

فصل اول

خواص سیالات

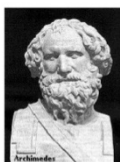
هدف‌های رفتاری

پس از پایان این فصل از دانشجو انتظار می‌رود که:

۱. مفهوم سیالات را بیان کند.
۲. مفهوم پیوستگی سیال را تشریح کند.
۳. تنش برشی را توضیح دهد.
۴. مفهوم لزجت را بیان کند.
۵. قانون لزجت نیوتنی را توضیح دهد.
۶. لزجت دینامیکی و لزجت سینماتیکی را توضیح دهد.
۷. انواع سیالات (سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی) را تشریح نماید.
۸. حجم، چگالی، حجم مخصوص و فشار سیال را توضیح دهد.
۹. گاز کامل و معادله حالت را بیان کند.
۱۰. مفهوم مدول الاستیسیته حجمی (مدول بالک یا ضریب کشسانی حجمی را بیان کند)
۱۱. مفهوم فشار بخار را توضیح دهد.
۱۲. مفهوم کشش سطحی و موینگی را بیان نماید.

۱-۱ مقدمه

مکانیک سیالات یکی از علوم مهندسی است که به بررسی مسائل استاتیکی و دینامیکی سیالات می‌پردازد. تا پیش از قرن بیستم، مطالعه سیالات اساساً بر عهده دو گروه مهندسين هیدرولیک و ریاضی بوده است. مهندسين در زمینه‌های تجربی کار می‌کردند، درحالی که ریاضی دانان صرفاً به جنبه‌های تئوری و تحلیلی می‌پرداختند. محققین برجسته‌ای چون ارشمیدس، داوینچی نیوتن، برنولی، اولر، ناویر، استوک، رینولدز، پранتل، تیلور و فون کارمن دریافتند که مطالعات سیالات باید آمیخته‌ای از تئوری و آزمایش باشد. امروزه در تحقیقات نوین، ریاضیدانان، فیزیک دانان، مهندسين و تکنسین‌های ماهر بصورت گروهی کار کرده و بر حسب ضرورت از هر دو جنبه عملی و تئوری بهره می‌گیرند.



ارشمیدس

(C. ۲۸۷-۲۱۲ BC)



نیوتن

(۱۶۴۲-۱۷۲۷)



لینیتز

(۱۶۴۶-۱۷۱۶)



برنولی

(۱۶۶۷-۱۷۴۸)



اولر

(۱۷۰۷-۱۷۸۳)



ناویر

(۱۷۸۵-۱۸۳۶)



استوکس

(۱۸۱۹-۱۹۰۳)



رینولدز

(۱۸۴۲-۱۹۱۲)



پرانتل

(۱۸۷۵-۱۹۵۳)



تیلور

(۱۸۸۶-۱۹۷۵)

شکل ۱-۱ چهره‌های آشنادر زمینه مکانیک سیالات

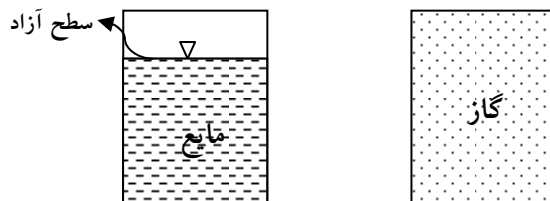
رشته‌های مختلف سیالات عبارتند از: استاتیک، مکانیک، هیدرولیک، ایرودینامیک، سینماتیک و مهندسی کشتی. این رشته‌ها در مکانیک سیالات براساس اصول و قوانین مکانیک (قوانین نیوتن، قوانین ترمودینامیک، و اصول بقاء ماده و انرژی و...) و خواص سیالات (قوانین نیوتن، قوانین معادله حالت، کشش سطحی، تراکم‌پذیری، فشار بخار

و...) بررسی می‌شوند.

ماده به‌طور کلی به سه حالت تقسیم می‌شود: جامد، مایع و گاز. با توجه به اینکه بحث سیالات مربوط به دو حالت مایع و گاز می‌باشد، لذا به بررسی خواص آنها می‌پردازیم.

تفاوت مهم این دو درچگونگی تراکم‌پذیری و نحوه اشغال ظرف می‌باشد. مایعات معمولاً تراکم‌ناپذیر فرض می‌شوند و قسمت پائین ظرف را اشغال کرده و چنانچه ظرف پر نباشد سطح آزاد تشکیل می‌دهند و حجم معینی را اشغال می‌کنند. در حالی که گازها کاملاً تراکم‌پذیر بوده و تغییرات حجم آنجا نسبت به فشار وارده و درجه حرارت زیاد می‌باشد و تا هنگامی که فضا و حجم ظرف اجازه دهد، انبساط می‌یابد و کلیه فضای ظرف را گرفته و سطح آزاد تشکیل نمی‌دهند. شکل (۱-۲)

دو فرق مهم بین مکانیک سیالات و مکانیک جامدات وجود دارد. اول اینکه خواص سیالات کاملاً با خواص جامدات متفاوت است و این خواص نیز معمولاً با حرکت سیال تغییر می‌کند. دوم اینکه در مکانیک جامدات معمولاً حرکت اجسامی مشخص با جرمی معین مورد مطالعه قرار می‌گیرد، حال آنکه در مکانیک سیالات مطالعه حرکت پیوسته سیال، به‌صورت یک جریان مورد نظر می‌باشد.



شکل ۱-۲ خواص سیالات در ظروف

مطالعه سیالات در حالت سکون را استاتیک سیالات^۱؛ مطالعه حرکت آنها را دینامیک سیالات^۲ و مطالعه توام ایستایی و پویایی سیالات را مکانیک سیالات^۳ می‌گویند. در مکانیک سیالات دو شاخه تخصصی به نام نیوماتیک^۴ (با نظام‌های هوای

1. Fluid Statics
2. Fluid Dynamic
3. Fluid Mechanic
4. Pneumatics

فشرده سروکار دارد) و هیدرولیک^۱ (با مایعات تحت فشار سر و کار دارد) وجود دارد. بحث سیالات بیشتر در خصوص مایعات می‌باشد. لذا بیشتر به جای مایع از لفظ سیال استفاده می‌کنیم.

۱-۲ سیال یا شاره^۲

سیال ماده‌ای است که تحت تأثیر تنش برشی هر چند ناچیز بتواند پیوسته تغییر شکل دهد. بنابراین با توجه به این تعریف، حالت فیزیکی سیال فقط می‌تواند مایع و گاز (یا بخار) باشد. بر خلاف آن جسم جامد هنگامی که در معرض تنش برشی قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد ولی این تغییر شکل پس از مدتی متوقف می‌شود (یا این که جسم کاملاً می‌شکند).

فاصله زیاد ملکول‌ها و نیروی جاذبه کم بین آنها سبب سهولت تغییر شکل سیال می‌گردد. برای مثال، ما به راحتی می‌توانیم در هوا حرکت کنیم و آن را جابجا نماییم. به‌طور کلی سیالات را می‌توان به دو گروه مایعات و گازها تقسیم کرد. تفاوت اصلی بین این دو، ناشی از اثر نیروهای چسبندگی است. مایع از مولکول‌های به هم فشرده با نیروی چسبندگی قوی تشکیل شده که مایل است حجم خود را حفظ کند، ضمن اینکه یک سطح آزاد در تماس با محیط دارد. در حالی که گاز، حجم معین و تعریف شده‌ای را درون اتمسفر ساکن اشغال نمی‌کند و آزادانه در فضا جاری می‌گردد و شکل تمام ظرف را به خود می‌گیرد.

۱-۳ مفهوم پیوستگی سیال

به‌طور کلی سیالات از مولکول‌های در حال حرکت تشکیل می‌شوند. اما در اغلب کاربردهای مهندسی عموماً اثرات متوسط یا کلی مولکول‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. بنابراین سیالات مجموعه‌ای پیوسته و یکسان به حساب می‌آیند که در آن فضای خالی و یا سوراخ وجود ندارد و رفتار تک تک مولکول‌ها مورد توجه نیست، یعنی رفتار حجمی سیال مورد نظر است.

در بررسی رفتار سیالات در شرایط معمولی فرض پیوستگی سیال، صحیح است. اگر چه ساختمان ملکولی سیالات برای تشخیص یک سیال از سیال دیگر اهمیت دارد، اما مطالعه رفتار هر یک از مولکول‌ها برای تشریح رفتار سیالات ساکن یا متحرک امکان‌پذیر نیست. در این شرایط رفتار سیالات از طریق مطالعه مقدار متوسط کمیت مورد نظر مشخص می‌شود. بنابراین هنگامی که گفته می‌شود سرعت در یک نقطه از سیال زیاد است منظور، سرعت متوسط مولکول‌ها در یک حجم کوچک اطراف آن نقطه می‌باشد. این حجم در مقایسه با ابعاد فیزیکی سیستم مورد مطالعه، کوچک و در مقایسه با فاصله متوسط بین مولکول‌ها بزرگ است. بنابراین فرض می‌شود مشخصاتی نظیر فشار و سرعت، توابع پیوسته‌ای از زمان و مکان باشند. از اینرو سیال به‌عنوان یک ماده پیوسته^۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد و پیوستگی سیال اساس مکانیک سیالات می‌باشد.

بنابراین با فرض پیوستگی، هر خاصیت از سیال در هر نقطه‌ای از فضا، مقدار معینی را دارا می‌باشد. در مسائل مربوط به گاز رقیق شده یا گازهای کم چگال (گازهای سطوح بالای اتمسفر) فرض پیوستگی محیط صادق نیست. بنابراین در محیط پیوسته فرض می‌شود که مقادیر چگالی، حجم مخصوص، سرعت و شتاب در تمامی سیال به‌طور پیوسته تغییر نماید (یا ثابت باشد).

۱-۴ ابعاد و آحاد^۲

بعد یا دیمانسیون، به هر کمیت قابل اندازه‌گیری نظیر طول، زمان و سرعت اطلاق می‌شود و واحد، وسیله بیان کمیت به‌صورت عدد است. مثلاً بعد طول، بیانگر متغیرهایی از قبیل مسافت، جابجایی، پهنا، خمیدگی و ارتفاع است و سانتی‌متر و اینچ دو واحد عددی برای بیان طول‌اند. دیمانسیون مفهوم قوی است که براساس آن تحلیل ابعادی شکل می‌گیرد.

ابعادی که مستقل از بقیه ابعاد انتخاب می‌شوند ابعاد اصلی یا اولیه نامیده شده و آنهایی که برحسب ابعاد اصلی بیان می‌شوند به ابعاد فرعی یا ثانویه موسومند. مکانیک سیالات چهار بُعد اصلی (کمیت اصلی) دارد که عبارتند از: جرم (M)، طول

(L)، زمان (T) و دما (Θ).

در کمیت‌های فرعی ابعاد برحسب کمیت‌های اصلی قابل بیان است، مثلاً نماد بُعد سطح (L^2) و سرعت (LT^{-1}) است. در اکثر مسائل مکانیک سیالات فقط به سه کمیت اصلی M، L، T نیاز است. همچنین ممکن است از کمیت‌های L، T و F استفاده شود که بعد F نیروست.

براساس قانون دوم نیوتن، نیرو برابر با حاصلضرب جرم در شتاب است. بنابراین بُعد آن عبارتست از $F = MLT^{-2}$.

هر معادله‌ای که تعدادی از کمیت‌های فیزیکی را به هم مرتبط کند، باید از نظر ابعادی، همگن باشد. بدین معنی که ابعاد سمت چپ معادله با ابعاد سمت راست معادله همنام باشند و تمام جملات معادله باید دارای بُعد یکسان باشند. مثلاً معادله سرعت V، در جسمی با شتاب یکنواخت a برابر است با $V = V_0 + at$ که V_0 سرعت اولیه و t زمان طی شده است. برحسب تناسب ابعادی، داریم $LT^{-1} = LT^{-1} + LT^{-1}$ ، بنابراین معادله فوق از نظر ابعادی همگن است. سیستم واحدها در هر کشور متفاوت می‌باشد. در حال حاضر متداول‌ترین سیستم‌ها، سیستم بین‌المللی آحاد (SI) می‌باشد. هرچند که سیستم‌های انگلیسی نیز در حال حاضر کاربردهای فراوانی دارند[۱].

۱-۴-۱ دستگاه بین‌المللی متریک^۱

دستگاه بین‌المللی (SI) در بسیاری از کشورهای جهان پذیرفته شده است. در این دستگاه واحد طول متر (m) واحد زمان ثانیه (s)، واحد جرم کیلوگرم (kg) و واحد دما سانتیگراد ($^{\circ}C$) است.

سیستم واحدی SI جزو سیستم‌های مطلق به شمار می‌روند. سیستم‌های مطلق سیستم‌هایی هستند که در آن از میان جرم و نیرو یکی به‌طور مستقل تعریف شده و دیگری با استفاده از قانون دوم نیوتن به‌دست می‌آید. در سیستم‌های مطلق برای مرتبط کردن واحد نیرو به واحد جرم نیازی به هیچگونه ضربی برای ارضای اصل همگنی نداریم. به‌عنوان مثال در سیستم SI واحد نیرو یک بعد فرعی است که نیوتن نام دارد می‌توانیم آن را از قانون دوم نیوتن به‌دست آوریم: یک نیوتن نیرویی است که به جرم

۱ kg شتابی برابر $\frac{1}{s^2}m$ بدهد.

$$1N = 1Kg \cdot \frac{1}{s^2}m \quad (1-1)$$

نیرویی که جاذبهٔ ثقل به یک جسم وارد می‌کند، وزن جسم نامیده می‌شود. جرم یک جسم (m) با تغییر موقعیت آن تغییر نمی‌کند. اما وزن (W) آن برابر است با جرم ضربدر شتاب جاذبهٔ محل (g) یعنی:

$$W = mg \quad (2-1)$$

وزن جسم تابع موقعیت محلی جسم است. برای مثال در محلی که $g = 9/806 \frac{m}{s^2}$ است، اگر وزن جسمی ۱۰ نیوتن باشد بدین معناست که جرم آن $\frac{10}{9/806}$ کیلوگرم می‌باشد. حال اگر همین جسم با همین جرم در محلی قرار گیرد که شتاب جاذبهٔ آن $g = 9/7 \frac{m}{s^2}$ باشد، وزن آن بدین صورت محاسبه می‌گردد:

$$W = \frac{10N}{9/806 \frac{m}{s^2}} \left(9/7 \frac{m}{s^2} \right) = 9/892N$$

خواهد بود. شتاب جاذبهٔ استاندارد در سیستم SI برابر $\frac{m}{s^2}$ ۹/۸۰۶ است.

جدول ۱-۱ سیستم‌های متریک

سیستم SI	سیستم (CGS) (سانتیمتر - گرم - ثانیه)	کمیت
کیلوگرم (kg)	گرم (gr)	جرم
متر (m)	سانتیمتر (cm)	طول
ثانیه (s)	ثانیه (s)	زمان
نیوتن (N)	دین (dyne)	نیرو
کلوین (K)	کلوین (K)	دما

خواص سیال را غالباً در شرایط استاندارد یعنی برای دمای $4^\circ C$ و فشار $760 mmHg$ بیان می‌کنند.

در سیستم SI علامت اختصاری واحدهایی مانند ساعت (hr)، متر (m) و ثانیه (s) را با حروف کوچک نشان می‌دهند. برخی از واحدها به نام اشخاص نامگذاری

شده‌اند.

واحد کاروانرژی در دستگاه متریک عبارت است از ژول (J) که برابر با یک نیوتن در یک متر است (N. m). واحد توان در دستگاه متریک، وات (W) است، که عبارت از یک ژول بر یک ثانیه (J/s) است. پیشندهایی که در دستگاه بین‌المللی متریک (SI) برای تعیین اجزا و اضعاف واحدها به کار می‌روند در جدول (۱-۲) نشان داده شده است.

جدول ۱-۲ پیشنهاد آحاد سیستم SI

ضریب	پیشوند	علامت اختصاری	ضریب	پیشوند	علامت اختصاری
۱۰ ^۹	گیگا	G	۱۰ ^{-۳}	میلی	m
۱۰ ^۶	مگا	M	۱۰ ^{-۶}	میکرو	μ
۱۰ ^۳	کیلو	k	۱۰ ^{-۹}	نانو	n
۱۰ ^{-۲}	سانتی	c	۱۰ ^{-۱۲}	پیکو	p

۱-۴-۲ دستگاه جاذبه (گرانی) انگلیسی^۱

در دستگاه جاذبه انگلیسی (BG)، واحد طول فوت (ft)، واحد زمان ثانیه (s)، واحد نیرو پوند (lbf) و واحد دما رانکین (R) است. در این دستگاه جرم به‌عنوان یک بعد فرعی محسوب می‌شود و واحد آن اسلاگ است و طبق قانون دوم نیوتن، چنین تعریف می‌شود.

$$1 \text{ اسلاگ} = \frac{1 \text{ lbf} \cdot \text{s}^2}{\text{ft}} \quad (1-3)$$

جدول ۱-۳ سیستم‌های متداول انگلیسی

کمیت	سیستم جاذبه انگلیسی British Gravitational (BG) system
جرم	اسلاگ (slug)
طول	فوت (ft)
زمان	ثانیه (s)
نیرو	پوند نیرو (lbf)
دما	رانکین (R)

به نیرویی که جاذبه زمین بر جسمی وارد می‌کند، نیروی ثقل یا وزن می‌نامند. وزن یک جسم از حاصلضرب جرم در شتاب جاذبه g به دست می‌آید و چنین تعریف می‌شود:

$$W(lbf) = m(slug) \cdot g(ft/s^2)$$

و مقدار g تقریباً $32/2 ft/s^2$ است.

۱-۴-۳ دستگاه مهندسی انگلیسی^۱

در دستگاه مهندسی انگلیسی (EE) واحد نیرو و جرم به‌طور مستقل تعریف می‌شوند. واحد نیرو، پوند نیرو (lbf)، واحد جرم پوند جرم (lbm)، واحد طول فوت (ft)، واحد زمان ثانیه (s) و واحد دما، رانکین (R) است.

در این حالت قانون دوم نیوتن به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$F = \frac{ma}{g_c} \quad (4-1)$$

جدول ۱-۴ سیستم‌های متداول انگلیسی

کمیت	سیستم مهندسی انگلیسی (EE) English Engineering
جرم	پوند جرم (lbm)
طول	پوند فوت (ft)
زمان	پوند ثانیه (s)
نیرو	پوند نیرو (lbf)
دما	رانکین (R)

یک پوند و نیرو (lbf)، نیرویی است که به جرم یک پوند (lbm)، شتابی معادل شتاب ثقل استاندارد زمین $32/2 \frac{ft}{s^2}$ می‌دهد. بنابراین از معادله (۴-۱) خواهیم داشت.

$$g_c = \frac{(lbm) \left(32/2 \frac{ft}{s^2} \right)}{(lbf)}$$

چون نیروی 1 lbf به جرم 1 lbm شتاب $\frac{32}{2}\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}$ را می‌دهد، بنابراین چنین نیرویی به جرم $\frac{32}{2}\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}$ را می‌دهد. یک اسلاگ نیز تحت نیروی 1 lbf شتاب $\frac{1}{2}\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}$ پیدا می‌کند پس داریم:

$$1 = \frac{32}{2}\text{ lbm} \text{ اسلاگ}$$

مثال ۱-۱: جسمی به وزن 1000 lbf ، تحت تاثیر جاذبه زمین با شتاب ثقل

$\frac{32}{2}\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}$ قرار دارد. جرم آن چند کیلوگرم است ؟
حل داریم:

$$w = m.g$$

$$1000\text{ lbf} = (m.\text{slug})\left(\frac{32}{2}\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}\right)$$

$$m = \frac{1000}{32/2} = 31.08\text{ slug}$$

برای تبدیل اسلاگ به کیلوگرم باید از ضریب $14/5939\text{ kg/slug}$ استفاده کرد.

بنابراین:

$$m = (31.08\text{ Slug}) \times (14/59\text{ Kg/slug})$$

$$m = 453/46\text{ kg}$$

ضرایب تبدیل

شتاب ثقل: $32/174\text{ ft/s}^2 = 9/80665\text{ m/s}^2$
مساحت: $1\text{ ft}^2 = 0/0929\text{ m}^2$, $1\text{ in}^2 = 6452\text{ mm}^2$
جرم حجمی: $1\text{ slug/ft}^3 = 5154\text{ kg/m}^3$
انرژی: $1\text{ ft-lb} = 1/356\text{ J} = 1/356\text{ N-m} = 1/356\text{ Watt}$
$1\text{ Btu} = 1055\text{ j}$, $1\text{ hp} = 746\text{ w} = 2545\text{ Btu/h}$
دبی: $1\text{ ft}^3/\text{s} = 0/02832\text{ m}^3/\text{s} = 28/32\text{ lit/s}$, $1\text{ mgd} = 1/55\text{ cfs} = 0/0438\text{ m}^3/\text{s} = 43/8\text{ lit/s}$
نیرو: $1\text{ lb} = 4/448\text{ N}$, $1\text{ lbf/in}^2 = 6895\text{ Pa}$
سیکل بر ثانیه): $1\text{ cycle} = 1\text{ Hz}$
ضریب لزجت دینامیکی: $1\text{ slug/ft. s} = 1\text{ lb. s/ft}^2$, $1\text{ stokes} = 0/0001\text{ m}^2/\text{s}$, $1\text{ poise} = 0/1\text{ kg/m. s}$
ضریب لزجت سینماتیکی: $1\text{ ft}^2 = 0/0929\text{ m}^2/\text{s} = 929\text{ stokeses}$
طول: $1\text{ in} = 25/4\text{ mm}$, $1\text{ ft} = 0/3048$, $1\text{ mile} = 1/609\text{ km}$

همانند اصطکاک در اجسام صلب می‌باشد، با این تفاوت که اثر لزجت، فقط هنگام حرکت لایه‌های سیال بر روی هم در سیال پدیدار می‌شود.

لزجت عامل اصلی انتقال مومنتم در لایه‌های سیال است و هنگامی ظاهر می‌شود که بین لایه‌های سیال حرکت نسبی وجود داشته باشد. در حالت کلی لزجت سیالات ناشی از دو نیروی جاذبه ملکولی^۱ (در مایعات بسیار بیشتر از گازها) و دیگری نیروهای تبادلی مومنتم ملکولی^۲ (در گازها) می‌باشد.

عامل لزجت در مایعات و گازها متفاوت است. در مایعات عامل اصلی لزجت نیروی جاذبه مولکولی بین ذرات است که مانع حرکت آزاد آنها می‌شود. به این علت هرگاه مایعی را حرارت دهیم فاصله مولکول‌های آنها زیادتر می‌شود، بنابراین جاذبه مولکولی کاهش یافته و در نتیجه لزجت آن کاهش می‌یابد. در حالی که در گازها با افزایش دما سرعت مولکول‌های آن افزایش یافته و برخوردها زیاد می‌شود و این تسریع برخورد، باعث افزایش لزجت می‌گردد. در حالت کلی در یک سیال، لزجت از پیوستگی بین مولکول‌ها و در یک گاز از حرکت تصادفی مولکول‌ها حاصل می‌شود.

۷-۱ قانون لزجت نیوتن^۳

قانون لزجت نیوتن بیان می‌کند که بین تنش برشی و تغییرات سرعت نسبت به جدار لوله یا کف کانال (و گرادیان سرعت یا نرخ تغییر شکل زاویه ای) رابطه خطی وجود دارد و رابطه زیر برقرار است:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad (5-1)$$

در معادله فوق τ ، تنش برشی (مقدار نیروی موثر بر واحد سطح) و $\frac{dV}{dy}$ ،

گرادیان سرعت و μ ، ضریب لزجت دینامیکی (مطلق) سیال را نشان می‌دهد.

تنش برشی (τ) حتی به مقدار کم نیز باعث حرکت سیال خواهد شد زیرا اعمال

این تنش باعث ایجاد گرادیان $\frac{dV}{dy}$ و در نتیجه حرکت نسبی لایه‌های سیال خواهد شد.

1. Cohesive
2. Intermolecular forces
3. Newton "s Law Viscosity

۸-۱ ضریب لزجت دینامیکی^۱ یا لزجت مطلق

با توجه به قانون لزجت نیوتن نسبت تنش برشی به گرادیان سرعت را ضریب لزجت دینامیکی می‌گویند. منظور از لزجت در حالت کلی، لزجت دینامیکی (مطلق) است مگر آنکه صراحتاً به لزجت سینماتیکی اشاره شود. لزجت دینامیکی می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dV}{dy}} = \frac{FL^{-2}}{\frac{LT^{-1}}{L}} = FL^{-1}T \quad (۶-۱)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود در واحد ضریب مذکور، عامل نیرو F وجود دارد و به این علت به آن ضریب لزجت دینامیکی گفته می‌شود. رابط ابعادی لزجت در سیستم $MLT\theta$ به صورت $ML^{-1}T^{-1}$ یا $FL^{-1}T$ می‌باشد.

واحد لزجت در سیستم SI برابر $(\frac{N.s}{m^2})$ و $(\frac{kg}{m.s})$ و در سیستم انگلیسی $(\frac{lb.s}{ft^2})$ و $(\frac{slug}{ft.s})$ است. لازم به ذکر است که در دستگاه CGS واحد لزجت دینامیکی پواز (poise) می‌باشد که معادل $\frac{N.s}{m^2} \times 0.1$ است.

از آنجایی که واحدهای ذکر شده در سیستم SI بزرگ می‌باشند از واحدهای کوچک‌تر نظیر poise یا Centipoise استفاده می‌شود. روابط تبدیل واحد لزجت در سیستمهای آحاد به صورت زیر است:

$$1 Poise = \frac{gr}{cm.s} = 0.1 \frac{kg}{m.s} \quad \text{یا} \quad Pa.s$$

$$cp = centipoise = 10^{-7} Pa.s$$

$$1 \frac{slug}{ft.s} = 47.9 \frac{kg}{m.s}$$

$$1 \frac{kg}{m.s} = 10 poise$$

۹-۱ ضریب لزجت سینماتیکی^۲

نسبت ضریب لزجت دینامیکی سیال به جرم مخصوص را ضریب لزجت سینماتیکی می‌نامند و با حرف ν (نو) نمایش می‌دهند بنابراین:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (۷-۱)$$

واحد لزجت سینماتیکی (ν) در سیستم SI، متر مربع بر ثانیه ($\frac{m^2}{s}$)، در سیستم انگلیسی واحد آن فوت مربع بر ثانیه ($\frac{ft^2}{s}$) و بعد آن LT^{-1} می‌باشد. همچنین واحد این ضریب در سیستم CGS، $\frac{cm^2}{s}$ (استوکس)^۱ می‌باشد که برابر $۱۰^{-۲} \frac{m^2}{s}$ یا $۱ \frac{cm^2}{s}$ است.

تبدیل واحدها:

$$\begin{cases} \frac{ft^2}{s} = 929 \frac{cm^2}{s} = 0.0929 \frac{m^2}{s} = 929 \text{ St} \\ 1 \text{ St} = 10^{-4} \frac{m^2}{s} = 1 \frac{cm^2}{s} \end{cases}$$

نکته: تفاوت عمده ضریب لزجت دینامیکی با ضریب لزجت سینماتیکی در این است که چون در ضریب لزجت سینماتیکی عامل جرم مخصوص دخالت دارد و از طرفی فشار در جرم مخصوص سیالات موثر است بنابراین بر خلاف ضریب لزجت دینامیکی، ضریب لزجت سینماتیکی تابع فشار است.

مثال ۱-۲: ضریب لزجت دینامیکی آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد معادل

۰/۰۱۰۰۸ پواز است. اولاً ضریب لزجت دینامیکی آن را بر حسب $\frac{lb.s}{ft^2}$ حساب کنید.

ثانیاً اگر جرم مخصوص نسبی آب در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد ۰/۹۹۸ باشد، ضریب

لزجت سینماتیکی آن را بر حسب استوکس و $\frac{ft^2}{s}$ حساب کنید ؟

حل: می‌دانیم پواز بر حسب $\frac{dyne.s}{cm^2}$ است و چون داریم:

$$1 lb = ۴۴۴۸۰۰ \text{ dyne} , \quad 1 ft = ۳۰/۴۸ cm$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{1}{ft^2} = \frac{44480 \text{ dyne.s}}{30/48 \text{ cm}} = 478/7 \text{ poise}$$

$$\mu = \frac{0/01008}{478/7} = 0/01 \text{ St} \frac{lb.s}{ft^2}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0/01008}{0/998} = 0/01 \text{ St}$$

و در سیستم انگلیسی خواهیم داشت:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{0/998 \times 62/4}{32/2} = 1/934 \frac{\text{slug}}{ft^3}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{2/11 \times 10^{-5}}{1/934} = 1/091 \times 10^{-5} \frac{ft^2}{s}$$

مثال ۱-۳: اگر ضریب لزجت دینامیکی سیال ۱۵/۱۴ پواز و جرم مخصوص آن

۰/۹۶۴ باشد، ضریب لزجت سینماتیکی آن را برحسب $\frac{ft^2}{s}$ حساب کنید ؟

حل: داریم:

$$\frac{1}{ft^2} = 448/4 \text{ poise}$$

$$\mu = 15/4 \text{ poise} = \frac{14/14}{448/4} = 0/0316 \frac{lb.s}{ft^2}$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{0/964 \times 62/4}{32/2} = 1/688 \frac{\text{slug}}{ft^3}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0/0316}{1/688} = \frac{ft^2}{s}$$

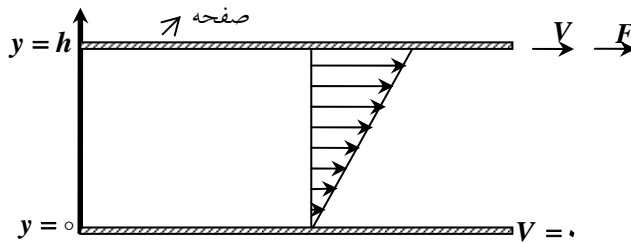
۱۰-۱ مسائل مطرح شده در مورد قانون لزجت نیوتن

با توجه به مسائل مختلفی که در مکانیک سیالات مطرح است تعدادی از کاربردهای قانون لزجت نیوتن به صورت کلی در زیر مطرح می شود که مطمئناً برای حل مفید خواهد بود. بهتر است دانشجویان عزیز روش حل ارائه شده را یاد بگیرند و لزومی به

حفظ کردن فرمول‌ها نیست.

۱-۱۰-۱ حرکت یک صفحه روی سیال

دو صفحه را مطابق شکل (۳-۱) در نظر می‌گیریم که بین آن دو سیالی با لزجت μ قرار گرفته است. صفحه پائینی ثابت بوده و صفحه بالایی با سرعت V کشیده می‌شود. در روی صفحه پائینی سرعت ذرات سیال صفر است که این مورد برای کلیه سیالات لزج صادق بوده و به شرط عدم لغزش (اصل پذیرش جدار) معروف است.



شکل ۳-۱

با فرض توزیع سرعت خطی در سیال خواهیم داشت:

$$F = \tau A$$

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} = \mu \frac{\Delta V}{\Delta y} = \mu \frac{V - 0}{h - 0} = \mu \frac{V}{h}$$

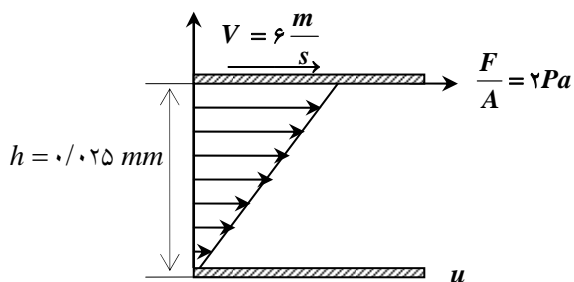
$$\Rightarrow F = \mu A \frac{V}{h} \quad (۸-۱)$$

اگر فاصله بین دو صفحه کم یا سرعت حرکت صفحه پایین باشد می‌توان توزیع سرعت بین دو صفحه را خطی فرض کرد که در این صورت می‌توان به جای $\frac{dV}{dy}$ از $\frac{\Delta V}{\Delta y}$ استفاده کرد همچنین توجه داشته باشید که سطح پائین هم ممکن است حرکت داشته باشد که در این حالت به جای سرعت V سرعت نسبی بین دو صفحه را قرار می‌دهیم.

مثال ۱-۴: صفحه‌ای به فاصله 0.25 mm از یک صفحه ثابت قرار دارد و ما بین دو صفحه با یک سیال نیوتنی پر شده است. اگر نیروی لازم در واحد سطح برای

حرکت صفحه متحرک با سرعت $\frac{m}{s}$ ۶، برابر $2Pa$ باشد، در آنصورت ویسکوزیته سیال چند $\frac{kg}{ms}$ خواهد بود؟

حل: طبق اصل عدم لغزش (پذیرش جدار)، سرعت سیال در مجاورت صفحه متحرک برابر $\frac{m}{s}$ ۶ و در مجاورت صفحه ثابت برابر صفر است. فاصله بین دو صفحه نیز خیلی کم است، به نحویکه می‌توان تغییرات سرعت سیال بین دو صفحه را خطی در نظر گرفت. بنابراین پروفیل توزیع سرعت در سیال بین دو صفحه، بصورت مقابل خواهد بود:



شکل ۴-۱

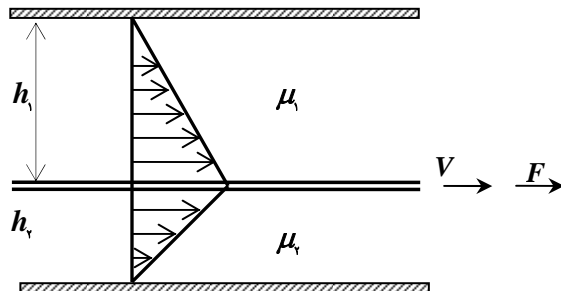
از طرفی می‌دانیم بعلت ثابت بودن سرعت صفحه متحرک و طبق قانون نیوتن، نیروی لازم در واحد سطح برای حرکت صفحه با سرعت مورد نظر، برابر است با نیروی اصطکاک وارد بر واحد سطح این صفحه که خود برابر تنش برشی سیال در لایه مجاور صفحه متحرک است. لذا می‌توان نوشت:

$$\tau = \mu \left(\frac{V}{h} \right) \rightarrow \frac{F}{A} = \mu \left(\frac{V}{h} \right) \rightarrow \mu = \frac{\left(\frac{F}{A} \right)}{\left(\frac{V}{h} \right)} = \frac{2}{\left(\frac{6}{0.25 \times 10^{-3}} \right)} = 8.33 \times 10^{-6} \rightarrow Pa.s \left(= \frac{kg}{m.s} \right)$$

۱۰-۲ حرکت یک صفحه بین دو سیال

مطابق شکل زیر صفحه‌ای به مساحت A را در نظر می‌گیریم که بین دو سیال با لزجت‌های μ_1 و μ_2 و ارتفاع‌های h_1 و h_2 قرار گرفته است. می‌خواهیم نیروی لازم برای

کشیدن صفحه را تعیین کنیم؟



شکل ۱-۵

نیروی لازم برای کشیدن این صفحه مجموع دو نیرویی است که از سیال بالایی و سیال پایینی به آن وارد می‌شود:

$$F = F_1 + F_2 = \tau_1 A + \tau_2 A$$

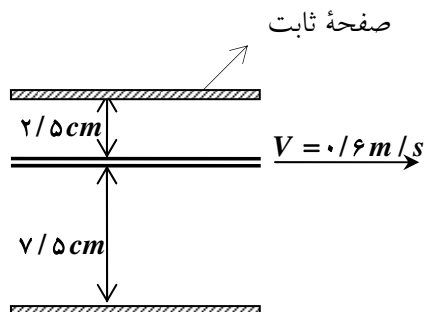
$$\tau_1 = \mu_1 \frac{V}{h_1} \quad , \quad \tau_2 = \mu_2 \frac{V}{h_2}$$

$$\Rightarrow F = AV \left(\frac{\mu_1}{h_1} + \frac{\mu_2}{h_2} \right) \quad (9-1)$$

هرگاه $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ (یا به جای دو سیال یک سیال داشته باشیم):

$$F = AV\mu \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) \quad (12-1)$$

مثال ۱-۵: صفحه مسطحی با سطح مقطع 0.3 m^2 بین دو صفحه ثابت موازی به فاصله 10 cm که حاوی روغن است حرکت می‌کند. سرعت این صفحه مسطح



شکل ۱-۶

$\frac{m}{s}$ و لزجت روغن $\frac{N.s}{m^2}$ 0.37 است. مطلوبست نیروی مقاومت (برشی) هنگامی که صفحه متحرک $2/5\text{ cm}$ از یکی از دو صفحه ثابت فاصله داشته باشد؟
 حل: فرض می‌کنیم t_1, t_2 فاصله صفحه متحرک از صفحه‌های ثابت بوده و توزیع سرعت خطی باشد. بنابراین:

$$\tau_1 = \mu \frac{dV}{dy} = \mu \frac{V}{t_1} \quad \tau_2 = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{V}{t_2}$$

هر گاه نیروی مقاومت F باشد، این نیرو برابر مجموع نیروهای برشی در دو طرف صفحه خواهد بود.

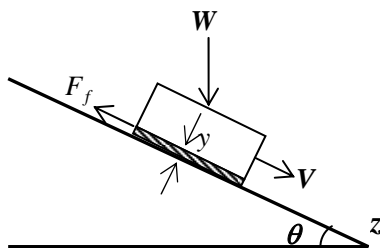
$$F = \tau A = (\tau_1 + \tau_2) A = \left(\frac{\mu V}{t_1} + \frac{\mu V}{t_2} \right) A = \mu VA \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)$$

$$t_1 = 0.075\text{ m} \quad , \quad t_2 = 0.025\text{ m} \quad \text{می‌دانیم:}$$

$$F = 0.37 \times 0.3 \times 0.6 \left[\frac{1}{0.025} + \frac{1}{0.075} \right] = 3.55\text{ N}$$

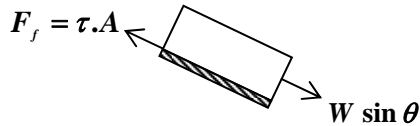
۱-۱۰-۳ سطح شیبدار

جسمی به وزن W را در نظر می‌گیریم که از روی سطح شیبداری که با افق زاویه θ می‌سازد به سمت پایین می‌لغزد. بین این جسم و سطح شیبدار سیالی با لزجت μ و ضخامت y قرار دارد.



شکل ۷-۱

با رسم دیاگرام آزاد صفحه خواهیم داشت:



رابطه بین y و سایر متغیرها را به دست می آوریم:

فرض می کنیم جسم به سرعت حد رسیده است یعنی سرعت حرکت به سمت پایین ثابت است. در نتیجه برآیند نیروهای وارد بر آن در جهت حرکت صفر است.

$$\sum F_z = 0 \Rightarrow F_f - W \sin \theta = 0 \Rightarrow F_f = W \sin \theta$$

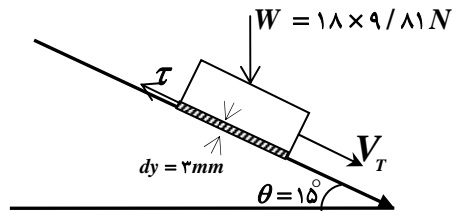
$$F_f = \tau A = \mu \frac{du}{dy} A = \mu \frac{V}{y} A$$

$$\mu \frac{V}{y} A = W \sin \theta \Rightarrow y = \frac{\mu V A}{W \sin \theta} \quad (10-1)$$

مثال ۶-۱: یک جسم ۱۸ کیلوگرمی روی یک سطح شیب داری $\theta = 15^\circ$ که بر روی

آن یک لایه نازک تخت با لزجت دینامیکی $\frac{N \cdot s}{m^2} = 0.14 \times 10^{-2}$ قرار دارد بطرف پایین

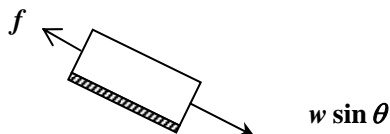
می لغزد. هرگاه سطح تماس جسم $0.3 m^2$ باشد، سرعت نهایی را حساب کنید؟



مثال: ۸-۱

حل: سرعتی را که در آن جسم به صورت یکنواخت حرکت می کند، سرعت

نهایی (V_s) گویند. با رسم دیاگرام آزاد صفحه خواهیم داشت:



$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \Rightarrow \tau = 8/14 \times 10^{-2} \times \left(\frac{V_T}{0.03} \right) = 27/1 V_T$$

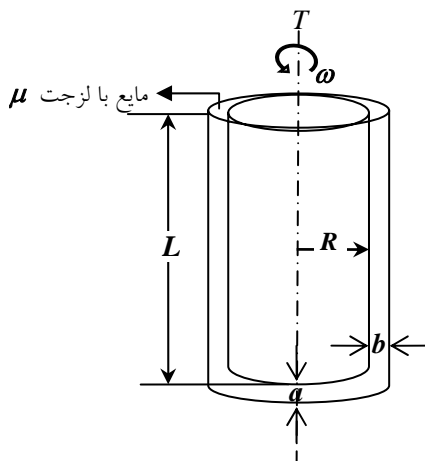
$$\sum F = 0 \Rightarrow W \sin \theta - f = 0 \Rightarrow w \sin \theta - \tau A = 0$$

$$\text{مولفه} \quad (18 \times 9/81) \sin 15^\circ - 27/1 V_T \times 0.3 = 0 \quad \Rightarrow V_T = 5/62 m/s \quad W \sin \theta$$

وزن در امتداد سطح شیبدار

۴-۱۰-۱ لزجت سنج استوانه‌ای (حرکت یک استوانه داخل استوانه دیگر)

لزجت مایعات را می‌توان با استفاده از وسیله‌ای به شکل (۱-۱۱) اندازه گرفت. این لزجت سنج از دو استوانه هم محور تو در تو تشکیل شده است که بین دو استوانه را با سیال مورد نظر پر می‌کنند. استوانه داخلی با سرعت زاویه‌ای ω دوران می‌کند و استوانه خارجی ثابت است با اندازه‌گیری میزان گشتاور وارد به استوانه داخلی می‌توان لزجت مایع را به دست آورد.



شکل ۹-۱

رابطه بین گشتاور وارده و سایر متغیرها به صورت زیر به دست می آید:
(الف) گشتاور وارده از طرف پیرامون استوانه ها:

$$T_1 = FR = \tau AR = \mu \frac{V}{y} (\tau \pi RL) R = \mu \frac{R\omega}{b} (\tau \pi RL) R$$

$$\Rightarrow T_1 = \frac{\tau \pi R^2 L \mu \omega}{b} \quad (11-1)$$

(ب) گشتاور وارده از طرف کف استوانه ها:

$$dF = \tau dA = \mu \frac{dV}{dy} (\tau \pi r dr) = \mu \frac{V}{a} (\tau \pi r dr) = \frac{\tau \pi r^2 \omega \mu dr}{a}$$

$$dT = r dF \Rightarrow T_2 = \int_0^R \frac{\tau \pi r^3 \omega \mu}{a} dr = \frac{\pi R^4 \omega \mu}{4a} \quad (12-1)$$

گشتاور کل وارده برابر با مجموع دو گشتاور فوق است: $T = T_1 + T_2$

توجه داشته باشید که به علت کم بودن فاصله بین دو استوانه، توزیع سرعت را خطی فرض کردیم.

مثال ۷-۱: یک دستگاه ویسکومتر از دو استوانه هم مرکز به طول 30 cm و قطرهای 20 cm و $20/2\text{ cm}$ تشکیل شده است. برای چرخاندن استوانه داخلی با سرعت 400 دور در دقیقه باید به آن گشتاور 0.13 N.m وارد نمود. ویسکوزیته سیال موجود بین دو استوانه چقدر است؟

$$(1) \quad 0.00165\text{ Pa.s}$$

$$(2) \quad 0.0085\text{ Pa.s}$$

$$(3) \quad 0.0165\text{ Pa.s}$$

$$(4) \quad 0.0852\text{ Pa.s}$$

حل: دور در دقیقه (rpm) واحد فرکانس است و برای تبدیل آن به $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ که

واحد سرعت زاویه ای است در $\frac{2\pi}{60}$ ضرب می کنیم.

$$T = \frac{2\pi R^2 L \mu \omega}{b} \Rightarrow \mu = \frac{Tb}{2\pi R^2 L \omega}$$

$$b = 10/1 - 10 = 0/1 \text{ cm}, \quad \omega = \frac{2\pi}{60} \times 400 = 41/9 \text{ rad/sec}$$

$$\mu = \frac{0/13 \times 0/1 \times 10^{-2}}{2\pi \times 0/1^2 \times 0/3 \times 41/9} = 0/00165 \text{ Pa.s}$$

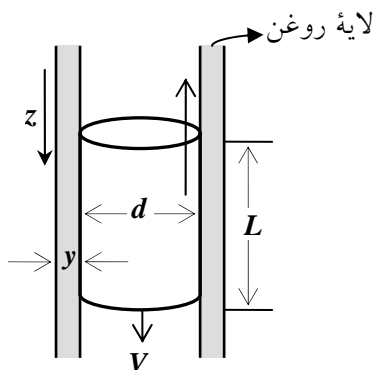
گزینه (۱) صحیح است.

در ادامه می‌خواهیم سرعت حرکت یک استوانه را در استوانه دیگر به دست آوریم.

برای این کار استوانه‌ای به قطر d و طول L را در نظر می‌گیریم که در داخل استوانه دیگری قرار گرفته و در اثر وزن خود با سرعت ثابت V در حال حرکت به سمت پایین است. بین دو استوانه سیالی با لزجت μ و ضخامت y پر شده است. رابطه بین متغیرها را به دست می‌آوریم:

چون سرعت حرکت استوانه ثابت است برآیند نیروهای وارد بر آن در جهت

$$\sum F_Z = 0 \Rightarrow F_f - W = 0 \Rightarrow F_f = W \quad \text{حرکت صفر است:}$$



شکل ۱-۱۰

اگر وزن استوانه داده نشده باشد می‌توانیم آنرا با استفاده از رابطه:

$$W = mg = \rho \forall g \quad \text{به دست آوریم که } \rho \text{ چگالی استوانه داخلی است.}$$

$$W = mg = \rho \forall g = \rho \left(\frac{\pi d^2}{4} L \right) g$$

$$F_f = \tau A = \mu \frac{du}{dy} A = \mu \frac{V}{y} (\pi d L)$$

$$\rho \left(\frac{\pi d^2}{4} L \right) g = \mu \frac{V}{y} (\pi d L) \Rightarrow V = \frac{\rho d g y}{4 \mu} \quad (۱۳-۱)$$

۱-۱۱ انواع سیالات

سیالات را می‌توان به دو گروه ایده‌آل و واقعی تقسیم کرد.

۱-۱۱-۱ سیال ایده‌آل

سیال ایده‌آل سیالی است که لزجت آن صفر و غیرقابل تراکم باشد. لزجت صفر یعنی سیال ضمن حرکت هیچگونه چسبندگی نداشته و در آن هیچگونه تنش برشی موثر وجود ندارد. محور افقی شکل (۱-۱۱) که در آن $\mu = 0$ است، نشانگر سیال ایده‌آل می‌باشد. محور قائم نیز با $\mu = \infty$ نشان‌دهنده جسم جامد است. این نوع سیال عملاً وجود نداشته و صرفاً یک سیال فرضی ایده‌آل است که امکان ساده سازی و تحلیل بسیاری از مسائل مکانیک سیالات را فراهم می‌نمایند.

۱-۱۱-۲ سیال واقعی (حقیقی)

سیال واقعی سیالی است که دارای لزجت و تراکم‌پذیری باشد و در تحلیل آن باید لزجت و اثرات مربوط به آن در نظر گرفته شود. این نوع سیال بنام سیال لزج نیز شناخته می‌شود. سیالات واقعی به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

الف) سیالات نیوتنی

ب) سیالات غیر نیوتنی

الف) سیالات نیوتنی

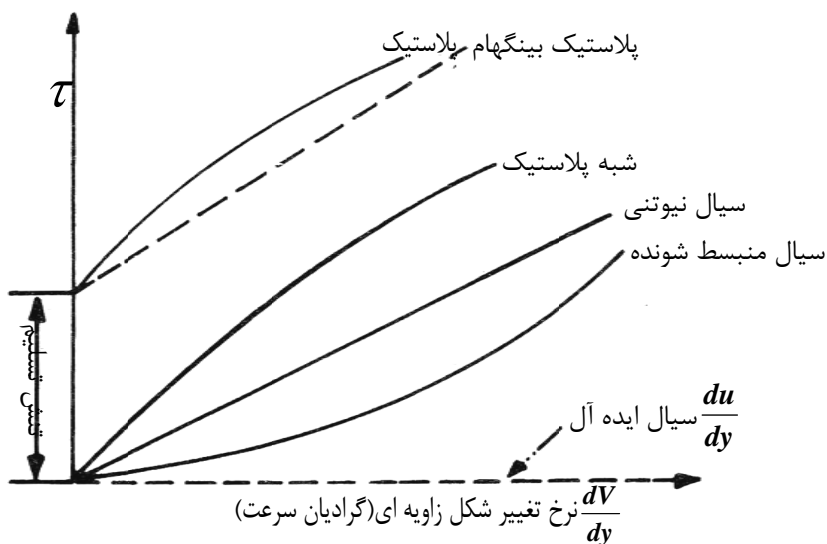
سیالات نیوتنی سیالاتی هستند که قانون لزجت نیوتن در آنها صدق می‌کند و لزجت آنها ثابت است. به عبارت دیگر در سیالات نیوتنی بین تغییرات تنش برشی (τ) و گرادیان

سرعت $(\frac{dV}{dy})$ رابطه خطی وجود دارد و ضریب زاویه این خط، ضریب لزجت (μ) است.

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \text{ و } \mu \text{ ثابت است). مانند مایعات رقیق و گازها.}$$

ب) سیالات غیر نیوتنی

سیالاتی را که از قانون لزجت نیوتنی پیروی نمی کنند سیالات غیر نیوتنی می نامند که در آنها بین تنش برشی و گرادیان سرعت یک رابطه غیر خطی است. سیالات غیر نیوتنی به دو دسته تقسیم می شوند: سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان و سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان.



شکل ۱-۱۱ تغییرات تنش برشی نسبت به نرخ تغییر شکل

ب ۱) سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان

در سیالات غیر نیوتنی لزجت ظاهری در هر لحظه معین به زمان بستگی ندارد. از این

نوع سیالات می‌توان سیالات پلاستیک، شبه پلاستیک و منبسط شونده را نام برد.

۱. پلاستیک^۱

پلاستیک‌ها دارای تنش تسلیم معین τ_0 می‌باشند تا به جریان درآیند و طبق رابطه $\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{dV}{dy} \right)^n$ که در آن n, μ, τ_0 مقادیر ثابت هستند. اگر بین τ و $\frac{dV}{dy}$ رابطه خطی ثابتی وجود داشته باشد، سیال پلاستیک ایده‌آل است. همچنین اگر $n=1$ باشد جسم را پلاستیک بینگهام^۲ گویند.

τ_0 تنش برشی بحرانی سیال است و مادامی که تنش اعمالی از آن تجاوز نکند، سیال به حرکت در نخواهد آمد؛ مانند (خمیر دندان، پارافین و لجن فاضلاب‌ها)

۲. شبه پلاستیک^۳

سیالی است که با افزایش تنش برشی، مقاومت (لزجت دینامیکی μ) آن کاهش می‌یابد. این دسته از سیالات قادر به تحمل هیچگونه تنش برشی نیستند و لزجت آنها با افزایش گرادیان سرعت، کاهش می‌یابد؛ مانند خمیر کاغذ، گل، شیر سیمان و محلول‌های کلوئیدی...

۳. سیال اتساعی یا منبسط شونده^۴

سیالاتی منبسط شونده سیالاتی هستند که با افزایش تنش برشی، مقاومت (لزجت دینامیکی μ) آن بیشتر می‌شود و در این قبیل سیالات لزجت با افزایش گرادیان سرعت، افزایش می‌یابد. مانند توده ماسه بسیار ریز یا سوسپانسیون ماسه و نشاسته

ب) سیالات غیرنیوتنی وابسته به زمان

از این سیالات می‌توان به دو نوع سیال تیکسوتروپیک و ویسکوالاستیک اشاره کرد.

1. Plactic
2. Bingham
3. Pseudo plastic
4. Dilatant

۱. سیالات تیکسوتروپیک یا ژلاتین^۱

سیالی است که با گذشت زمان رقیق شده و لزجت آن با افزایش تنش برشی کاهش می یابد. مانند: ژله ها، رنگ ها و جوهر چاپ.

۲. سیال ویسکوالاستیک^۲

سیالی است که در تنش برشی ثابت، با گذشت زمان غلیظ می شود همانند سیالات غیرنیوتنی عمل می کنند و هنگامی که تنش برشی ناگهان تغییر می کند مانند پلاستیک ها عمل می کنند.

به طور کلی حالت های ذکر شده را می توان با معادله کلی زیر بیان نمود:

$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (14-1)$$

$$n = 1 \rightarrow \tau_0 = 0 \quad \text{سیال نیوتنی}$$

$$n = 1 \rightarrow \tau_0 \neq 0 \quad \text{سیال بینگهام}$$

$$n > 1 \rightarrow \tau_0 = 0 \quad \text{سیال منبسط شونده}$$

$$n < 1 \rightarrow \tau_0 = 0 \quad \text{پلاستیک}$$

۱۲-۱ حجم^۳

حجم یک جسم عبارت است از فضایی که آن جسم اشغال می کند. از آنجایی که مولکول های سازنده جامدها و مایعات به همدیگر چسبیده اند^۴ (یعنی همدوس هستند) حجم اشغال شده، به ظرف حاوی آنها بستگی ندارد ولی در مورد گازها که مولکول هایشان همدس نیستند چنین چیزی درست نیست و حجم آنها برابر فضای داخلی ظرف حاوی شان می باشد. مثلاً اگر یک لیتر از یک جامد یا مایعی را در یک ظرف ده لیتری قرار دهیم همان حجم یک لیتر را خواهد داشت اگر چه حتی ممکن است در مورد مایع، شکل آن تغییر کند ولی وقتی یک لیتر گاز را در همان ظرف ده لیتری قرار دهیم حجم آن ده لیتر خواهد داشت. واحد حجم، متر مکعب است ولی چون در اغلب موارد این واحد بسیار بزرگ است معمولاً بجای آن از واحد لیتر (L)

1. Thxotropic
2. Viscoelastic
3. Volume
4. Cohesive

استفاده می کنند.

۱۳-۱ جرم مخصوص یا چگالی جرم یا دانسیته^۱

نسبت جرم به حجم یک سیال را جرم مخصوص یا چگالی آن سیال گویند و آن را با ρ نشان می دهند و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (15-1)$$

بعد فیزیکی جرم مخصوص ML^{-3} و یا FL^{-3} می باشد.

مقدار جرم مخصوص آب در فشار استاندارد و دمای ۴ درجه سانتی گراد در

سیستم SI $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ و در سیستم انگلیسی $\rho = 1/94 \frac{slug}{ft^3}$ می باشد.

جرم مخصوص نشان دهنده نزدیکی مولکول های یک ماده به یکدیگر می باشد یا عبارتی شاخص تراکم آن محسوب می شود. در نتیجه چگالی گازها از مایعات و جامدات کمتر است و جرم مخصوص مایعات و گازها با افزایش دما، کاهش می یابد.

۱۴-۱ وزن مخصوص^۲ یا چگالی وزن

وزن واحد حجم سیال را وزن مخصوص گویند و آن را ρ نشان می دهند و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \rho g \quad (16-1)$$

بعد فیزیکی وزن مخصوص FL^{-3} و یا $ML^{-3}T^{-2}$ می باشد.

رابطه بین جرم مخصوص و وزن مخصوص بصورت $\gamma = \rho g$ می باشد که در آن g

شتاب ثقل است. مقدار وزن مخصوص با تغییر محل، تغییر می کند و بستگی به شتاب

ثقل دارد. در شرایط شتاب گرانش استاندارد $(g = 32/173 \frac{ft}{s^2} = 9/807 \frac{m}{s^2})$ می باشد.

مقدار وزن مخصوص آب در فشار ۷۶۰ میلی متر جیوه و دمای ۴ درجه سانتیگراد

در سیستم SI برابر $9/81 \frac{kN}{m^3}$ و یا $9810 \frac{N}{m^3}$ و در سیستم انگلیسی $62/4 \frac{lb}{ft^3}$ است.

1. density
2. Specific weight

۱۵-۱ چگالی نسبی (S) یا جرم حجمی نسبی

نسبت جرم مخصوص یک جسم به جرم مخصوص یک سیال مرجع (مثل آب) را چگالی نسبی به عبارت دیگر نسبت وزن مخصوص یک جسم به وزن مخصوص آب را گویند. چگالی نسبی را با S یا SG نشان می‌دهیم.

$$S = \frac{\rho_{\text{جسم}}}{\rho_{\text{آب}}} = \frac{\gamma_{\text{جسم}}}{\gamma_{\text{آب}}} \quad (17-1)$$

چگالی نسبی نشان می‌دهد یک جسم چقدر سبک تر یا سنگین تر از آب یا هوا است.

برای مایعات چگالی رانسیبت به چگالی آب بیان می‌کنند و برای گازها، چگالی نسبت به چگالی هوا بیان می‌شود.

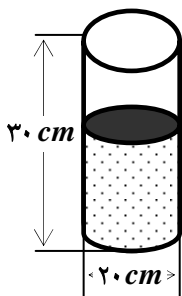
$$S_{\text{مایع}} = \frac{\rho_{\text{جسم}}}{\rho_{\text{آب}}} \quad (18-1)$$

$$S_{\text{گاز}} = \frac{\rho_{\text{گاز}}}{\rho_{\text{گاز}}} \quad (19-1)$$

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

مثال ۸-۱: اگر $2/2 \text{ kg}$ روغن در یک ظرف استوانه‌ای مطابق شکل زیر ریخته

شود تا نصف ارتفاع ظرف پرمی شود. مقدار جرم مخصوص روغن برحسب $\frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$ چقدر است؟ همچنین مقدار وزن مخصوص و چگالی روغن را نیز به دست آورید؟



شکل ۱-۱۲

ابتدا مقدار حجم استوانه را که محتوی روغن است به دست می آوریم:

$$V = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \times h = \frac{\pi \times (0.2)^2}{4} \times 0.15 = 4.712 \times 10^{-3} m^3$$

سپس طبق روابط خواهیم داشت:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{2/2}{4.712 \times 10^{-3}} = 466/89 \frac{kg}{m^3} = 0.466 \frac{ton}{m^3}$$

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{466/89}{1000} = 0.466$$

$$S = \frac{\gamma}{\gamma_w} \rightarrow \gamma = 0.466 \times 9/80.6 = 4/57 \frac{kN}{m^3}$$

۱۶-۱ حجم مخصوص^۱

حجم مخصوص یک سیال عبارت است از حجم اشغال شده توسط واحد جرم سیال یا به عبارت دیگر عکس جرم مخصوص می باشد.

$$V_s = \frac{1}{\rho} \quad (21-1)$$

واحد حجم مخصوص در سیستم SI متر مکعب بر کیلوگرم ($\frac{m^3}{kg}$) یا به عبارتی

عکس جرم مخصوص است.

معمولاً در مورد گازها بجای جرم مخصوص از حجم مخصوص استفاده می کنند.

۱۷-۱ فشار^۲

یکی از مهمترین خواص سیالات، فشار است. فشار عبارت است از نیروی وارد بر

واحد سطح و واحد آن در سیستم SI، $\frac{N}{m^2}$ یا پاسکال (Pa) است.

$$P = \frac{F}{A} \quad (22-1)$$

یعنی اگر نیروی یک نیوتن بر سطحی برابر یک متر مربع وارد شود یک پاسکال فشار اعمال می شود بنابراین در می یابیم که فشار شاخص شدت نیرو است و چون پاسکال واحد کوچکی است معمولاً بجای آن از کیلو پاسکال ($10^3 Pa = Kpa$) و یا مگا پاسکال $10^6 Pa = Mpa$ استفاده می شود.

فشار را می توان به صورت ارتفاع ستون سیال (h) نیز بیان کرد یعنی:

$$p = \rho h \quad (23-1)$$

P : فشار (Pa) ؛ γ : وزن مخصوص $\left(\frac{N}{m^3}\right)$ و h : ارتفاع (m).

۱۸-۱ گاز کامل^۱ و معادله حالت

گاز کامل یا گاز ایده آل گازی است که در آن نیروهای جاذبه مولکولی قابل صرف نظر باشد. هرچه نیروی جاذبه ی ملکولی افزایش یابد، گاز به بخار نزدیک واز گاز کامل دور می شود. فرق بین گاز کامل و سیال ایده آل این است که سیال ایده آل، سیال تراکم ناپذیر و بدون اصطکاک می باشد در حالی که گاز کامل هم دارای لزجت و هم قادر به ایجاد تنش های برشی است و تراکم پذیر نیز هست.

بین خواص گاز کامل روابط زیر برقرار است که معادله گاز کامل نامیده می شود:

$$PV_s = RT \quad , \quad P = \rho RT \quad , \quad P \forall = mRT \quad (24)$$

در معادله فوق P فشار مطلق برحسب (pa)، V_s حجم مخصوص بر حسب

R ، ثابت عمومی گازها برحسب $\left(\frac{m.N}{Kg.k}\right)$ ، T دمای مطلق برحسب ($^{\circ}k$) و (m) جرم می باشد.

۱۹-۱ قابلیت تراکم پذیری سیالات (مدول بالک یا ضریب کشسانی حجمی)^۲

ضریب تراکم پذیری، قابلیت تراکم پذیری مایعات را در اثر فشار بیان می کند. تمام سیالات در اثر اعمال فشار تغییر حجم می دهند و متراکم می شوند. با این عمل انرژی در داخل سیال ذخیره شده و به محض برطرف شدن فشار به حالت اولیه بر می گردد.

1. Perfect Gas

2. Bulk moduls elasticity

برای تشریح این پدیده سیالی با حجم V را در فشار P در نظر می‌گیریم که در اثر تغییر فشار dP حجمش به میزان dV تغییر می‌کند. در این صورت، ضریب تراکم‌پذیری مایع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = - \frac{\frac{dV}{V}}{dP} \quad (25-1)$$

بعد فیزیکی این مشخصه عکس فشار یعنی $F^{-1}L^3$ است.

علت وجود علامت منفی در این فرمول آن است که تغییرات فشار و حجم در خلاف جهت یکدیگرند. عکس ضریب یادشده با حرف K نشان داده می‌شود و به نام ضریب الاستیسیته یا ضریب تراکم‌ناپذیری مایع یا مدول حجمی خوانده می‌شود.

$$K = \frac{dP}{\left(\frac{d\rho}{\rho}\right)} = \frac{-dP}{\left(\frac{dV}{V}\right)} \quad (26-1)$$

که در آن dV تغییر حجم سیال، V حجم اولیه سیال، dP تغییر فشار و K ضریب الاستیسیته یا ضریب تراکم‌ناپذیری مایع می‌باشد. واحد K همان واحد فشار است و بعد ضریب الاستیسیته یا ضریب تراکم‌ناپذیری FL^{-1} می‌باشد و مقدار بزرگ آن نشان می‌دهد که سیال غیرقابل تراکم می‌باشد.

مایعات را در بیشتر موارد می‌توان تراکم‌ناپذیر در نظر گرفت اما در مواردی که فشار به طور ناگهانی و یا بشدت تغییر می‌نماید (مانند ضربه کوچ) یا در مواردی که دما تغییر می‌کند تراکم‌پذیری آنها اهمیت می‌یابد.

ضریب الاستیسیته یا ضریب تراکم‌ناپذیری بستگی به رابطه فشار و جرم مخصوص دارد و چون جرم مخصوص بستگی به تغییرات درجه حرارت در زمان تراکم دارد، بنابراین K بستگی به درجه حرارت خواهد داشت.

مثال ۹-۱: یک مایع متراکم در یک سیلندر، در فشار $\frac{1MN}{m^2}$ دارای حجم 1000 cm^3

و در فشار $\frac{2MN}{m^2}$ دارای حجم 995 cm^3 می‌باشد. مقدار مدول حجمی یا ضریب تراکم‌ناپذیری این مایع چقدر است؟

$$k = \frac{-\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}} = \frac{-2-1}{\frac{(995-1000)}{1000}} = 200\text{ MPa}$$

۲۰-۱ فشار بخار^۱ (P_v)

هنگامی که مایعی در مجاورت هوا قرار می‌گیرد، تعدادی از مولکول‌های آن از محیط مایع خارج شده و بشکل بخار در فضای اطراف سطح آزاد مایع، پراکنده می‌شوند. اگر مایع در محیط بسته و محدودی واقع باشد به تدریج فشار بخار مایع اضافه می‌شود و به حدی می‌رسد که فشار جزیی بخار مایع از تبخیر بیشتر مایع جلوگیری خواهد کرد. در چنین حالتی گفته می‌شود که فضا از بخار مایع اشباع شده و فشار جزیی بخار مایع در این حالت به نام فشار بخار اشباع خوانده می‌شود.

به‌طور کلی اگر فشار مایعی برابر با فشار بخار آن شود مایع به جوش خواهد آمد و با بخار خود به حالت تعادل می‌رسد. اگر فشار مایعی به مقدار بیشتر از فشار بخار آن برسد، مایع به راحتی تبخیر می‌شود و اگر فشار مایعی به مقدار کمتر از فشار بخار برسد، حباب‌های بخار در داخل آن تشکیل می‌شود و پدیده خلأزایی مشاهده خواهد شد.

۲۱-۱ کشش سطحی^۲

در درون مایعات هر ملکول توسط ملکول‌های دیگر واز طریق جاذبهٔ ملکولی جذب می‌شود و ملکول‌های موجود در سطح مایع، تحت اثر نیروی جاذبهٔ بیشتر از پایین نسبت به بالا که هواست قرار می‌گیرند و در نتیجه این ملکول‌ها به طرف پایین کشیده می‌شوند که به این پدیده کشش سطحی گفته می‌شود. به عبارت دیگر کشش سطحی مقدار نیرویی است که در واحد طول در سطح مایع اثر کرده و ملکولها را به درون مایع می‌کشد و با σ (سیگما) نشان داده می‌شود.

$$\sigma = \frac{F}{L} \quad (27-1)$$

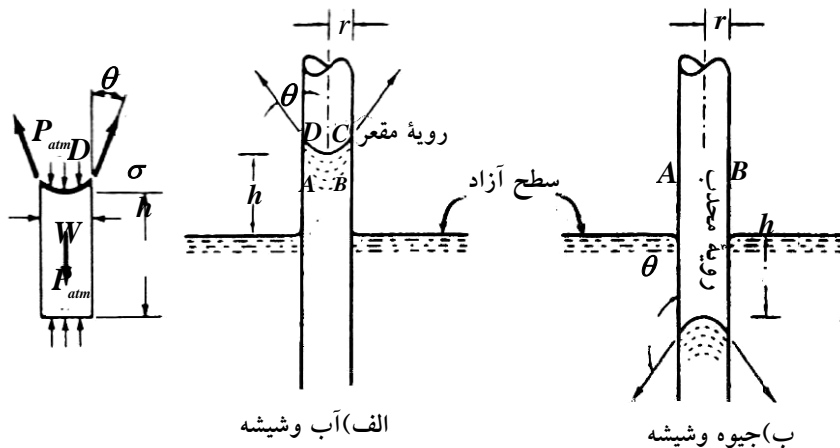
کشش سطحی را انرژی سطحی ملکول‌های مایع نیز می‌نامند که در این حالت، کشش سطحی برابر با انرژی سطحی یا کار انجام شده به ازای واحد سطح است. واحد کشش سطحی در سیستم SI نیوتن بر متر $\left(\frac{N}{m}\right)$ یا $\left(\frac{lbf}{ft}\right)$ و دیمانسیون یا بعد کشش سطحی FL^{-1} می‌باشد.

کشش سطحی مایعات برای توضیح برخی پدیده‌ها که در سطح مشترک یک گاز و یک مایع مثل (آب وهوا) و یا یک گاز و یک مایع و یک جامد نظیر (آب، هوا و شیشه) قرار دارد، بکار برده می‌شود و ناشی از نیروی جاذبه بین ملکول‌های یکسان (پیوستگی)^۱ و جاذبه بین ملکول‌های غیریکسان (چسبندگی)^۲ می‌باشد.

مقدار نیروی لازم برای بیرون کشیدن یک میله نازک به طول L از سطح آب برابر است با $F = 2\sigma L$ و برای یک حلقه نازک فلزی به شعاع r برابر است با $f = 4\pi r\sigma$. در این دو رابطه σ نشان‌دهنده کشش سطحی آب است.

آب بعد از جیوه بالاترین نیروی کشش سطحی را نسبت به مایعات دیگر دارا است. همچنین مقدار کشش سطحی محلولها بیشتر از آب خالص است و همین عامل باعث صعود شیره گیاهی در آوندها به بالای یک درخت تنومند می‌شود.

در مرز مایع و گاز چون نیروهای پیوستگی بزرگتر از چسبندگی است کشش سطحی ایجاد می‌شود. اگر جاذبه مولکولی بین مولکول‌های مایع و ظرف بیش از جاذبه مولکول‌های درون مایع باشد، ذرات مایع به ظرف چسبیده و مایع، جدار ظرف را خیس می‌کند مانند (شیشه و آب) در شکل (الف) برعکس هنگامی که جاذبه مولکول‌های درون مایع بیشتر از جاذبه مولکول‌های بین مایع و ظرف باشد، ذرات مایع به جدار ظرف نمی‌چسبند و مایع جدار خود را خیس نمی‌کند مانند (شیشه و جیوه) (شکل ج).



شکل ۱-۱۳

۱-۲۲ اثرات کشش سطحی

۱-۲۲-۱ محاسبه فشار نسبی داخلی در قطره، حباب و جت باریک مایع

کشش سطحی باعث می‌شود که فشار داخلی قطرات، حباب‌ها و جت‌های باریک مایع از فشار محیط بیشتر باشد به عبارت دیگر، کشش سطحی باعث می‌شود تادر داخل قطره، حباب و جت‌های مایع، فشار نسبی ایجاد شود.

بنابراین اختلاف فشار داخل و خارج (فشار نسبی داخلی) یک قطره، حباب و جت باریک استوانه‌ای برابر است با:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad \text{قطره} \quad (1-28)$$

$$\Delta p = \frac{4\sigma}{R} \quad \text{حباب} \quad (1-29)$$

$$\Delta p = \frac{\sigma}{R} \quad \text{استوانه} \quad (1-30)$$

در دو معادله اول شعاع کره و در معادله سوم شعاع استوانه است.

مثال ۱-۱۰: جت جیوه‌ای با مقطع دایره به قطر 1 mm از یک سوراخ خارج می‌شود اختلاف فشار داخل و خارج جت چقدر است؟ ضریب کششی سطحی جیوه

در این حالت $\frac{N}{m}$ ۰/۵۱ است؟

$$p = \frac{2\sigma}{d} = \frac{2 \times 0.51}{0.1 \times 10^{-3}} = 10200 \text{ pa} = 10.2 \text{ Kpa}$$

مثال ۱-۱۱: فشار نسبی داخلی یک قطره کوچک به شعاع R چند برابر فشار

نسبی داخلی یک حباب به شعاع $2R$ ، با کشش سطحی یکسان است؟

$$p = \frac{4\sigma}{d} = \frac{4\sigma}{2R} = \frac{2\sigma}{R} \quad \text{قطره}$$

$$p = \frac{8\sigma}{d} = \frac{8\sigma}{2R} = \frac{4\sigma}{R} \quad \text{حباب}$$

$$\rightarrow \frac{P_{\text{قطره}}}{P_{\text{حباب}}} = \frac{1}{2}$$

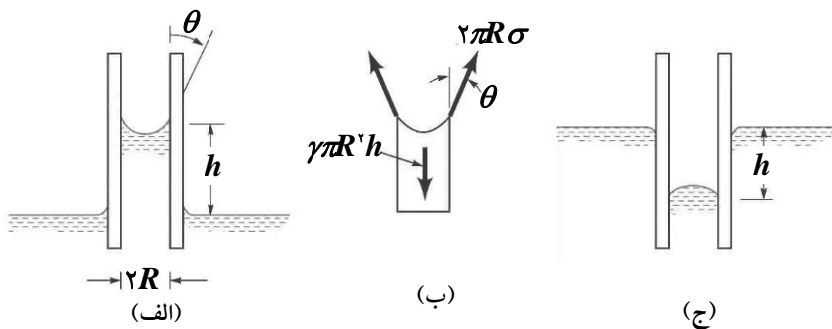
با توجه به فرمول‌های فوق هر چقدر میزان R کوچک‌تر باشد، مقدار ΔP بیشتر خواهد شد. و در مورد حباب در حالتی که ΔP از فشار بخار مایع بیشتر شود حباب خواهد ترکید.

۱-۲۲-۲ موینگی^۱

هر گاه یک لوله نازک (موین) در سطح آزاد مایع فرو برده شود بدلیل کشش سطحی و مقدار نسبی نیروهای چسبندگی و پیوستگی، مایع در این لوله بالا یا پایین می‌رود که این پدیده را موینگی می‌نامند.

خاصیت موئینگی بستگی به میزان چسبندگی بین مایع و جامد و جاذبه بین ذرات مایع (پیوستگی) دارد.

اگر نیروی چسبندگی بین مولکولهای مایع و لوله بیشتر از پیوستگی بین مولکولهای مایع باشد، مایع در لوله موین بالا رفته و سطح مقعر تشکیل می‌شود؛ مانند صعود آب در لوله موین شیشه‌ای (شکل ۱-۲۰ الف) و اگر نیروی پیوستگی بیشتر از چسبندگی باشد مایع در لوله موین پایین رفته و تشکیل سطح محدب می‌دهد، مانند نزول جیوه در لوله موین (شکل ۱-۲۰ ج)



شکل ۱-۱۴

طریقه به دست آوردن ارتفاع موینگی در لوله‌های موین

تعدادل مایع در لوله نتیجه تأثیر دو نیروی مخالف یکدیگر است (شکل ۱-۲۰ ب). یکی مولفه قائم (نیروی کشش سطحی) در امتداد جدار لوله بطرف بالا و دیگری نیروی وزن مایع به طرف پایین می‌باشد. پس می‌توان نوشت:

$$\sum F_y = 0 \rightarrow \text{نیروی وزن مایع} = \text{نیروی کشش}$$

$$\pi R \sigma \cos \theta = \pi R^2 \times h \gamma$$

$$h = \frac{\gamma \sigma \cos \theta}{\gamma R} \quad \text{یا} \quad \frac{\gamma \sigma \cos \theta}{\gamma d} \quad (۳۱-۱)$$

h : ارتفاع موینگی (ارتفاعی که مایع بالا می‌رود یا پایین می‌رود (m))

R : شعاع لوله و d قطر لوله (m)

γ : وزن مخصوص مایع ($\frac{N}{m^3}$)

θ : زاویه بین مماس بر سطح آب و جدار لوله یا زاویه ترشوندگی

σ : کشش سطحی ($\frac{N}{m}$)

نکات:

کاهش شعاع در لوله موین میزان صعود موینگی افزایش می‌یابد.

نیروی کشش سطحی و در نتیجه ارتفاع آب در لوله موئن، بستگی به جنس

مایع و زاویه تماس آن با لوله و شعاع لوله دارد.

هرگاه زاویه تماس (θ) کوچکتر از 90° باشد مایع سطح جامد را تر می‌کند، برای

مثال می‌توان از تماس آب با صابون نام برد.

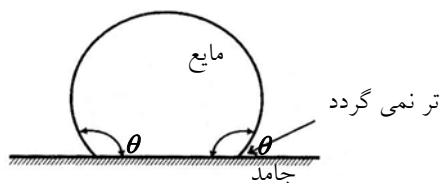
هرگاه زاویه تماس (θ) بزرگتر از 90° باشد مایع سطح جامد را تر نمی‌کند،

برای مثال می‌توان از تماس آب با موم نام برد.

توجه داشته باشید که زاویه تماس آب با یک سطح خیلی تمیز و صاف را

می‌توان صفر در نظر گرفت. بنابراین میزان صعود موینگی (h) به تمیزی لوله بستگی

دارد.



شکل ۱۵-۱

میزان صعود بین دو صفحه موازی که با فاصله d از هم قرار گرفته اند عبارت

است از:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\gamma d} \quad (32-1)$$

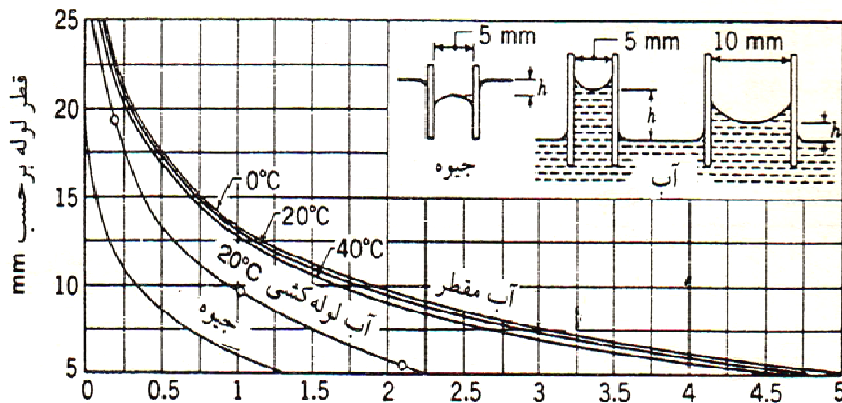
میزان صعود موئینگی بین دو لوله هم محور به شعاعهای r_1 و r_2 عبارت است

از:

$$h = \frac{2\sigma}{\gamma(r_2 - r_1)} \quad (33-1)$$

میزان صعود موئینگی بین دو صفحه با فاصله d از هم نصف صعود موئینگی در

لوله‌ای به قطر d است.



شکل ۲۲-۱ صعود و نزول موئینگی بر حسب mm

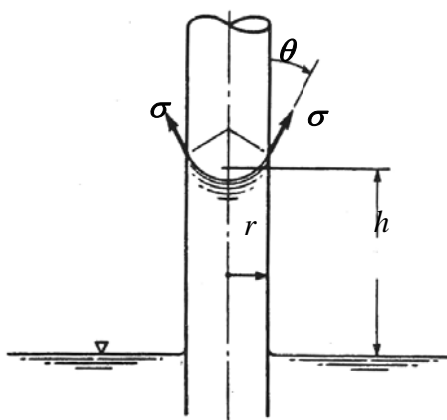
مثال ۱-۱۲: اندازه بالا آمدن آب در لوله موئین را در سطح مشترک (آب - هوا -

شیشه) برای زاویه $\theta = 0^\circ$ بدست آورید؟ شعاع لوله موئین ۱ میلی متر و کشش سطحی

$$\sigma = 0.0728 \frac{N}{m} \text{ می باشد.}$$

حل:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} = \frac{2 \times 0.0728 \cos 0^\circ}{1000 \times 9.81 \times 0.001} = 0.0148 m$$



شکل ۱-۱۶

۱-۲۳ کاویتاسیون^۱

هنگامی که در نقاطی از مایع فشار به قدری کاهش یابد که مساوی فشار بخار یا کمتر از آن گردد، کاویتاسیون (خللازی) به وجود می آید و باعث می شود که مایع سریعاً تبخیر گردیده (جوش آمده) و حبابهای کوچک تشکیل شود. این حبابها به همراه مایع حرکت کرده و به طرف نقاطی از جریان که فشار بیشتری نسبت به فشار بخار دارند، حرکت کرده و این حالت در آنجا باعث ترکیدن ناگهانی حبابها می شود. گازهای حل شونده در مایعات نیز باعث به وجود آمدن کاویتاسیون خواهند شد و حلالیت گازها در مایع با کاهش فشار کم شده و در نتیجه گاز یا هوای حل شده در داخل مایع می تواند در نقاط کم فشار آزاد شده و باعث صدمه شود. اگر کاویتاسیون نزدیک سطوح رخ دهد، نیروی فشاری ایجاد شده از برخورد این فشار با سطح جسم سخت باعث خسارت به سطح خواهد شد. مانند کاویتاسیون در پمپها، توربینها و پروانهها.

۱-۲۴ اصل عدم لغزش و عدم پرش دما

هر گاه مایعی بر روی یک سطح جامد جاری باشد، تأثیر مقابل مولکولها باعث می شود که مایع در تماس با سطح جامد مانند جدار لوله یا کف کانال خواهان تعادل

اندازه حرکت و انرژی با سطح جامد باشد. اساساً تمام مایعات با سطح تماس خود در حال تعادل اند، بنابراین یک مایع در تماس با کف کانال یا جدار لوله سرعت و درجه حرارت آنها را به خود می‌گیرد، یعنی: (۱-۳۴)

$$(الف) \quad \text{سطح جامد (کف کانال)} V = V_{\text{سیال}} \quad (ب) \quad \text{سطح جامد (کف کانال)} T = T_{\text{سیال}}$$

این دو معادله را به ترتیب از چپ به راست شرط عدم لغزش و شرط عدم پرش دمایی (دماهای مساوی) می‌گویند. این شرایط، در تحلیل جریان سیال روی سطوح صلب، به عنوان شرایط مرزی به کار می‌روند. با کنار گذاشتن نسبی شرط عدم لغزش در تحلیل جریان غیر لزج، پیچیدگی ریاضی مسأله کاهش می‌یابد. برای مثال سرعت در کف کانال (بندی) یا جدار لوله صفر است، زیر کف کانال یا جدار لوله بدون حرکت هستند.

نکات:

اصل عدم لغزش در مورد سیال ایده‌آل معتبر نیست زیرا سرعت سیال در تماس با جسم جامد نظیر جدار لوله یا کف کانال صفر نیست.

اصل عدم لغزش در مورد گازها معتبر نیست زیرا میانگین فاصله برخورد مولکول‌ها با هم زیاد است. در این حالت یک سرعت معین لغزش برای گاز نسبت به جسم جامد (جدار لوله) وجود خواهد داشت.

در یک محیط متخلخل که در آن سیال می‌تواند نفوذ کند، شرط عدم لغزش برای مولفه قائم سرعت معتبر نیست. بنابراین در یک محیط متخلخل نظیر بستر رودخانه‌ها) $V_{\text{مماسی}} = 0$ و $V_{\text{قائم}} \neq 0$ است.

مجموعه تستهای خواص سیالات

۱. مطالعه سیالات در حالت سکون را..... گویند.

(۱) مکانیک سیالات (۲) دینامیک سیالات

(۳) پنوماتیک (۴) هیدرولیک

۲. یک سیال ایده‌آل دارای

(۱) کشش سطحی صفر و تراکم ناپذیر است.

- ۲) تنش برشی صفر است و مانند یک گاز کامل رفتار می‌کند.
- ۳) چگالی و ویسکوزیته (لزجت) ثابت است.
- ۴) ویسکوزیته صفر و تراکم پذیر است.
۳. در کدام یک حالت‌های ذیل فرض محیط پیوسته منطقی و مناسب است؟
 - ۱) جریان آزاد مولکولی
 - ۲) خلاء کامل
 - ۳) جریان گاز با چگالی خیلی کم
 - ۴) هیچکدام
۴. قانون لزجت نیوتنی در سیال متناسب می‌باشد با:
 - ۱) جرم، شتاب و نیرو
 - ۲) اندازه حرکت و نیرو
 - ۳) تنش برش و میزان تغییر شکل زاویه‌ای
 - ۴) فشار، سرعت و لزجت
۵. لزجت
 - ۱) مایعات با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد.
 - ۲) یک سیال ایده‌آل متناسب و با درجه حرارت است.
 - ۳) گازها با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد.
 - ۴) سیالات با کاهش درجه حرارت افزایش می‌یابد.
۶. در یک سیال نیوتنی
 - ۱) لزجت دینامیکی مستقیماً متناسب با میزان تغییری شکل سیال است.
 - ۲) لزجت سینماتیکی به‌طور معکوس متناسب با تنش برشی است.
 - ۳) تنش برشی به‌طور مستقیم با میزان تغییر شکل سیال است.
 - ۴) لزجت دینامیکی صفر است.

۷. در صورتی که ارتباط بین تنش برشی τ و کرنش برشی $\frac{du}{dy}$ به‌صورت $\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n$

تعریف شود، سیالی با مرتبه‌نمایی $n > 1$ شناخته می‌شود به‌عنوان:

- ۱) سیال منبسط شونده
- ۲) سیال شبه پلاستیک
- ۳) سیال نیوتنی
- ۴) پلاستیک بینگهام (Bingham plastic)

۸. عبارت نادرست را تعیین کنید: مثالی از نمونه سیالات غیر نیوتنی عبارتست از:

- (۱) دو غاب رسی خیلی غلیظ
 - (۲) گلیسرین
 - (۳) خمیر کاغذی
 - (۴) جوهر چاه
۹. یک گاز کامل:

- (۱) تراکم‌ناپذیر
- (۲) دارای لزجت صفر است
- (۳) تراکم‌پذیر ولی دارای لزجت صفر است
- (۴) هیچکدام

۱۰. برای سیالی مدول الاستیسیته حجمی (مدول بالک)، k :

- (۱) هم با درجه حرارت و هم با فشار، هر چند به آرامی، تغییر می‌کند.
- (۲) ثابت می‌باشد.

- (۳) با درجه حرارت تغییر می‌کند ولی مستقل از فشار است.
- (۴) فقط با فشار تغییر می‌کند و مستقل از درجه حرارت است.

۱۱. در یک نمونه آب افزایش فشار $\frac{MN}{m^2}$ ۲۱ باعث ۱٪ کاهش حجم شد. مدول

الاستیسیته حجمی (مدول بالک) این نمونه بر حسب $\frac{MN}{m^2}$ ، برابر است با:

- (۱) ۲/۱
- (۲) ۲۱۰
- (۳) ۲۱۰۰
- (۴) ۰/۲۱

۱۲. در شرایط عادی آب در حدود

- (۱) ۱۰ برابر تراکم پذیرتر از فولاد است.
- (۲) ۱۰۰ برابر تراکم پذیرتر از فولاد است.
- (۳) ۱۰۰۰ برابر تراکم پذیرتر از فولاد است.
- (۴) ۱۰۰ برابر تراکم پذیری کمتری نسبت به فولاد دارد.

۱۳. جیوه به عنوان سیالی خوب جهت فشار سنجی در نظر گرفته می‌شود خصوصاً به واسطه

- (۱) فشار بخار به طور جزئی و کوچک آن
- (۲) گرمای ویژه زیاد آن

۳) وزن مخصوص زیاد آن

۴) رویه محدب آن

۱۴. کشش سطحی آب:

۱) با افزودن نمک کاهش می یابد

۲) با افزایش دما کاهش می یابد.

۳) تاثیری بر ارتفاع کاپیلاری ندارد

۴) با افزایش دما افزایش می یابد

۱۳۶ (۱) ۱۳۳/۱۰ (۲)

۱۳/۶۰ (۳) ۹/۷۹ (۴)

۱۵. در لوله ای غوطه ور در آب به قطر ۴mm صعود مویینگی ۷/۵ mm است در صورتی که لوله یدیگری به قطر ۳ mm در همان آب وارد شود، صعود مویینگی در آن خواهد بود.

۱۳/۳۳ (۱) ۱۱/۵۵ (۲)

۱۰mm (۳) ۵/۷mm (۴)

۱۶. عطر پاشی قطرات کوچک آب را با اندازه ۵۰mm تولید می کند. در صورتی که ضریب کشش سطحی آب در هوا $0.07 \frac{N}{m}$ باشد اضافه فشار در داخل این قطرات کوچک بر حسب Kpa، برابر است با:

۲/۸ (۱) ۵/۶ (۲)

۱۱/۲ (۳) ۲۲/۴ (۴)

۱۷. در صورتی که ضریب کشش سطحی آب در هوا $0.07 \frac{N}{m}$ باشد قطر لوله ای که برای نگه داشتن ارتفاع مویینگی بین ۹۵cm تا ۱cm باید استفاده شود برابر است با:

۱/۵۵mm (۱) ۲/۱۵mm (۲)

۳mm (۳) ۶mm (۴)

۱۸. یک لوله قائم به قطر ۵ cm دارای جیوه تا ارتفاع ۲۰ cm است. ارتفاع معادل ستون آب که همان مقدار فشار را اعمال می کند، خواهد بود.

۱۰۰cm (۱) ۲۷۲cm (۲)

$$۴۰\text{ cm} \quad (۳) \quad ۱۳۶\text{ cm} \quad (۴)$$

۱۹. یک بلوک مستطیلی با جداره‌های W به سمت پایین یک سطح شیبدار با زاویه ۳۰° نسبت به افق سر می خورد. سطح شیبدار با یک سیال لزج با ضریب ویسکوزیته μ وضخامت t روغنکاری می شود. در صورتی که سرعت لغزش بلوک V باشد، بنابراین سطح تماس بلوک با سطح شیبدار روغنکاری شده خواهد بود:

$$\begin{aligned} (۱) \quad & \frac{wt}{\mu W} \\ (۲) \quad & \frac{wt}{\mu N} \\ (۳) \quad & \frac{wt}{\mu W} \\ (۴) \quad & \frac{wt}{\mu N} \end{aligned}$$

۲۰. افزایش فشار تا $\frac{N}{cm^2}$ ۲۰۰ جرم مخصوص آب را $\frac{1}{100}$ % افزایش می دهد. مدول الاستیسیته حجمی (مدول بالک) آب مساوی است با:

$$\begin{aligned} (۱) \quad & \frac{GN}{cm^2} \quad ۲۰۰ \\ (۲) \quad & \frac{GN}{cm^2} \quad ۲۰ \\ (۳) \quad & \frac{GN}{cm^2} \quad ۲ \\ (۴) \quad & \frac{GN}{cm^2} \quad ۰/۲ \end{aligned}$$

۲۱. سیالاتی با لزجت دینامیکی $\mu = ۰/۰۰۹۵۸ \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ در لوله ای به قطر ۱۰ cm جریان دارد. توزیع سرعت آن به صورت سهمی و طبق معادله $V = ۰/۰۱۳۳ \left[\left(1 - \frac{r}{R} \right)^2 \right]$ است که در آن V بر حسب m/s و r فاصله شعاعی از مرکز لوله و R شعاع لوله است. تنش برشی وارده بر جدار لوله چند N/m^2 است؟

$$\begin{aligned} (۱) \quad & ۰/۰۰۰۵۲۶ \\ (۲) \quad & ۰/۰۱۳۱ \\ (۳) \quad & ۰/۰۵۲۶ \\ (۴) \quad & ۰/۱۳۱ \end{aligned}$$

۲۲. یک صفحه شیشه ای متحرک به فاصله ۱ mm از صفحه ثابت دیگری قرار دارد. بین دو صفحه از سیالی با جرم مخصوص $\frac{kg}{m^3}$ ۱۰۰۰ پر شده است. اگر نیروی لازم در واحد سطح برای حرکت صفحه متحرک با سرعت ثابت $۰/۱۰ \text{ m/s}$ معادل ۴ pa باشد

$$\begin{aligned} (۱) \quad & ۱۰^{-۵} \\ (۲) \quad & ۰/۰۴ \times ۱۰^{-۳} \\ (۳) \quad & ۰/۰۲ \times ۱۰^{-۳} \\ (۴) \quad & ۰/۰۴ \end{aligned}$$

۲۳. توزیع سرعت یک مایع لزج $\mu = 0.9 \frac{N.s}{m^2}$ بر روی یک سطح صلب بوسیله رابطه

$$U = 0.68y - y^2$$

داده شده است. U سرعت مایع بر حسب m/s در فاصله y متر از

سطح صلب می باشد. تنش برشی در نقطه $y = 0.17m$ از سطح برابر است با:

$$(1) \quad 0.612 \frac{N}{m^2} \quad (2) \quad 0.340 \frac{N}{m^2}$$

$$(3) \quad 0.306 \frac{N}{m^2} \quad (4) \quad 0.153 \frac{N}{m^2}$$

۲۴. کاویتاسیون (پدیده خلأ زایی) در لوله حتماً وقتی بوجود می آید که:

(۱) جریان کاملاً آشفته باشد (۲) فشار منفی باشد

(۳) دما منفی باشد (۴) هیچکدام

۲۵. قانون لزجت نیوتن بیان می دارد که:

(۱) تنش برشی نسبت معکوس با لزجت سیال دارد

(۲) تنش برشی نسبت مستقیم با گرادیان سرعت دارد

(۳) تنش برشی نسبت معکوس با کرنش برشی دارد

(۴) تنش برشی نسبت مستقیم با سرعت دارد

$$(1) \quad 3 \text{ و } 2 \quad (2) \quad 1 \text{ و } 3$$

$$(3) \quad 2 \text{ و } 3 \quad (4) \quad 2 \text{ و } 3 \text{ و } 6$$

۲۶. دلیل کاهش لزجت با دما در مایعات عبارت است از

(۱) Cohesion (۲) Adhesion

(۳) اندازه حرکت مولکولی (۴) هیچکدام

۲۷. سیال ایده آل چه سیالی است ؟

(۱) با اصطکاک کم و غیر قابل تراکم.

(۲) از قانون لزجت نیوتنی تبعیت می کند.

(۳) از معادله پیوستگی تبعیت می کند.

(۴) هر سیالی که می تواند در لوله بی اصطکاک جریان یابد.

۲۸. یک سیال فشرده در یک سیلندر دارای حجم الیتر (1000 cm^3) در فشار $1 \frac{M.N}{m^2}$

و حجم 995 cm^3 در فشار $2 \frac{M.N}{m^2}$ می باشد. مدول الاستیسیته بالک برای این سیال

چقدر است؟

۲۹. واحد SI لزجت چیست؟

$$(۲) \text{ } 9/81 \text{ poise}$$

$$(۱) \text{ } 10 \text{ poise}$$

$$(۴) \text{ معادل با } \text{poise} \text{ است}$$

$$(۳) \text{ } \frac{1}{9/81} \text{ poise}$$

۳۰. مدول الاستیسیته حجمی

(۲) به فشار بستگی ندارد

(۱) به لزجت بستگی دارد

(۴) با فشار افزایش می یابد

(۳) به درجه حرارت بستگی ندارد

۳۱. هر چه درجه حرارت سیالی بالاتر رود کشش سطحی آن می شود.

(۲) کم

(۱) زیاد

(۴) کم و زیاد

(۳) ثابت تر

۳۲. لزجت سینماتیکی مایعی برابر $5/88 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ و دانسیته آن 850 kg/m^3 است

لزجت دینامیکی این مایع برابر است با:

$$(۲) \text{ } 0/005 \text{ kg.m/s}$$

$$(۱) \text{ } 144/56 \times 10^{-6} \text{ kg/m.s}$$

$$(۴) \text{ } 144/56 \times 10^{-6} \text{ kg.m/s}$$

$$(۳) \text{ } 0/005 \text{ kg/m.s}$$

۳۳. یک صفحه فلزی به مساحت یک متر مربع و وزن $7/2 \text{ Kgf}$ روی سطح شیبدار

با زاویه 45° نسبت به افق، قرار گرفته است. چنانچه سرعت حرکت صفحه 1 m/s و

ضخامت لایه روغن بین صفحه و سطح شیبدار 1 mm باشد، لزجت دینامیک چقدر

است؟

۳۴. واحد کشش سطحی در دستگاه SI برابر است با:

$$(۲) \text{ } M.N$$

$$(۱) \text{ } cm.N$$

$$(۴) \text{ } \frac{N}{M}$$

$$(۳) \text{ } \frac{N}{cm}$$

۳۵. وزن مخصوص آب در دمای 20° سانتی گراد 9790 نیوتن بر متر مکعب و لزجت

دینامیک آن $0/01008$ پواز می باشد. لزجت دینامیکی آن چقدر است؟

$$(۲) \text{ } 0/00101 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$(۱) \text{ } 0/0001 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$(۴) \text{ } 1/5 \times 10^{-5}$$

$$(۳) \text{ } 1/01 \times 10^{-6}$$

۳۶. منظور از لزجت چیست؟

(۱) نیروهای بین آب و ذرات

(۲) نیروهای بین مایع و اینرسی آب

(۳) نیروهای چسبندگی بین ملکولهای مایع

(۴) نیروهای حرکتی آب

۳۷. مقدار عددی ضریب لزجت (μ) آب افزایش درجه حرارت از صفر تا ۱۰۰ درجه:

(۱) اضافه می شود.

(۲) تغییر نمی کند.

(۳) تا حدود ۵۰ اضافه و سپس کاهش می یابد.

(۴) کم می شود.

۳۸. سیالات حقیقی سیالاتی هستند که ویسکوزیته آنها می باشد.

(۱) ثابت

(۲) متغیر

(۳) غیر نیوتنی

(۴) صفر و یا یک

۳۹. فشار بخار یک سیال.....

(۱) با درجه حرارت رابطه خطی دارد.

(۲) با افزایش درجه حرارت کاهش می یابد.

(۳) با افزایش درجه حرارت افزایش می یابد.

(۴) بستگی به درجه حرارت ندارد.

۴۰. یکی از مهمترین خواص مایعات آن است که:

(۱) فشار و درجه حرارت تأثیر ناچیزی در حجم آن دارد.

(۲) فشار و درجه حرارت تأثیر به سزایی در حجم آن دارد.

(۳) فشار حجم آن را کم می کند.

(۴) درجه حرارت آن را کم می کند.

۴۱. سیال چیست؟

(۱) جسم مادی است که شکل معینی دارد و نمی تواند تحت اثر نیرو، تغییر شکل

بدهد.

(۲) جسم مادی است که شکل معینی ندارد و نمی تواند تحت تأثیر کوچکتین نیرو،

تغییر شکل بزرگی بدهد.

(۳) جسم مادی است که به سهولت نمی تواند جریان یابد.

(۴) جسم مادی است که به سهولت می تواند جریان یابد ولی تحت اثر نیرو تغییر شکل نمی دهد.

۴۲. در رابطه با تأثیر افزایش درجه حرارت در تغییر لزجت گاز کدام گزینه صحیح است؟

(۱) افزایش می یابد (۲) ابتدا زیاد و سپس کاهش می یابد

(۳) کاهش می یابد (۴) تغییر نمی کند

۴۳. کدام عبارت در مورد ویسکوزیته مطلق صحیح است؟

(۱) با افزایش دما ویسکوزیته مایعات افزایش می یابد

(۲) با افزایش دما ویسکوزیته گازها افزایش می یابد

(۳) با کاهش دما ویسکوزیته مایعات کاهش می یابد

(۴) با کاهش دما ویسکوزیته گازها افزایش می یابد