dilatant
۳) سیال Bingham ۴) سیال نیوتنی در جریان درهم

۱۲- کدام گزینه برای تعیین سرعت صوت در یک محیط پیوسته صحیح است؟

P: فشار **ρ: دانسیته سیال** **s: آنتروپی**

۱) $\left(\frac{dp}{ds}\right)_{\rho}^{\frac{1}{2}}$ ۲) $\left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{s}$ ۳) $\left(\frac{dp}{d\rho}\right)_{s}^{\frac{1}{2}}$ ۴) $\left(\frac{dp}{ds}\right)_{\rho}$

۱۳- نوع رفتار سیالی که تغییرات تنش سطحی آن برحسب شدت تنش مطابق زیر باشد، عبارتست از:



۱) نیوتنی
۲) غیر نیوتنی از نوع dilatant
۳) غیر نیوتنی از نوع سود پلاستیک
۴) غیر نیوتنی از نوع بینگهام

۱۴- برای سیالی $\frac{dU}{dy}$ rate of deformation درحسب تنش برشی به صورت جدول زیر داده شده است.

$\frac{dU}{dy}$	0	0.3	0.6	0.9	1.2
τ(kpa)	0	2	4	6	8

۱) سیال نیوتنی است
۲) سیال از نوع Binghan plastic است
۳) سیال از نوع ایده‌آل
۴) سیال غیر نیوتنی است

پاسخ تست‌های آخر فصل

۱- گزینه «۲»

$$\Sigma F = F_1 + F_2$$

که F_1 نیروی وارد بر بخش فوقانی صفحه و F_2 نیروی وارد بر بخش تحتانی صفحه است.

$$\Sigma F = \tau_1 A + \tau_2 A = A(\mu \frac{u_1}{h_1} + \mu \frac{u}{h_2}) = A\mu u(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2})$$

$$\Sigma F = (4\times 4)\times(0/01\times 10^{-1})\times 10(\frac{1}{0/02} + \frac{1}{0/04}) = 12N$$

۲- گزینه «۳»

با توجه به قانون بقای نیرو، تنش های وارد شده بر سیال بالا و پائینی با هم برابراند: $\sum F = 0 \Rightarrow \tau_1 = \tau_2$

و از روی قانون ویسکوزیته سیالات نیوتنی داریم :

$$\tau = -\mu \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

در نتیجه داریم :

$$\tau_1 = -\mu_1 \frac{u - v}{aH} \quad , \quad \tau_2 = -\mu = \frac{v - 0}{(1-a)H}$$

که v سرعت سطح تماس دو مایع است.

$$\tau_1 = \tau_2 \Rightarrow -\mu_1 \frac{u - v}{aH} = -\mu_2 \frac{v - 0}{(1-a)H}$$

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} u = v\left(\frac{a}{1-a} + \frac{\mu_1}{\mu_2}\right) \Rightarrow v = \frac{\mu_1 / \mu_2 (1-a)}{a + (1-a)\frac{\mu_1}{\mu_2}}$$

۳- گزینه «۳»

طبق تعریف تنش داریم :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}\Big|_{y=0/1} = 10^{-3} \times \left(2 - 6y^2 + 4y^3\right)\Big|_{y=0/1}$$

$$= 1/944 \times 10^{-3} \ N/m^2$$

۴- گزینه «۲»

در واقع نیروی لازم بایستی به ازاء تنش سطحی محاسبه شود:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} = -\mu \frac{v_\circ}{t}$$

$$F = \tau A = -\mu \frac{v_\circ}{t} A$$

در نتیجه :

$$F \alpha \mu \frac{v_\circ}{t}$$

۵- گزینه «۲»

$$\tau_\omega = -\mu \frac{dv}{dr}\bigg|_{r=\circ/\circ\Delta} = -\circ/\circ\text{۳۲۵۷}\left(\text{۴}r^{-\frac{\text{۱}}{\text{۳}}}\right)\bigg|_{r=\circ/\circ\Delta} = \circ/\circ\text{۳۲۵۷}\ \frac{N}{m^\text{۲}}$$

$$F = \tau_\omega A = -\mu \text{۲}\pi r L \frac{dv}{dr}\bigg|_{r=\circ/\circ\Delta} = \circ/\circ\text{۳۲۵۷} \times \text{۲}\pi\left(\circ/\circ\Delta\right) \times \text{۱۰۰} = \text{۱}/\circ\text{۲۳}\ N$$

۶- گزینه «۲»

$$\text{شیب خط انرژی} = \frac{\text{افت بار انرژی}}{\text{فاصله}} = \frac{\text{۶}}{\text{۳۰}} = \circ/\text{۲}$$

۷- گزینه «۴»

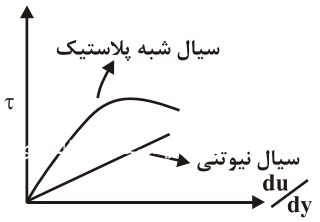
با توجه به اینکه میزان تنش در سطح تماس دو سیال برابر است داریم :

$$\tau_\text{۱} = \tau_\text{۲} \Rightarrow -\mu_\text{۲} \frac{u - u/\text{۳}}{\gamma} = -\mu_\text{۱} \frac{u/\text{۳} - \circ}{\gamma} \Rightarrow \mu_\text{۱} = \text{۲}\mu_\text{۲}$$

۸- گزینه «۱»

برای سیالات Pesudo plastic داریم :

$$\tau = k\left|\frac{du}{dy}\right|^{n-\text{۱}} \frac{du}{dy} = \eta \frac{du}{dy} \qquad n < \text{۱}$$



۹- گزینه «۱»

برای کلیه سیالات، ویسکوزیته یک خاصیت سیال است.

۱۰- گزینه «۱»

نیروی F برابر با مجموع نیروهایی است که از طرف دیواره‌های بالایی و پائینی به صفحه وارد می‌شود:

$$F = F_\text{۱} + F_\text{۲} = \tau_\text{۱} A + \tau_\text{۲} A$$