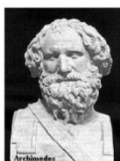


# فصل اول

خواص سیال

### 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 مهندسین هیدرولیک و ریاضی بوده است. مهندسین در زمینه‌های تجربی کار می‌کردند، در حالی 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، مهندسین و تکنسین‌های ماهر بصورت گروهی کار کرده و بر حسب ضرورت از هر دو جنبه عملی و تئوری بهره می‌گیرند.



ارشمیدس

( $287-212 BC$ )



نیوتن

( $1642-1727$ )



لیبنیتز

( $1646-1716$ )



برنولی

( $1667-1748$ )



اولر

( $1707-1783$ )



ناویر

( $1785-1826$ )



استوکس

( $1819-1903$ )



رینولدز

( $1842-1912$ )



پرانتل

( $1875-1953$ )



تیلور

( $1886-1975$ )

### شکل ۱-۱ چهره‌های آشنادر زمینه مکانیک سیالات

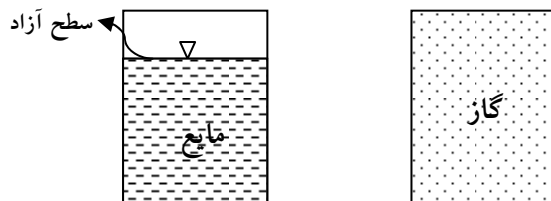
رشته‌های مختلف سیالات عبارتند از: استاتیک، مکانیک، هیدرولیک، ایرودینامیک، سینماتیک و مهندسی کشتی. این رشته‌ها در مکانیک سیالات بر اساس اصول و قوانین مکانیک (قوانین نیوتن، قوانین ترمودینامیک، و اصول بقاء ماده و انرژی و...) و خواص سیالات (قوانین نیوتن، قوانین معادله حالت، کشش سطحی، تراکم‌پذیری، فشار بخار

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<sup>۱</sup>؛ مطالعه حرکت آنها را دینامیک سیالات<sup>۲</sup> و مطالعه توأم ایستایی و پویایی سیالات را مکانیک سیالات<sup>۳</sup> می‌گویند. در مکانیک سیالات دو شاخه تخصصی به نام نیوماتیک<sup>۴</sup> (با نظام‌های هوای

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

فشرده سروکار دارد) و هیدرولیک<sup>۱</sup> (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<sup>۲</sup>

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<sup>۱</sup> 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 واحدها<sup>۲</sup>

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

1. Continues  
2. Dimension

(L)، زمان (T) و دما ( $\Theta$ ).

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<sup>۱</sup>

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 به دست 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 به دست آوریم: یک نیوتن نیرویی است که به جرم

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

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

نیروی 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. پیشنهادهایی 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 واحدها سیستم SI

علامت اختصاری	پیشوند	ضریب	علامت اختصاری	پیشوند	ضریب
m	میلی	$10^{-3}$	G	گیگا	$10^9$
$\mu$	میکرو	$10^{-6}$	M	مگا	$10^6$
n	نانو	$10^{-9}$	k	کیلو	$10^3$
p	پیکو	$10^{-12}$	c	سانتی	$10^{-2}$

### ۱-۴-۲ دستگاه جاذبه (گرانی) انگلیسی<sup>۱</sup>

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

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

1. British Gravitational system (BG)



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<sup>۱</sup>

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

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

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 (۱-۴) خواهیم داشت.

$$g_c = \frac{(1 lbm) \left( 32.2 \frac{ft}{s^2} \right)}{(1 lbf)}$$

چون نیروی  $1\text{ lbf}$  به جرم  $1\text{ lbm}$  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  $1\text{ lbf}$  شتاب  $\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}$  پیدا می‌کند پس داریم:

$$1 = 32/2\text{ lbm اسلاگ}$$

مثال ۱-۱: جسمی به وزن  $1000\text{ lbf}$ ، 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: $1\text{lb} = 4/448\text{N}$ , $1\text{lbf/in}^2 = 6895\text{Pa}$
فرکانس: $1\text{cycle} = 1\text{Hz}$ (سیکل بر ثانیه)
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: $1\text{in} = 25/4\text{mm}$ , $1\text{ft} = 0/3048$ , $1\text{mile} = 1/609\text{km}$

جرم: 1 slug = 14/5 kg, 1 lbm = 0/4536 kg
توان: 1 hp = 550 ft-lb/s = 746 W = 2545 Btu/h
فشار: 1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup> = 0/0209 lb/ft <sup>2</sup> = 1/45 × 10 <sup>-4</sup> psi, 25/4 mmHg = 3386 N/m <sup>2</sup>
اینچ آب: 1: 249/1 N/m <sup>2</sup> 1 lb/ft <sup>2</sup> = 47/88 N/m <sup>2</sup> = 47/88 Pa = 0. 4788 mb
اتمسفر: 1: 14/7 psi = 29/92 in. Hg = 760 mmHg = 101/325 kN/m <sup>2</sup>
ثابت عمومی گازها: 1 ft. lb/slug °R = 0/1672 N. m/kg °k
وزن مخصوص: 1 lb/ft <sup>3</sup> = 157/1 N/m <sup>3</sup> , جرم مخصوص: 1 slug/ft <sup>3</sup> = 515/4 kg/m <sup>3</sup>
دما: 1 °K = 1/8 °F = 1/8 °R
سرعت: 1 mi/hr = 1/467 ft/s = 1/609 km/hr = 0/4470 m/s
گالن: 0/1337 ft <sup>3</sup> = 0/03785 m <sup>3</sup> = 3/785 lit = 231 in <sup>3</sup>
حجم: 1 ft <sup>3</sup> = 0/02832 m <sup>3</sup> , 1 m <sup>3</sup> = 1000 lit, 1 in <sup>3</sup> = 16,390 mm <sup>3</sup> = 1/639 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup>

### ۱-۵ تنش برشی

تنش برشی عبارتست از تقسیم نیروی برشی بر سطح اعمال شده می‌باشد. این نیروی برشی، مولفه مماسی نیرو بر سطح می‌باشد. تنش برشی در یک نقطه، حد نیروی برشی وارد بر سطح است هنگامیکه این سطح به قدر کافی کوچک گردد و به یک نقطه تبدیل شود.

در سیالات در حال حرکت، تنش برشی که ناشی از نیروی برشی است، بوجود می‌آید. این تنش برشی باعث ایجاد تغییر سرعت در سیال می‌شود. به عبارت دیگر اگر قسمتی از سیال روی قسمت دیگر به علت اختلاف سرعت بلغزد باعث تغییر شکل و بهم خوردن شکل اولیه سیال و در نتیجه ایجاد تنش برشی می‌گردد و بر عکس اگر تمام لایه‌های سیال سرعت یکنواخت و مشابه داشته باشند هیچگونه تنش برشی ایجاد نشده و لایه‌های سیال نسبت به هم در حالت سکون قرار دارند.

### ۱-۶ لزجت<sup>۱</sup> (ویسکوزیته یا گرانروی)

لزجت یک خاصیت سیال است که مقاومت در برابر حرکت سیال را نشان می‌دهد و سبب چسبندگی قشرهای مختلف سیال ضمن حرکت می‌شود. لزجت در سیالات

1. Viscosity

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 مومتم 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<sup>۱</sup> (در مایعات بسیار بیشتر از گازها) و دیگری نیروهای تبادل مومتم ملکولی<sup>۲</sup> (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.

### ۱-۷ قانون لزجت نیوتن<sup>۳</sup>

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  $\tau$ ، تنش برشی (مقدار نیروی موثر بر واحد سطح) و  $\frac{dV}{dy}$ ،

گرادیان سرعت و  $\mu$ ، ضریب لزجت دینامیکی (مطلق) سیال را نشان می‌دهد.

تنش برشی ( $\tau$ ) 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<sup>۱</sup> 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:

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

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  $\left(\frac{kg}{m.s}\right)$  و  $\left(\frac{N.s}{m^2}\right)$  و در سیستم انگلیسی  $\left(\frac{lb.s}{ft^2}\right)$

است. لازم به ذکر است که در دستگاه CGS واحد لزجت دینامیکی  $\left(\frac{slug}{ft.s}\right)$

پواز (poise) می‌باشد که معادل  $\frac{N.s}{m^2} \cdot 0.1$  است.

از آنجایی که واحدهای ذکر شده در سیستم SI بزرگ می‌باشند از واحدهای کوچک تر نظیر poise یا Centipoise استفاده می‌شود.

روابط تبدیل واحد لزجت در سیستمهای آحاد به صورت زیر است:

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

$$cp = \text{centipoise} = 10^{-2} Pa.s$$

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

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

### ۹-۱ ضریب لزجت سینماتیکی<sup>۲</sup>

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

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7-1)$$

واحد لزجت سینماتیکی ( $\nu$ ) 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. است. همچنین واحد این ضریب در سیستم CGS،  $\frac{cm^2}{s}$  (استوکس) می‌باشد که برابر  $10^{-4} \frac{m^2}{s}$  یا  $1 \frac{cm^2}{s}$  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:

$$1 lb = 444800 \text{ dyne} \quad , \quad 1 ft = 30.48 cm$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{lb.s}{ft^2} = \frac{444800 \text{ dyne.s}}{30/48 \text{ cm}} = 478/7 \text{ poise}$$

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

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

و در سیستم انگلیسی خواهیم داشت:

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

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

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:

$$\frac{lb.s}{ft^2} = 448/4 \text{ poise}$$

$$\mu = 15/4 \text{ poise} = \frac{14/14}{448/4} = 0/316 \frac{lb.s}{ft^2}$$

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

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0/316}{1/688} = \frac{ft^2}{s}$$

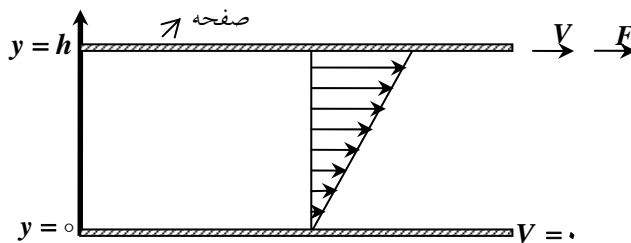
### ۱۰-۱ مسائل مطرح شده در مورد قانون لزجت نیوتن

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  $\mu$  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:

$$F = \tau A$$

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

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

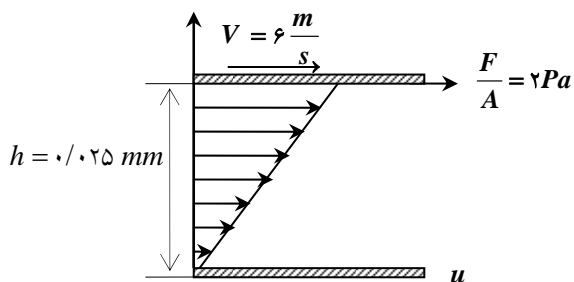
اگر فاصله بین دو صفحه کم یا سرعت حرکت صفحه پایین باشد می‌توان توزیع سرعت بین دو صفحه را خطی فرض کرد که در این صورت می‌توان به جای  $\frac{dV}{dy}$  از  $\frac{\Delta V}{\Delta y}$  استفاده کرد همچنین توجه داشته باشید که سطح پائین هم ممکن است حرکت داشته باشد که در این حالت به جای سرعت  $V$  سرعت نسبی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

مثال ۱-۴: صفحه‌ای به فاصله  $0.25 \text{ mm}$  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  $6 \frac{m}{s}$ ، برابر  $2 Pa$  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  $6 \frac{m}{s}$  و در مجاورت صفحه ثابت برابر صفر است. فاصله بین دو صفحه نیز خیلی کم است، به نحویکه می توان 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

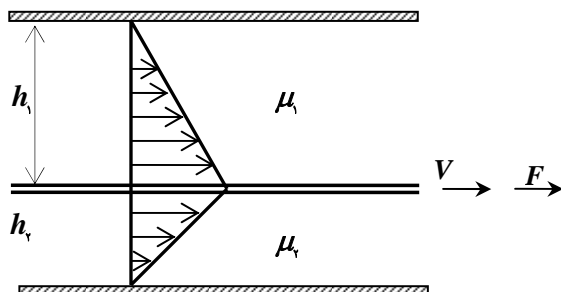
از طرفی می دانیم بعلت ثابت بودن سرعت صفحه متحرک و طبق قانون نیوتن، نیروی لازم در واحد سطح برای حرکت صفحه با سرعت مورد نظر، برابر است با نیروی اصطکاک وارد بر واحد سطح این صفحه که خود برابر تنش برشی سیال در لایه مجاور صفحه متحرک است. لذا می توان نوشت:

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

### ۱-۱۰-۲ حرکت یک صفحه بین دو سیال

مطابق شکل زیر صفحه ای به مساحت  $A$  را در نظر می گیریم که بین دو سیال با لزجت های  $\mu_1$  و  $\mu_2$  و ارتفاع های  $h_1$  و  $h_2$  قرار گرفته است. می خواهیم 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:

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

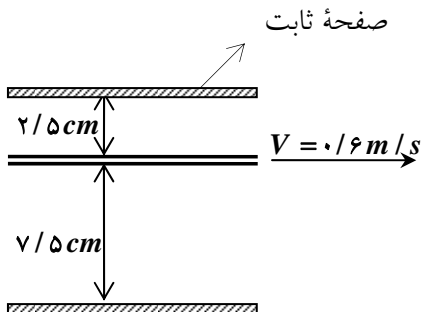
$$\tau_1 = \mu_1 \frac{V}{h_1} \quad , \quad \tau_2 = \mu_2 \frac{V}{h_r}$$

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

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

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

مثال ۱-۵: صفحه مسطحی با سطح مقطع  $0.3 \text{ m}^2$  بین دو صفحه ثابت موازی به فاصله  $10 \text{ cm}$  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.

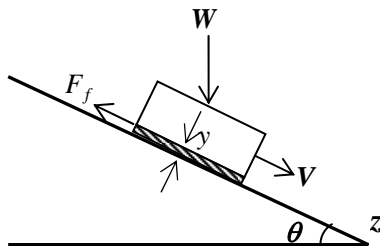
$$F = \tau A = (\tau_1 + \tau_2) A = \left( \frac{\mu V}{t_1} + \frac{\mu V}{t_2} \right) A = \mu VA \left( \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)$$

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

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

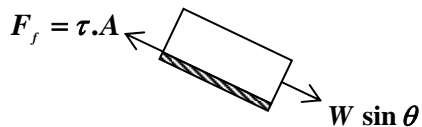
۱-۱۰-۳ سطح شیبدار

جسمی به وزن  $W$  را در نظر می‌گیریم که از روی سطح شیبداری که با افق زاویه  $\theta$  می‌سازد به سمت پایین می‌غزد. بین این جسم و سطح شیبدار سیالی با لزجت  $\mu$  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.

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

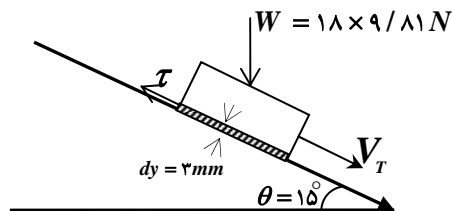
$$F_f = \tau A = \mu \frac{du}{dy} A = \mu \frac{V}{y} A$$

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

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  $\frac{N \cdot s}{m^2} = 8/14 \times 10^{-2}$  قرار دارد بطرف پایین

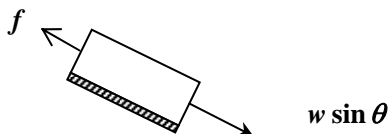
می لغزد. هرگاه سطح تماس جسم  $0.3 m^2$  باشد، سرعت نهایی را حساب کنید؟



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:



$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \Rightarrow \tau = 0.14 \times 1.2 \times \left( \frac{V_T}{0.03} \right) = 27/1 V_T$$

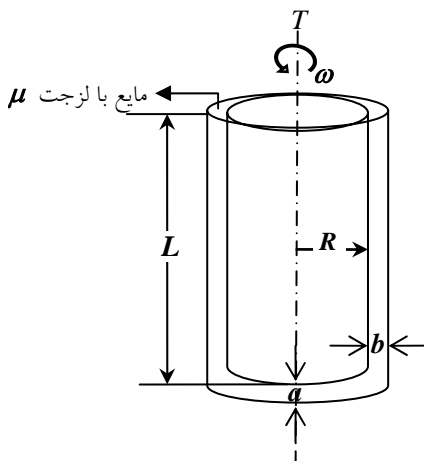
$$\sum F = 0 \Rightarrow W \sin \theta - f = 0 \Rightarrow w \sin \theta - \tau A = 0$$

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

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  $\omega$  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 استوانه‌ها:

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

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

ب) گشتاور وارده از طرف کف استوانه‌ها:

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

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

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

(۱)  $0.0165 \text{ Pa.s}$

(۲)  $0.0085 \text{ Pa.s}$

(۳)  $0.165 \text{ Pa.s}$

(۴)  $0.852 \text{ Pa.s}$

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

واحد سرعت زاویه‌ای است در  $\frac{2\pi}{60}$  ضرب می‌کنیم.

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

$$b = 1.0 / 1 - 1.0 = 0.1 \text{ cm} \quad , \quad \omega = \frac{2\pi}{6.0} \times 400 = 41.9 \text{ rad/sec}$$

$$\mu = \frac{0.13 \times 0.1 \times 10^{-2}}{2\pi \times 0.1^3 \times 0.3 \times 41.9} = 0.00165 \text{ Pa.s}$$

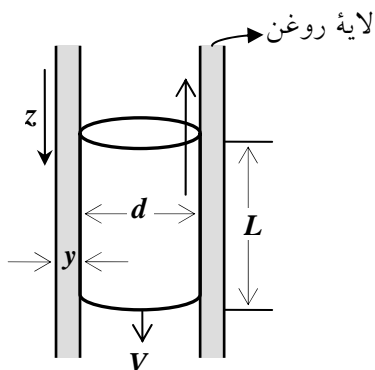
گزینه (۱) صحیح است.

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  $\mu$  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:  
 $W = mg = \rho \nabla g$  به دست آوریم که  $\rho$  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 ( $\tau$ ) و گرادیان

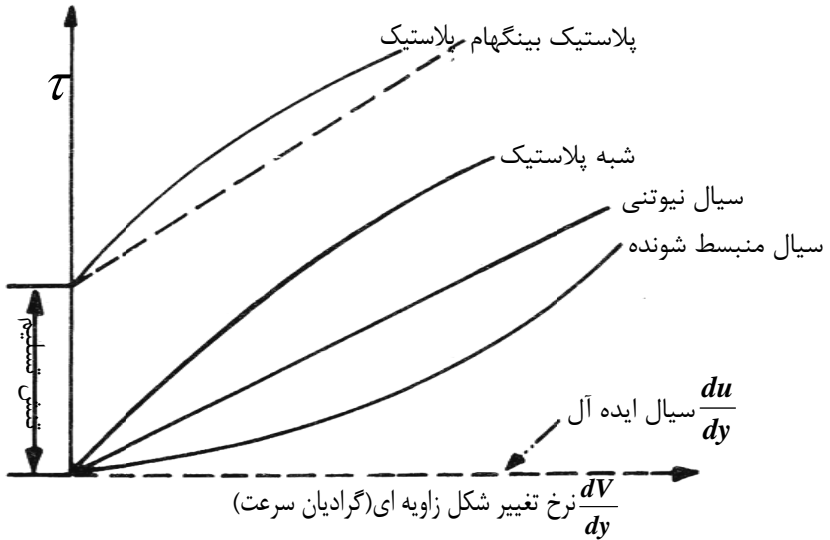


سرعت  $(\frac{dV}{dy})$  رابطه خطی وجود دارد و ضریب زاویه این خط، ضریب لزجت  $(\mu)$  است.

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

### 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 می توان سیالات پلاستیک، شبه پلاستیک و منبسط شونده را نام برد.

### ۱. پلاستیک<sup>۱</sup>

پلاستیک ها دارای تنش تسلیم معین  $\tau_0$  می باشند تا به جریان در آیند و طبق رابطه  $\tau = \tau_0 + \mu \left( \frac{dV}{dy} \right)^n$  که در آن  $n, \mu, \tau_0$  مقادیر ثابت هستند. اگر بین  $\tau$  و  $\frac{dV}{dy}$  رابطه خطی ثابتی وجود داشته باشد، سیال پلاستیک ایده آل است. همچنین اگر  $n = 1$  باشد جسم را پلاستیک بینگهام<sup>۲</sup> گویند.

$\tau_0$  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 فاضلاب ها)

### ۲. شبه پلاستیک<sup>۳</sup>

سیالی است که با افزایش تنش برشی، مقاومت (لزجت دینامیکی  $\mu$ ) آن کاهش می یابد. این دسته از سیالات قادر به تحمل هیچگونه تنش برشی نیستند و لزجت آنها با افزایش گرادیان سرعت، کاهش می یابد؛ مانند خمیر کاغذ، گل، شیر سیمان و محلول های کلوئیدی...

### ۳. سیال اتساعی یا منبسط شونده<sup>۴</sup>

سیالاتی منبسط شونده سیالاتی هستند که با افزایش تنش برشی، مقاومت (لزجت دینامیکی  $\mu$ ) آن بیشتر می شود و در این قبیل سیالات لزجت با افزایش گرادیان سرعت، افزایش می یابد. مانند توده ماسه بسیار ریز یا سوسپانسیون ماسه و نشاسته

### ب) سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان

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

---

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

### ۱. سیالات تیکسوتروپیک یا ژلاتین<sup>۱</sup>

سیالی است که با گذشت زمان رقیق شده و لزجت آن با افزایش تنش برشی کاهش می‌یابد. مانند: ژله‌ها، رنگ‌ها و جوهر چاپ.

### ۲. سیال ویسکوالاستیک<sup>۲</sup>

سیالی است که در تنش برشی ثابت، با گذشت زمان غلیظ می‌شود همانند سیالات غیرنیوتنی عمل می‌کنند و هنگامی که تنش برشی ناگهان تغییر می‌کند مانند پلاستیک‌ها عمل می‌کنند.

به‌طور کلی حالت‌های ذکر شده را می‌توان 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<sup>۳</sup>

حجم یک جسم عبارت است از فضایی که آن جسم اشغال می‌کند. از آنجایی که مولکول‌های سازنده جامدها و مایعات به همدیگر چسبیده‌اند<sup>۴</sup> (یعنی همدوس هستند) حجم اشغال شده، به ظرف حاوی آنها بستگی ندارد ولی در مورد گازها که مولکول‌هایشان همدس نیستند چنین چیزی درست نیست و حجم آنها برابر فضای داخلی ظرف حاویشان می‌باشد. 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<sup>۱</sup>

نسبت جرم به حجم یک سیال را جرم مخصوص یا چگالی آن سیال گویند و آن را با  $\rho$  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<sup>۲</sup> یا چگالی وزن

وزن واحد حجم سیال را وزن مخصوص گویند و آن را  $\rho$  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  $(g = 9/807 \frac{m}{s^2} = 32/173 \frac{ft}{s^2})$  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.

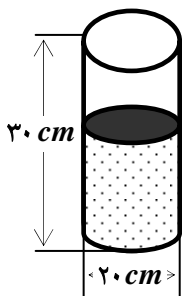
$$S_{\text{مایع}} = \frac{\rho_{\text{جسم}}}{\rho_{\text{آب}}} \quad (18-1)$$

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

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

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

شود تا نصف ارتفاع ظرف پرمی شود. مقدار جرم مخصوص روغن برحسب  $\frac{ton}{m^3}$  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 می‌آوریم:

$$V = \left( \frac{\pi d^r}{4} \right) \times h = \frac{\pi \times (0/2)^r}{4} \times 0/15 = 4/712 \times 10^{-3} m^3$$

سپس طبق روابط خواهیم داشت:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{2/2}{4/712 \times 10^{-3}} = 466/89 \frac{kg}{m^3} = 0/466 \frac{ton}{m^3}$$

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{466/89}{1000} = 0/466$$

$$S = \frac{\gamma}{\gamma_w} \rightarrow \gamma = 0/466 \times 9/806 = 4/57 \frac{kN}{m^3}$$

### ۱-۱۶ حجم مخصوص<sup>۱</sup>

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

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

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 می‌کنند.

### ۱-۱۷ فشار<sup>۲</sup>

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.

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

1. Specific volume  
2. pressure

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

فشار را می‌توان به صورت ارتفاع ستون سیال ( $h$ ) نیز بیان کرد یعنی:

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

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

### ۱-۱۸ گاز کامل<sup>۱</sup> و معادله حالت

گاز کامل یا گاز ایده‌آل گازی است که در آن نیروهای جاذبه مولکولی قابل صرف نظر باشد. هرچه نیروی جاذبه ی ملکولی افزایش یابد، گاز به بخار نزدیک و از گاز کامل دور می‌شود. فرق بین گاز کامل و سیال ایده‌آل این است که سیال ایده‌آل، سیال تراکم ناپذیر و بدون اصطکاک می‌باشد در حالی که گاز کامل هم دارای لزجت و هم قادر به ایجاد تنش‌های برشی است و تراکم‌پذیر نیز هست.

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

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

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 ( $k$ ) و ( $m$ ) جرم می‌باشد.

### ۱-۱۹ قابلیت تراکم‌پذیری سیالات (مدول بالک یا ضریب کشسانی حجمی)<sup>۲</sup>

ضریب تراکم‌پذیری، قابلیت تراکم پذیری مایعات را در اثر فشار بیان می‌کند. تمام سیالات در اثر اعمال فشار تغییر حجم می‌دهند و متراکم می‌شوند. با این عمل انرژی در داخل سیال ذخیره شده و به محض برطرف شدن فشار به حالت اولیه بر می‌گردد.

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  $FL^{-2}$  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 به‌طور ناگهانی و یا بشدت تغییر می‌نماید (مانند ضربه قوچ) 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 ۱-۹: یک مایع متراکم در یک سیلندر، در فشار  $\frac{1MN}{m^2}$  دارای حجم  $1000\text{ cm}^3$

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

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



### ۱-۲۰ فشار بخار<sup>۱</sup> ( $P_V$ )

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 جزیبی بخار مایع از تبخیر بیشتر مایع جلوگیری خواهد کرد. در چنین حالتی گفته می‌شود که فضا از بخار مایع اشباع شده و فشار جزیبی 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.

### ۱-۲۱ کشش سطحی<sup>۲</sup>

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  $\sigma$  (سیگما) نشان داده می‌شود.

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

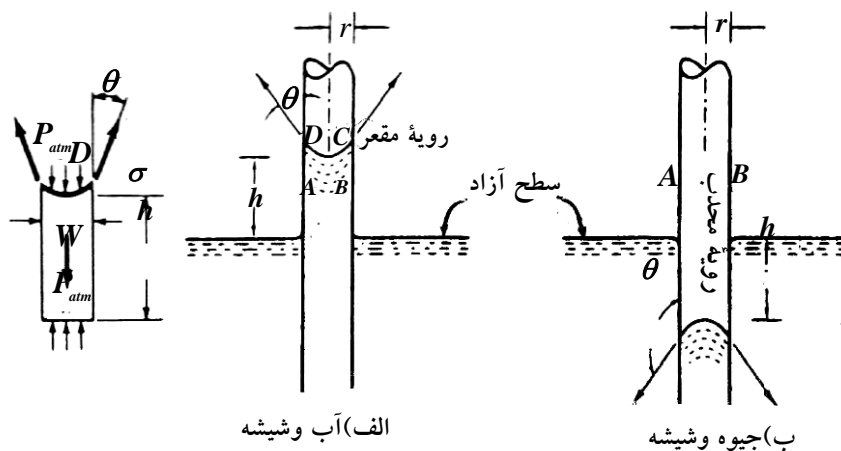
کشش سطحی را انرژی سطحی ملکول‌های مایع نیز می‌نامند که در این حالت، کشش سطحی برابر با انرژی سطحی یا کار انجام شده به ازای واحد سطح است. واحد کشش سطحی در سیستم SI نیوتن بر متر  $\left(\frac{N}{m}\right)$  یا  $\left(\frac{lbf}{ft}\right)$  و دیمانسیون یا بعد کشش سطحی  $FL^{-1}$  می‌باشد.

کشش سطحی مایعات برای توضیح برخی پدیده‌ها که در سطح مشترک یک گاز و یک مایع مثل (آب و هوا) 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<sup>۱</sup>) و جاذبه بین ملکول‌های غیریکسان (چسبندگی<sup>۲</sup>) 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  $\sigma$  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

1. Cohesion  
2. Adhesion

## 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:

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

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

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

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

مثال ۱-۱۰: جت جیوه‌ای با مقطع دایره به قطر  $0.1\text{mm}$  از یک سوراخ خارج می‌شود اختلاف فشار داخل و خارج جت چقدر است؟ ضریب کششی سطحی جیوه

در این حالت  $\frac{N}{m}$   $0.51$  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؟

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

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

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

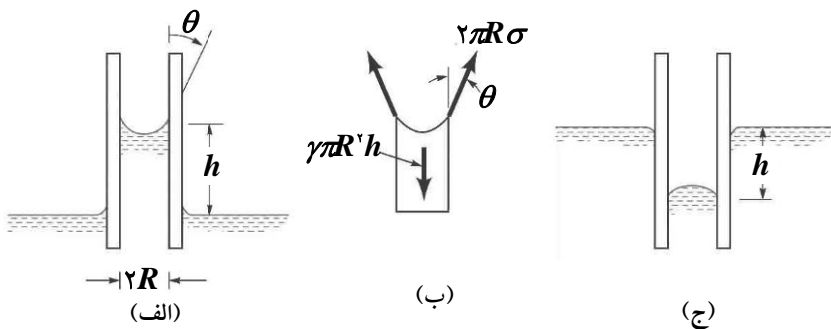
با توجه به فرمول‌های فوق هر چقدر میزان  $R$  کوچک‌تر باشد، مقدار  $\Delta P$  بیشتر خواهد شد. و در مورد حباب در حالتی که  $\Delta P$  از فشار بخار مایع بیشتر شود حباب خواهد ترکید.

۱-۲۲-۲ مویستگی<sup>۱</sup>

هر گاه یک لوله نازک (مویین) در سطح آزاد مایع فرو برده شود بدلیل کشش سطحی و مقدار نسبی نیروهای چسبندگی و پیوستگی، مایع در این لوله بالا یا پائین می‌رود که این پدیده را مویستگی 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 مویین بالا رفته و سطح مقعر تشکیل می‌شود؛ مانند صعود آب در لوله مویین شیشه‌ای (شکل ۱-۲۰الف) و اگر نیروی پیوستگی بیشتر از چسبندگی باشد مایع در لوله مویین پائین رفته و تشکیل سطح محدب می‌دهد، مانند نزول جیوه در لوله مویین (شکل ۱-۲۰ج)



شکل ۱-۱۴

طریقه به‌دست آوردن ارتفاع مویستگی در لوله‌های مویین

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

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

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

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\gamma R} \quad \text{یا} \quad \frac{2\sigma \cos\theta}{\gamma d} \quad (31-1)$$

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

$R$ : شعاع لوله و  $d$  قطر لوله ( $m$ )

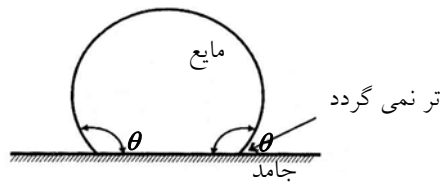
$\gamma$ : وزن مخصوص مایع ( $\frac{N}{m^3}$ )

$\theta$ : زاویه بین مماس بر سطح آب و جدار لوله یا زاویه ترشوندگی

$\sigma$ : کشش سطحی ( $\frac{N}{m}$ )

**نکات:**

کهب با کاهش شعاع در لوله مویب میزان صعود مویبگی افزایش می‌یابد.  
 کهنیروی کشش سطحی و در نتیجه ارتفاع آب در لوله مویب، بستگی به جنس مایع و زاویه تماس آن با لوله و شعاع لوله دارد.  
 کهبهرگاه زاویه تماس ( $\theta$ ) کوچکتر از  $90^\circ$  باشد مایع سطح جامد را تر می‌کند، برای مثال می‌توان از تماس آب با صابون نام برد.  
 کهبهرگاه زاویه تماس ( $\theta$ ) بزرگتر از  $90^\circ$  باشد مایع سطح جامد را تر نمی‌کند، برای مثال می‌توان از تماس آب با موم نام برد.  
 کهبتوجه داشته باشید که زاویه تماس آب با یک سطح خیلی تمیز و صاف را می‌توان صفر در نظر گرفت. بنابراین میزان صعود مویبگی ( $h$ ) به تمیزی لوله بستگی دارد.



شکل ۱-۱۵

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

است از:

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

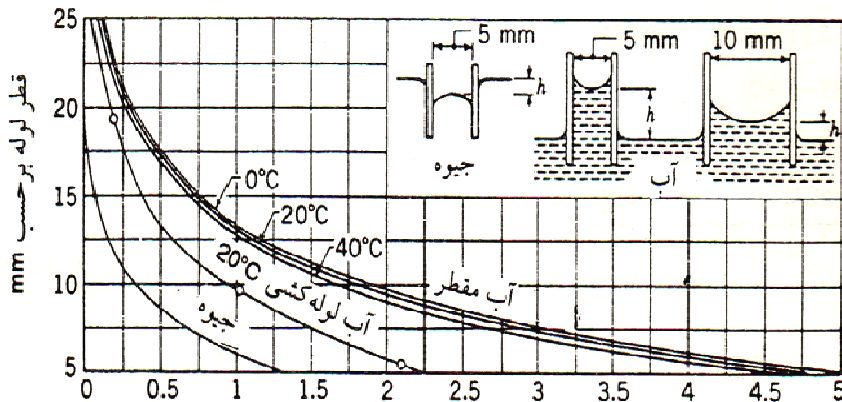
میزان صعود موئینگی بین دو لوله هم محور به شعاعهای  $r_1$  و  $r_2$  عبارت است

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 ۱-۲۲ صعود و نزول موئینگی بر حسب mm

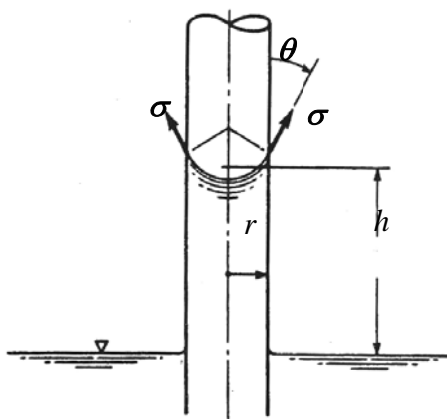
مثال ۱-۱۲: اندازه بالا آمدن آب در لوله موئین را در سطح مشترک (آب - هوا -

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<sup>۱</sup>

هنگامی که در نقاطی از مایع فشار به قدری کاهش یابد که مساوی فشار بخار یا کمتر از آن گردد، کاویتاسیون (خللازی) به وجود می‌آید و باعث می‌شود 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 می‌شود. 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 می‌تواند 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 می‌شود 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)

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

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، به‌عنوان 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 (بتنی) 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  $\tau$  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) تراکم ناپذیر

(۲) دارای لزجت صفر است

(۳) تراکم پذیر 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 می کند.

(۲) ثابت می باشد.

(۳) با درجه حرارت تغییر می کند ولی مستقل از فشار است.

(۴) فقط با فشار تغییر می کند 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 فشارسنجی در نظر گرفته می شود 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

۱) ۱۳۶ (۲) ۱۳۳/۱۰

۳) ۱۳/۶۰ (۴) ۹/۷۹

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

۱) ۱۳/۳۳ (۲) ۱۱/۵۵

۳) ۱۰mm (۴) ۵/۷mm

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:

۱) ۲/۸ (۲) ۵/۶

۳) ۱۱/۲ (۴) ۲۲/۴

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

۱) ۱/۵۵mm (۲) ۲/۱۵mm

۳) ۳mm (۴) ۶mm

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.

۱) ۱۰۰cm (۲) ۲۷۲cm

۱۳۶cm (۴)

۴۰cm (۳)

۱۹. یک بلوک مستطیلی با جداره‌های  $W$  به سمت پایین یک سطح شیبدار با زاویه  $30^\circ$  نسبت به افق سر می خورد. سطح شیبدار با یک سیال لزج با ضریب ویسکوزیته  $\mu$  وضخامت  $t$  روغنکاری می شود. در صورتی که سرعت لغزش بلوک  $V$  باشد، بنابراین سطح تماس بلوک با سطح شیبدار روغنکاری شده خواهد بود:

$$\frac{wt}{\mu N} \quad (2) \qquad \frac{wt}{2\mu N} \quad (1)$$

$$\frac{4wt}{\mu N} \quad (4) \qquad \frac{3wt}{\mu N} \quad (3)$$

۲۰. افزایش فشار تا  $\frac{N}{cm^2}$  ۲۰۰ جرم مخصوص آب را  $0.1\%$  افزایش می دهد. مدول الاستیسیته حجمی (مدول بالک) آب مساوی است با:

$$20 \frac{GN}{cm^2} \quad (2) \qquad 200 \frac{GN}{cm^2} \quad (1)$$

$$0.2 \frac{GN}{cm^2} \quad (4) \qquad 2 \frac{GN}{cm^2} \quad (3)$$

۲۱. سیالاتی با لزجت دینامیکی  $\mu = 0.00958 N \cdot s / m^2$  در لوله‌ای به قطر  $10\text{cm}$  جریان دارد. توزیع سرعت آن به صورت سهمی و طبق معادله  $V = 0.1332 \left[ \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^2 \right]$  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؟

$$0.000526 \quad (1)$$

$$0.1331 \quad (2)$$

$$0.0526 \quad (3)$$

$$0.1331 \quad (4)$$

۲۲. یک صفحه شیشه‌ای متحرک به فاصله  $1\text{mm}$  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  $0.10\text{m/s}$  معادل  $4\text{pa}$  باشد ضریب لزجت سینماتیکی سیال  $V$  برابر چند  $m^2/s$  است؟

$$10^{-5} \quad (1)$$

$$0.04 \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$0.02 \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$0.4 \quad (4)$$

۲۳. توزیع سرعت یک مایع لزج  $\mu = 0.9 \frac{N.s}{m^2}$  بر روی یک سطح صلب بوسیله رابطه  $y^2 - 0.68y = U$  داده شده است.  $U$  سرعت مایع برحسب  $m/s$  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. کواپتاسیون (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

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

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

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 ( $1000 \text{ cm}^3$ ) در فشار  $1 \frac{M.N}{m^2}$

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

چقدر است؟

۲۹. واحد SI لزجت چیست؟

(۲)  $9/81 \text{ poise}$

(۱)  $10 \text{ poise}$

(۴) معادل با  $\text{poise}$  است

(۳)  $\frac{1}{9/81} \text{ poise}$

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  $850 \text{ kg}/\text{m}^3$  است

لزجت دینامیکی این مایع برابر است با:

(۲)  $0/005 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}$

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

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

(۳)  $0/005 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s}$

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

با زاویه  $45^\circ$  نسبت به افق، قرار گرفته است. چنانچه سرعت حرکت صفحه  $1 \text{ m}/\text{s}$  و

ضخامت لایه روغن بین صفحه و سطح شیبی  $1 \text{ mm}$  باشد، لزجت دینامیک چقدر

است؟

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

(۲)  $M \cdot N$

(۱)  $\text{cm} \cdot N$

(۴)  $\frac{N}{M}$

(۳)  $\frac{N}{\text{cm}}$

۳۵. وزن مخصوص آب در دمای  $20^\circ$  سانتی گراد  $9790$  نیوتن بر متر مکعب و لزجت

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

(۲)  $0/00101 \text{ m}^2/\text{s}$

(۱)  $0/0001 \text{ m}^2/\text{s}$

(۴)  $1/5 \times 10^{-5}$

(۳)  $1/01 \times 10^{-6}$

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 ( $\mu$ ) آب افزایش درجه حرارت از صفر تا ۱۰۰ درجه:

- (۱) اضافه می‌شود.
  - (۲) تغییر نمی‌کند.
  - (۳) تا حدود ۵۰ اضافه و سپس کاهش می‌یابد.
  - (۴) کم می‌شود.
۳۸. سیالات حقیقی سیالاتی هستند که ویسکوزیته آنها ..... می‌باشد.

- (۱) ثابت
- (۲) متغیر
- (۳) غیرنیوتنی
- (۴) صفر و یا یک

۳۹. فشار بخار یک سیال.....

- (۱) با درجه حرارت رابطه خطی دارد.
  - (۲) با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد.
  - (۳) با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد.
  - (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 می‌کند.
- (۴) درجه حرارت آن را کم می‌کند.

۴۱. سیال چیست؟

- (۱) جسم مادی است که شکل معینی دارد و نمی‌تواند تحت اثر نیرو، تغییر شکل بدهد.
- (۲) جسم مادی است که شکل معینی ندارد و نمی‌تواند تحت تأثیر کوچکترین 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



# فصل دوم

## استاتیک سیالات

### ۱-۲ مقدمه

استاتیک سیالات شاخه‌ای از مکانیک سیالات است که سیال را در حالت سکون بررسی می‌کند و تغییرات فشار و نیروهای وارد بر اجسام غوطه‌ور مورد بحث قرار می‌گیرد. در این فصل سیالی را بررسی می‌کنیم که یا ساکن یا به صورتی در حرکت است که حرکت نسبی بین ذرات (لایه‌ای از سیال) با ذرات لایه مجاورش وجود ندارد. و در هر دو حالت، تنش برشی در سیال وجود ندارد و تنها نیروی سطحی که بر ذرات اثر می‌گذارد نیروی فشاری (عمودی) است.

همان‌طور که خواهیم دید، نیروهای فشاری (عمودی) که توسط سیالات منتقل می‌شوند در بسیاری از موارد مهم اند. با استفاده از اصول هیدرواستاتیک، می‌توانیم نیروهای وارد بر اشیاء غوطه‌ور را محاسبه کنیم، که در طراحی ساختمان کشتی‌ها، سدها، دریچه‌های هیدرولیکی و غیره مهم‌اند.

### ۲-۲ فشار

فشار در هر نقطه از یک سیال ساکن عبارت است از نیرویی که توسط سیال بر واحد سطح در آن نقطه وارد می‌شود.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\text{(نیروی وارده)}}{\text{(سطح)}} \quad (1-2)$$

واحد فشار در سیستم SI نیوتن بر متر مربع ( $N/m^2$ ) میباشد که برابر یک پاسکال  $Pa$  است و واحد فشار در سیستم انگلیسی پوند بر فوت مربع ( $psf$ ) و یا پوند بر اینچ مربع ( $psi$ ) می باشد.

$$\left( \frac{lb}{in^2} = psi, \quad \frac{kg}{cm^2} = bar, \quad \frac{N}{m^2} = Pa \right)$$

فشار سیالات دارای دو خاصیت عمده زیر است:

الف) فشار هیدرو استاتیک در هر نقطه از سیال، بر هر سطحی که در آن نقطه در نظر گرفته شود، عمود است. علت این امر آن است که هنگامی که سیال به حالت تعادل است، تنش های کششی یا برشی را نمی تواند تحمل کند، بنابراین تنها برآیند عمودی نیروها موثر خواهد بود. به عبارت دیگر، فشار هیدرو استاتیک فقط به حالت عمودی بر سطح اثر می کند.

ب) فشار هیدرو استاتیک در هر نقطه، در تمام جهات دارای مقدار مساوی است. به عبارت دیگر، میزان فشار به امتداد سطحی که در آن نقطه در نظر گرفته شده است، بستگی ندارد.

ماهیت فشار در مایعات و گازها متفاوت است. در مایعات فاصله ملکولها نسبتاً کم است، به این دلیل ملکولها قادرند نیروهایی که بر هر یک از آنها وارد می شود به ملکولهای دیگر منتقل کنند. بنابراین ملکولهایی که در عمق معین از یک مایع قرار دارند نیروی وزن ملکولهای بالاتر را به قسمت پایین انتقال می دهند. در نتیجه فشار در هر نقطه از یک مایع ساکن از وزن ذرات مایعی که در ارتفاع بالاتر از آن قرار دارند ناشی می شود. در گازها چون فاصله ملکولها نسبتاً زیاد است، وزن یک ملکول گاز نمی تواند به ملکول دیگر منتقل شود. بنابراین عامل فشار در گازها وزن آنها نیست بلکه از ضربات ملکولهایی که به یک سطح برخورد می کنند ناشی می شود. هر چه تعداد این ضربات بیشتر باشد فشار بیشتر خواهد بود. برای مثال هر چه از سطح دریا بالاتر می رویم فشار هوا کاهش می یابد. علت این امر، کاهش جاذبه زمین و کاهش تعداد ملکولها در واحد حجم است که در پی آن تعداد ضربات وارد بر واحد سطح یعنی فشار کاهش می یابد.

### نکات کلیدی:

اگر دو نقطه در ارتفاعهای یکسانی قرار داشته باشند، لزوماً دارای فشارهای یکسانی خواهند بود حتی اگر نقاط در یک صفحه افقی در ارتباط مستقیم نباشند. قانون پاسکال: فشار در هر نقطه از یک سیال ساکن در کلیه جهات یکسان بوده و مستقل از جهت یعنی:

$$P_x = P_y = P_z = P \quad (۲-۲)$$

هر گاه سیال ساکن نبوده و لایه‌های آن نسبت به هم حرکت داشته باشند فشار در یک نقطه را میانگین فشار در جهات مختلف در نظر می‌گیریم.

$$p = \frac{1}{3}(p_x + p_y + p_z) \quad (۳-۲)$$

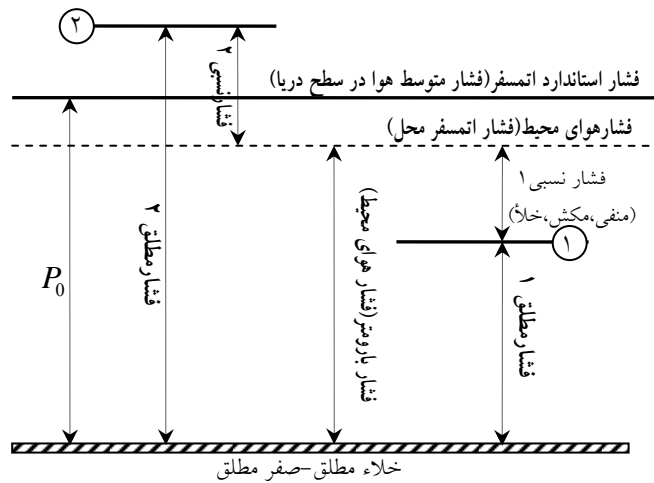
سطح آزاد عبارت است از سطح مشترک یک مایع و یک گاز و یا سطح مشترک دو مایع غیر محلول در یکدیگر.

### ۳-۲ فشار استاتیکی و فشار دینامیکی

هنگامی که از فشار سیال سخنی به میان می‌آید، مقصود نیرویی است که سیال ساکن در هر نقطه بر واحد سطح اعمال می‌کند و به آن فشار استاتیکی گفته می‌شود یا به‌طور ساده، فشار می‌گویند. اگر سیال در حال حرکت باشد، توده سیال در حال حرکت نیز نیرویی بر واحد سطح اعمال می‌کند که فشار دینامیکی نام دارد. بدیهی است فشار دینامیکی از سرعت سیال ناشی می‌شود و بنابراین مقدار آن به سرعت نسبی سیال و صفحه بستگی دارد.

### ۴-۲ فشار نسبی و فشار مطلق

فشار را می‌توان نسبت به هر مبنای دلخواه بیان کرد. اما معمولاً یا نسبت به صفر مطلق یا نسبت به اتمسفر محلی بیان می‌شود. فشار نسبت به خلا مطلق را فشار مطلق گویند. فشار نسبت به فشار اتمسفر محلی را فشار نسبی گویند.



شکل ۱-۲ مبنا و واحدهای اندازه‌گیری فشار

در مکانیک سیالات فشار مطلق بندرت بکار می‌رود. در این کتاب منظور ما از فشار، همیشه همان فشار نسبی خواهد بود (مگر اینکه یاد آور شویم). در تمام فرمولها منظورمان از علامت  $P$  همان فشار نسبی می‌باشد و اگر چنانچه لازم آید که فشار مطلق را در محاسبات بکار بریم کافی است که فشار جو را  $101/3 \text{ KPa}$  به فشار نسبی اضافه کنیم. در حالت کلی مقایسه‌های فشار به شکلهای زیر تقسیم می‌شود.

**فشار صفر مطلق (خلأ مطلق یا کامل):** پائین‌ترین فشار ممکن که در آن صفر

مطلق به‌عنوان مبنا است. در این فشار خلأ کامل وجود دارد.

**فشار اتمسفر محلی:** همان فشار اطراف ما می‌باشد و با شرایط محیط (آب و هوا

و ارتفاع) تغییر می‌کند و ممکن است بیشتر و یا کمتر از فشار استاندارد باشد (مبنای فشار نسبی).

**فشار اتمسفر استاندارد:** فشار متوسط در سطح دریا می‌باشد و برابر:

$$P_0 = 1 \text{ atm} = 101/325 \text{ kPa} = 1/01322 \text{ bar} = 14/7 \text{ psi} = 10/34 \text{ mHg} = 760 \text{ mmHg}$$

**فشار نسبی (فشار درجه، گیج یا بارومتر):** هنگامی که فشار یک سیال نسبت به

فشار اتمسفر محلی اندازه‌گیری شود آنرا فشار نسبی گویند.

**فشار مطلق:** هنگامی که فشار بر حسب اختلاف آن باخلاً کامل یا مطلق بیان شود آن را فشار مطلق گویند. بنابراین با توجه به شکل (۲-۱) بین فشار مطلق و فشار نسبی رابطه زیر برقرار می‌باشد:

$$(۲-۴) \quad \text{فشار نسبی } ۲ + \text{فشار بارومتر (فشار هوای محیط)} = \text{فشار مطلق } ۲$$

$$\text{فشار نسبی } ۱ (\text{منفی، مکش، خلاً}) - \text{فشار بارومتر (فشار هوای محیط)} = \text{فشار مطلق } ۱$$

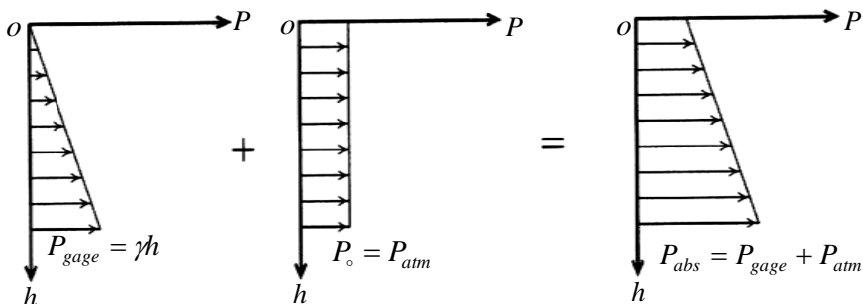
$$P_{abs} = P_{bar} + P_{gage} \quad \text{یا (۲-۵)}$$

**فشار منفی (مکش یا خلاً):** در صورتی که فشار در زیر فشار اتمسفر محلی باشد آن را فشار منفی (مکش یا خلاً) می‌گویند.

**نکته:**

فشار بیشتر از فشار اتمسفر را فشار نسبی و فشار کمتر از فشار اتمسفر را فشار خلاء گویند. در حل مسائل فشار نسبی را با عدد مثبت برای مثال  $+۶۰۰$  پاسکال و فشار خلاء را با عدد منفی  $-۶۰۰$  پاسکال نشان می‌دهند.

نمودارهای شکل (۲-۲) مقایسه‌ای را جهت درک بهتر فشار نسبی و فشار مطلق ارائه می‌دهند.



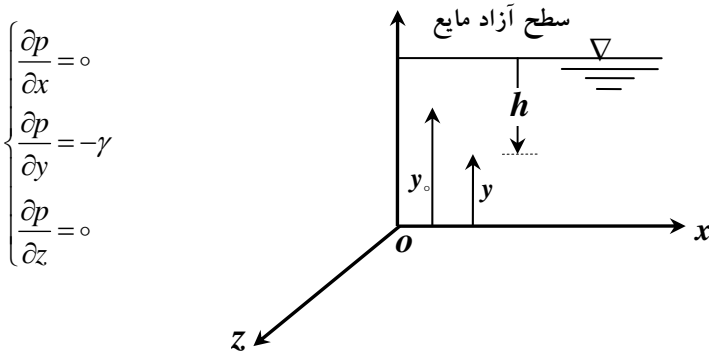
شکل ۲-۲

مثال ۲-۱: اگر فشار اتمسفر در ناحیه‌ای  $۱/۵$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع باشد، میزان فشار در نقطه‌ای واقع در عمق  $۳$  متری زیر سطح آب را حساب کنید؟

$$P = P_o + \gamma h = ۱/۵ + \frac{۱ \times ۳ \times ۱۰۰}{۱۰۰۰} = ۱/۸ \text{ kg/cm}^2$$

### ۵-۲ محاسبه فشار در مایعات

اگر مایع ساکنی را با سطح آزاد مشخص در نظر بگیریم، در آن صورت خواهیم داشت:



شکل ۲-۳

این روابط نشان می‌دهند که فشار تابعی از  $x$  و  $z$  نیست و تنها در راستای  $y$  تغییر می‌کند، بنابراین می‌توان در معادله  $\frac{\partial P}{\partial y} = -\gamma$  از مشتق معمولی استفاده کرد و معادله اساسی هیدرواستاتیک که تغییرات فشار نسبت به عمق سیال می‌باشد را نوشت:

$$\frac{dP}{dy} = -\gamma \quad (۲-۶)$$

این معادله برای هر سیال ساکن (مایع و گاز) در میدان جاذبه معتبر است صادق است و برای محاسبه توزیع فشار باید از این معادله بین دو حد مناسب انتگرال گیری کنیم. اگر فشار در سطح آزاد مایع را با  $P_0$  نشان دهیم و بدانیم که مقدار آن برابر فشار اتمسفر ( $P_{am}$ ) است، در آن صورت با انتگرال گیری از معادله مذکور از  $y_0$  با فشار  $P_0$  تا  $y$  با فشار  $P$  خواهیم داشت:

$$dP = -\gamma dy \rightarrow \int_{P_0}^P dP = -\int_{y_0}^y \gamma dy$$

حال اگر مایع مورد نظر همگن و غیر قابل تراکم باشد، یعنی وزن مخصوص آن مقدار ثابتی داشته باشد، در آن صورت با لحاظ کردن  $h = y_0 - y$ ، بعنوان فاصله از سطح آزاد مایع، می‌توان نوشت:

$$P - P_0 = \gamma(y - y_0) = \gamma h$$

$P - P_0$  را که فشار نسبی یا فشار گیج نامیده می‌شود، با  $P_{gage}$  نمایش می‌دهند و نشان دهنده فشار مایع بدون در نظر گرفتن فشار ناشی از اتمسفر در محل است. عبارت دیگر می‌توان گفت فشار نسبی، فشاری است که نسبت به فشار محیط سنجیده می‌شود. با توجه به روابط ذکر شده مقدار فشار نسبی برابر است با:

$$P_{gage} = \gamma h \quad (7-2)$$

ولی چنانچه هدف تعیین فشار کل یعنی مجموع فشار مایع و فشار اتمسفر باشد، در آنصورت از فشار مطلق که با  $P_{abs}$  نشان داده می‌شود، استفاده می‌کنیم. فشار مطلق، فشاری است که نسبت به خلأ مطلق (فشار صفر مطلق) سنجیده می‌شود و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P - P_0 = \gamma h \rightarrow P = P_0 + \gamma h \rightarrow P_{abs} = p_{atm} + P_{gage} \quad (8-2)$$

که در آن  $\gamma$  وزن مخصوص سیال بر حسب  $\left(\frac{N}{m^3}\right)$ ؛  $P$  فشار در هر نقطه از سیال، بر حسب  $\left(Pa = \frac{N}{m^2}\right)$  و  $h$  عمق است و برابر  $(y - y_0)$  می‌باشد و بر حسب  $(m)$  است. اغلب در مایعات بهتر است که مبدا دستگاه مختصات را در سطح آزاد مایع (سطح مرجعی) که معمولاً فشار یک اتمسفر است در نظر بگیریم.

## ۲-۶ تغییر فشار با عمق

فشار را می‌توان بر حسب ارتفاع ستون مایع نیز بیان کرد که معادل نیروی وارد به واحد سطح، در کف ستون است.

فشار هر نقطه یک مایع به طور مستقیم متناسب با عمق آن افزایش می‌یابد (عمق نسبت به سطح آزاد مایع) این موضوع را می‌توان با در نظر گرفتن سطح کوچکی از مایع که در عمق  $h$  نسبت به سطح آزاد مایع قرار گرفته روشن نمود. (شکل ۲-۴)

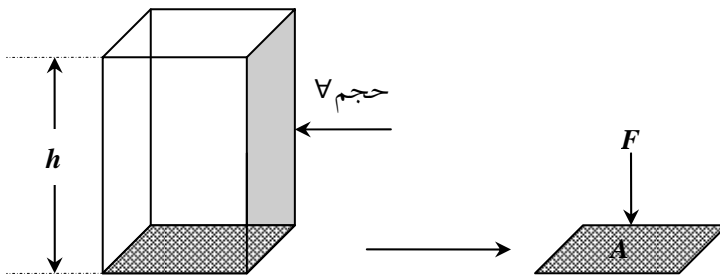
وزن مایع بالای سطح

$$F = W = \gamma V = \rho g . A . h$$

$$P = \frac{F}{A} = \rho g h$$

$$P = \rho g h = \gamma h \quad (۹-۲)$$

در این رابطه فشار  $P$  (نیوتن بر متر مربع یا پاسکال)؛  $F$  نیروی وارد بر سطح (نیوتن)؛  $\rho$  جرم مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) و  $h$  ارتفاع آب (متر) است.



شکل ۲-۴

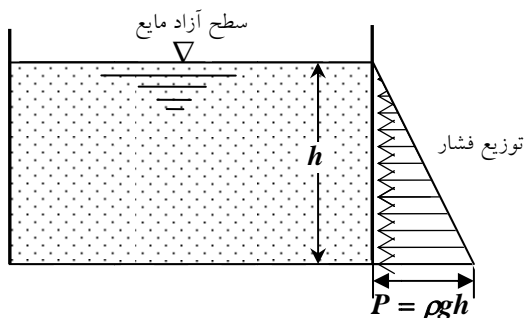
### نکات:

☞ در یک سیال ساکن، فشار در راستای افق ثابت و در راستای قائم به صورت خطی تغییر می‌کند.

☞ فشار ناشی از سیال در هر نقطه داخل آن بستگی به شکل ظرف ندارد. به عنوان مثال اگر دو استوانه با قطرهای مختلف دارای سیال با ارتفاع یکسان باشند، فشار در کف آنها مساوی است.

☞ فرمول (۹-۲) نشان می‌دهد که فشار درون مایع از وزن آن ناشی می‌شود و از آنجا که فشار با عمق تناسب مستقیم دارد توزیع آن مثلث گونه خواهد بود. منحنی تغییرات فشار هیدرواستاتیک برای یک سیال با سطح آزاده شکل زیر می‌باشد:

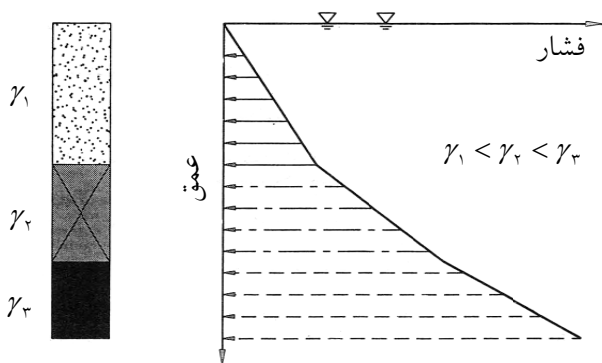




شکل ۲-۵

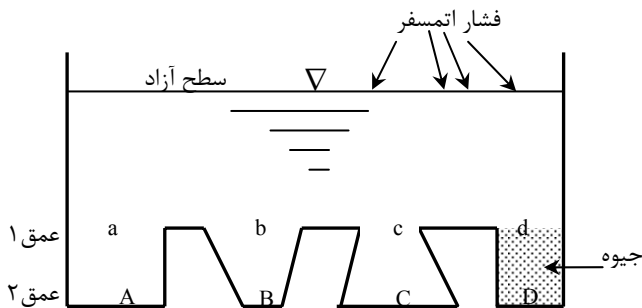
اگر چنانچه سطح آزاد مایع در فشار متعارفی واقع باشد این فرمول فشار نسبی در عمق  $h$  را نشان می‌دهد و اگر چنانچه سطح آزاد مایع در فشار دیگری غیر از فشار متعارفی باشد می‌بایست مقدار آن را منظور داشت (یعنی از مقدار داده شده توسط فرمول (۲-۹) کم نمود و یا به آن افزود).

اگر مایعات با وزن مخصوص‌های مختلف روی هم قرار گیرند، منحنی تغییرات فشار هیدرواستاتیک به صورت یک خط مستقیم نبوده و در فصل مشترک مایعات مختلف دارای شکستگی خواهد بود. و هر چه وزن مخصوص مایع زیادتر باشد زاویه تماس خط نسبت به محور قائم بیشتر خواهد شد.



شکل ۲-۶

از معادله اساسی فشار هیدرواستاتیک می توان نتیجه گرفت: در سیال ساکن یکنواخت با توزیع همگون، فشار فقط با فاصله عمودی تغییر می کند و با شکل ظرف خود ارتباطی ندارد. در یک صفحه افقی داخل سیال، فشار در تمام نقاط یکنواخت است و با افزایش عمق بیشتر می شود. مثلاً در شکل (۷-۲) سطح آزاد در فشار اتمسفر یک صفحه افقی است و نقاط  $a, b, c, d$  در عمق های مساوی و در صفحه ای افقی قرار دارند که به وسیله سیال آب به هم مرتبط اند، بنابراین فشار تمام این نقاط یکسان است. همچنین در نقاط  $A, B, C$  که همگی در کف قرار گرفته اند و نسبت به نقاط قبلی به یک اندازه افزایش دارند نیز صادق است، اما نقطه  $D$  اگر چه در همان عمقی قرار دارد که نقاط  $A, B, C$  واقعند، اما به دلیل واقع شدن در زیر سیال دیگر (جیوه) فشار متفاوتی دارد.



شکل ۷-۲

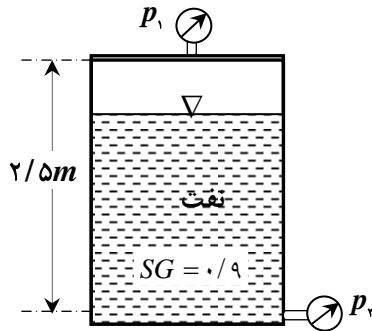
### ۷-۲ تغییرات فشار در سیال ساکن تراکم پذیر

تغییر فشار با ارتفاع برای سیالات تراکم پذیر از فرمول زیر محاسبه می شود.

$$P = P_0 e^{-\left[\frac{\gamma_0(y-y_0)}{P_0}\right]} = P_0 e^{-\left[\frac{g(y-y_0)}{RT}\right]} \quad (۱۰-۲)$$

که در آن  $g$  شتاب جاذبه،  $R$  ثابت گاز،  $T$  دمای مطلق ثابت آن،  $P_0$  فشار در ارتفاع  $y_0$  و  $P$  فشار در ارتفاع  $y$  می باشند.

مثال ۷-۲: مخزن سوختی را که در شکل (۸-۲) نمایش داده شده در نظر می گیریم. فشار عقربه در قاعده مخزن را در حالتی که فشار بالای مخزن مقادیر صفر، یا  $25 Kpa$  و یا  $10 Kpa$  را نشان می دهد، تعیین نمائید.



شکل ۲-۸

حل:

$$P = \rho gh$$

$$P = 0.9 \times 1000 \times 9.81 \times 2.5 \text{ (pa)} = 22.1 \text{ kPa}$$

$$P_2 = P_1 + 22.1 \text{ kPa} = 22 \text{ kPa} \quad \text{الف) اگر } P_1 = 0 \text{ باشد}$$

$$P_2 = P_1 + 22.1 \text{ kPa} = 25 + 22.1 = 47.1 \text{ kPa} \quad \text{ب) اگر } P_1 = 25 \text{ kPa}$$

$$p_2 = P_1 + 22.1 \text{ kPa} = -10 + 22.1 = 12.1 \text{ kPa} \quad \text{ج) اگر } P_1 = -10 \text{ kPa}$$

مثال ۲-۳: شدت فشار را در عمق ۶m آب بر حسب pa محاسبه کنید در

صورتی که قرائت بارومتر، ۷۶cmHg باشد، فشار مطلق در عمق ۶ m را محاسبه کنید؟

$$P_g = \gamma h = \rho gh = 1000 \times 9.81 \times 6 = 58836 \text{ Pa} \quad \text{یا} \quad 58.836 \text{ kPa}$$

$$\text{فشار اتمسفر} = \rho_g gh_g = (13.57 \times 1000 \times 9.81) \times 0.76 = 101131.24 \text{ Pa}$$

فشار اتمسفر + فشار نسبی = فشار مطلق

$$58836 + 101131.24 = 159967.24 \text{ Pa}$$

مثال ۲-۴: عمق آب و جیوه را برای فشار ۵۰ kpa مقایسه کنید؟

حل:

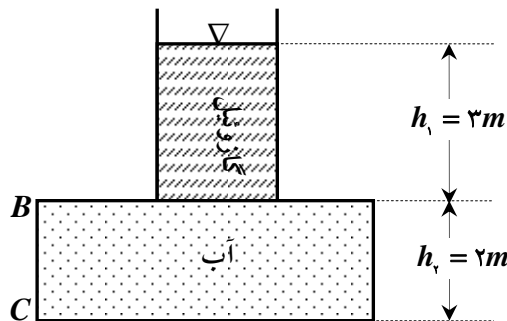
$$p = \gamma h$$

$$h = \frac{50 \times 1000 \frac{N}{m^2}}{9806 \frac{N}{m^3}} = 5.10 \text{ m}$$

برای آب

$$h = \frac{P}{\gamma} = \frac{P}{\gamma_w \cdot SG_{Hg}} = \frac{5000 \frac{N}{m^2}}{9806 \frac{N}{m^3} \times 13/57} = 0/375m \quad \text{برای جیوه}$$

مثال ۲-۵: مطابق شکل در قسمت بالای یک مخزن آب یک ستون ۳ متری گازوئیل ( $SG = 0/73$ ) قرار دارد. مطلوبست فشار در کف مخزن در صورتی که فشار اتمسفر  $1/1kPa$  باشد.



$$P_C = P_o + \gamma_G h_1 + \gamma_w h_2$$

$$P_C = 1/1 \times 1000 \left( \frac{N}{m^2} \right) + 0/73 \times 9806 \times 3 \left( \frac{N}{m^2} \right) + 9806 \times 2 \left( \frac{N}{m^2} \right)$$

$$P_C = 42187 / 14 \left( \frac{N}{m^2} \right)$$

## ۲-۸ وسایل اندازه گیری فشار

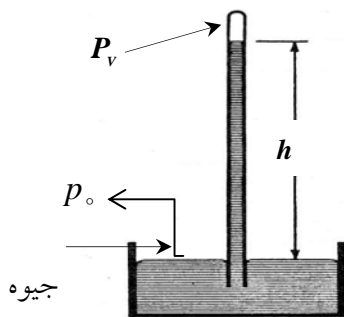
مانومترها، پیزومترها و... وسایلی هستند که برای اندازه گیری فشارهای نسبی مورد استفاده قرار می گیرند. در زیر به چند مورد از این وسایل اشاره می شود:

### ۲-۸-۱ فشارسنج بوردن

فشارسنج بوردن فشار نسبی را اندازه گیری می کند. این فشارسنج، فشار را نسبت به فشار محیط اطراف (فشار محلی) اندازه گیری می کند.

### ۲-۸-۲ فشارسنج جیوه ای (بارومتر جیوه ای)

فشارسنج (بارومتر) جیوه ای شامل یک لوله شیشه ای محتوی جیوه است یک سر آن بسته و سر دیگر آن در ظرفی پر از جیوه قرار دارد که برای سنجش فشار اتمسفر محلی به کار می رود (که بوسیله توریچلی در سال ۱۶۴۳ اختراع شد)



شکل ۲-۱۰

$$P_o = P_v + \rho_{Hg} gh \quad (۱۱-۲)$$

که در آن  $P_o$  فشار اتمسفر،  $P_v$  فشار بخار جیوه،  $\rho_{Hg}$  جرم مخصوص جیوه و  $g$  شتاب ثقل می باشد.

چون فشار بخار جیوه در دمای محیط ( $20^\circ C$ )،  $0.16 Pa$  است، معمولاً در مقایسه با فشار اتمسفر که تقریباً  $10^5 pa$  است، صرف نظر می شود. پس داریم:

$$P_o = 0 + \rho_{Hg} gh \quad (۱۲-۲)$$

بنابراین:

$$h = \frac{P_o}{\rho_{Hg} g} \quad (۱۳-۲)$$

در شرایط استاندارد کنار دریا با:

$$\rho_{Hg} = 133 \text{ kN/m}^3, P_o = 101 / 35 \text{ kPa}$$

در نتیجه ارتفاع ستون جیوه برابر است با

$$h = \frac{101 / 35 \text{ kPa}}{133 \text{ kN/m}^3} = 0.761 \text{ mHg} = 761 \text{ mmHg}$$

به همین دلیل از جیوه که سنگین ترین مایع شناخته شده است، استفاده می کنند.

مثال ۲-۶: یک فشارسنج بوردن خلاء نسبی 15kPa را نشان می‌دهد. اگر بارومتر

جیوه‌ای نیز عدد 450mm را نشان دهد، فشار مطلق چند میلی جیوه خواهد بود؟

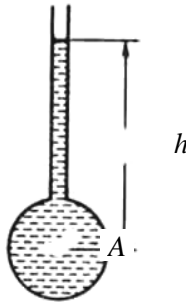
$$P_{gage} = -15kPa \rightarrow h_{gage} = \frac{P_o}{\rho_{Hg} g} = \frac{-15 \times 10^3}{13 / 6 \times 9 / 806} = -112 / 5 mmHg$$

$$h_{atm} = 750 \text{ mmHg}$$

$$h_{abs} = h_{atm} + h_{gage} = 750 - 112 / 5 = 637 / 5 mmHg$$

### ۳-۸-۲ پیزومتر

پیزومتر لوله‌ای است شیشه‌ای که به‌طور عمودی به لوله اصلی ویا مخزنی که فشار آن می‌بایست اندازه گیری شود اتصال یافته و سر دیگرش بصورت باز، بالاتر از لوله قرار گرفته است. پیزومتر برای اندازه گیری فشارهای مثبت وکم مایعات بکار می‌رود.



شکل ۲-۱۱

فشار نسبی مایع در هر نقطه از مخزن را می‌توان به کمک ارتفاع بالا آمدگی مایع

در لوله پیزومتر به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$P_A = \gamma h \quad (۲-۱۴)$$

این وسیله نمی‌تواند فشار منفی را اندازه گیری کند، چون هوا از طریق لوله وارد

مخزن می‌شود. همچنین برای فشارهای زیاد نمی‌توان از آن استفاده کرد چون در این

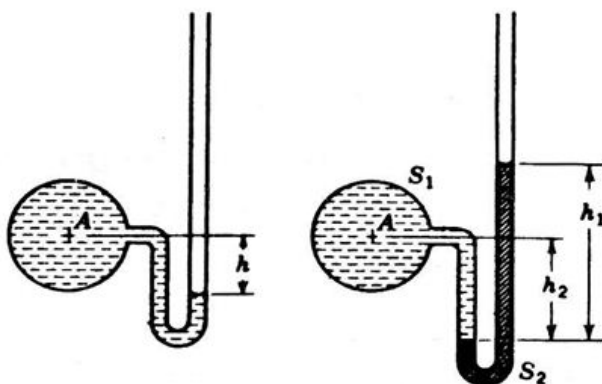
صورت احتیاج به لوله بسیار بلندی خواهد بود تا سیال بتواند در داخل آن بالا رود.

### ۴-۸-۲ مانومترها

مانومترها وسایلی هستند که به بهره گیری از ستون مایع اختلاف فشار را اندازه‌گیری

می‌کنند. این وسیله بسته به کاربرد آن می‌تواند در قالب یکی از شکل‌های (۲-۱۲) مورد استفاده قرار گیرد.

مانومتر شکل ۲-۱۲ (الف) جهت اندازه‌گیری فشارهای مثبت و منفی کم در مایعات بکار می‌رود. در حالی که مانومتر شکل ۲-۱۲ (ب) علاوه بر اندازه‌گیری فشارهای مثبت و منفی، به علت بکارگیری مایع مانومتری متفاوت با سیال درون مخزن که دارای چگالی بیشتری نسبت به آن می‌باشد، قادر به اندازه‌گیری فشارهای زیادتر نیز می‌باشد. در این حالت سیال درون مخزن گاز نیز می‌تواند باشد.



(الف) مانومتر برای فشار منفی

(ب) مانومتر برای فشار زیاد

شکل ۲-۱۲

### روش محاسبه فشار در مانومترها

به‌طور کلی در مانومترهای دارای سیالات با چگالی مختلف روش تعیین فشار چنین است:

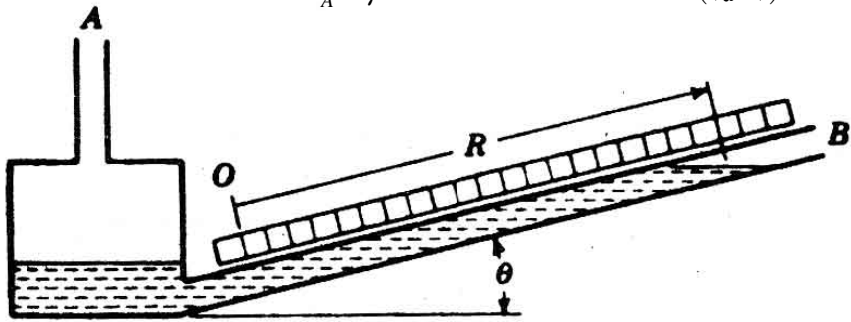
**گام ۱:** با شروع از یک نقطه مانومتر (معمولاً سمت چپ) فشار نقطه اولیه را منظور می‌نماییم. اگر این نقطه دارای فشار معلوم بود، با واحد مشخص و چنانچه فشار آن مجهول باشد با علامت مناسبی بیان می‌گردد.

**گام ۲:** در مسیر مانومتر حرکت کرده تا به سطح مشترک با سیال بعدی برسیم. در این حالت تغییر فشار ایجاد شده در طول حرکت را با فشار ثبت شده اولیه جمع جبری می‌کنیم، به این ترتیب اگر سطوح مشترک بعدی پایین تر بود تغییر فشار را با علامت

۲-۸-۶ مانومتر شیبدار (مایل)

از این وسیله جهت اندازه گیری فشارهای کم و بیشتر برای گازها به کار می‌رود. چون لوله شیب دار نسبت به لوله قائم طول بیشتری دارد، بنابراین در هنگام قرائت دقت بیشتری وجود خواهد داشت.

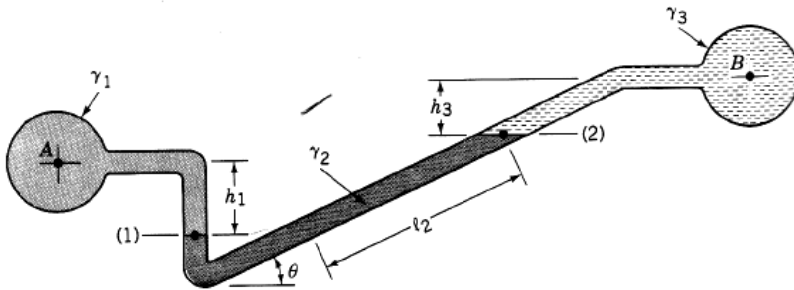
$$P_A = \gamma R \sin \theta \quad (2-15)$$



شکل ۲-۱۴ مانومتر شیبدار

مثال ۲-۷: مطلوب است محاسبه اختلاف فشار مخزن A و B در مانومتر شیبدار

اگر  $h_1 = 200 \text{ mm}$ ،  $h_2 = 300 \text{ mm}$  و  $h_3 = 100 \text{ mm}$  و  $\theta = 30^\circ$



شکل ۲-۱۵

حل: اختلاف فشار بین A و B برابر است با: