

# Fluid Properties

**Mohsen Soltanpour**

Email: [soltanpour@kntu.ac.ir](mailto:soltanpour@kntu.ac.ir)

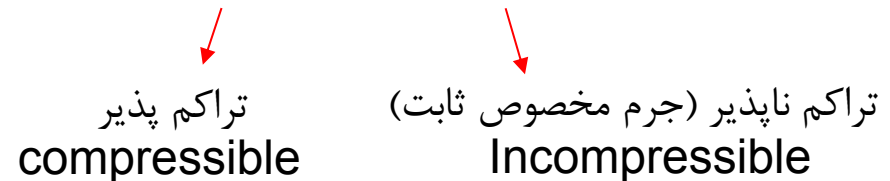
URL: <http://sahand.kntu.ac.ir/~soltanpour/>

## سیال: (fluid)

سیال ماده ای است که اگر تحت تاثیر تنش برشی مماسی قرار گیرد بطور پیوسته تغییر شکل می دهد ، هر چند تنش برشی اندک باشد.

مکانیک سیالات رفتار سیالات ساکن (static) یا متحرک (dynamic) را بررسی می کند.

سیال حالات مایع (liquid) و گاز (gas) یا بخار را شامل می گردد.



## محیط پیوسته: (Continuum)

به جای تلفیق پیچیده اثرات واقعی ملکولهای مجزا از توزیع پیوسته فرضی ماده (محیط پیوسته) استفاده می شود. روش محیط پیوسته هنگامی که مسیر متوسط آزاد ملکولها (mean free path) با کوچکترین طول با معنی مسئله هم مرتبه باشد بکار نمی آید (مثلا در حالتی که مقدار گاز کمی در محفظه بزرگی وجود دارد).

مسیر متوسط آزاد ملکولها متوسط فاصله ای است که ملکولهای سیال بین دو برخورد متوالی طی می کنند.

## بعد (Dimension)

اختصاراتی است که برای بیان نموده‌های جسم استفاده می شود. ابعاد مستقل را ابعاد اصلی (primary units) و بقیه ابعاد را ابعاد فرعی یا ثانویه (secondary units) می نامند.

### ابعاد اصلی (PRIMARY UNITS)

Quantity	Dimension	International System of Units (SI)	U.S. Customary System (USCS)	cgs (سانتی متر-گرم-ثانیه)
طول (Length)	L	meter, m	foot, ft	Cm
جرم (Mass)	M	kilogram, kg	slug, slug / pound mass, lbm	gram, g
زمان (Time)	T	second, s	second, s	second, s
حرارت درجه (Temperature)	$\theta$	Kelvin, K	Rankin, R	Kelvin, K

اسلاگ مقدار جرمی است که تحت اثر ۱ lbf شتابی برابر  $1 \text{ ft/s}^2$  می گیرد ( $1 \text{ slug} = 32.2 \text{ lbm}$ ).  
 $g = 9.81 \text{ m/s}^2 = 32.2 \text{ ft/s}^2$   
lbm مقدار ماده ای است که سطح زمین آنرا با نیروی ۱ lbf به طرف خود می کشد (وزن آن ۱ lbf است).

نیرو از ابعاد فرعی بوده و به ترتیب در سیستم SI، USCS و cgs از واحد نیوتن (N)، پوند نیرو (lbf) و دین (dyne, dyn) استفاده می شود. البته می توان به جای جرم از نیرو به عنوان واحد اصلی استفاده کرد.

## ابعاد فرعی (SECONDARY UNITS)

واحدهای فرعی زیادی وجود دارند که از ترکیب واحدهای اصلی تولید می شوند. مهمترین واحدهای فرعی در مکانیک سیالات عبارتند از:

Quantity	SI Unit	Dimension
سرعت (velocity)	m/s	$LT^{-1}$
شتاب (acceleration)	$m/s^2$	$LT^{-2}$
نیرو (force)	<b>N</b> <b>kg m/s<sup>2</sup></b>	<b><math>MLT^{-2}</math></b>
انرژی/کار (energy/work)	Joule J N m, $kg m^2/s^2$	$ML^2T^{-2}$
توان (power)	Watt W N m/s $kg m^2/s^3$	$ML^2T^{-3}$
فشار/تنش (pressure/stress)	Pascal P, $N/m^2$ , $kg/(m.s^2)$	$ML^{-1}T^{-2}$
جرم مخصوص یا چگالی (density)	$kg/m^3$	$ML^{-3}$
وزن مخصوص (specific weight)	$N/m^3$ $kg/(m^2.s^2)$	$ML^{-2}T^{-2}$
چگالی نسبی (relative density)	بدون واحد	1 بی بعد

## قانون همگنی ابعادی:

معادلات اساسی فیزیک از نظر ابعادی همگن هستند. معادله همگن معادله ای است که از عملیات تحلیلی بدست آمده و مبین یک پدیده فیزیکی باشد و در تمام سیستمهای آحاد معتبر است.

دانستن بعد کمیتها جهت تبدیل واحدها از یک سیستم به سیستم دیگر ضروری است:

$$\rho \left( \frac{t}{m^3} \right) = \frac{1000kg}{(100)^3 cm^3} = 10^{-3} kg/cm^3$$

$$p \left( \frac{lbf}{ft^2} \right) = \frac{4.448N}{(0.3048)^2 m^2} = 47.88 pa$$

واحدهای طرفین یک معادله را می توان به سهولت کنترل کرد. چنانچه واحدها یکسان نباشند حتما اشتباهی روی داده است. مثلا امکان ندارد:

$$30 \text{ kg/m s} = 30 \text{ m} !$$

## خواص مربوط به جرم

### جرم مخصوص (MASS DENSITY)

جرم مخصوص ( $\rho$  - "rho") با واحد  $Kg/m^3$  جرم در واحد حجم را نشان می دهد.

بعد:  $ML^{-3}$

مقادیر نمونه: (در دمای  $288.15 \text{ }^\circ K$  ( $4 \text{ }^\circ C$ ) و فشار  $1.013 \times 10^5 \text{ } N/m^2$ )  
آب =  $1000 \text{ } Kg/m^3$  ( $62.4 \text{ } lb/ml \text{ } ft^3$ )      جیوه =  $13546 \text{ } Kg/m^3$   
هوا =  $1.23 \text{ } Kg/m^3$       روغن پارافین =  $800 \text{ } Kg/m^3$

### تغییرات چگالی

هوا: تراکم پذیری بالا / تغییرات شدید چگالی

آب: تراکم پذیری پایین

چگالی مایعات تقریباً ثابت بوده اما با تغییر درجه حرارت و فشار مایع تغییر کمی می کند:

$$\rho = \rho(\text{liquid}, T, p)$$

$$\begin{array}{ll} T \uparrow & \rho \downarrow \\ p \uparrow & \rho \uparrow \end{array}$$

## وزن مخصوص (SPECIFIC WEIGHT)

وزن مخصوص ( $\gamma$  - "gamma") با واحد  $N/m^3$  وزن در واحد حجم را نشان می دهد:

$$\gamma = \rho g$$

که در آن  $g$  شتاب ثقل ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) است.

بعد:  $ML^{-2}T^{-2}$

مقادیر نمونه: (در دمای  $288.15 \text{ }^\circ\text{K}$  ( $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) و فشار  $1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ )

جیوه =  $132.9 \text{ KN/m}^3$   
روغن پارافین =  $7.85 \text{ KN/m}^3$

آب =  $9.79 \text{ KN/m}^3$   
هوا =  $11.8 \text{ KN/m}^3$

## چگالی نسبی (RELATIVE DENSITY)

نسبت وزن مخصوص سیال به وزن مخصوص آب:

$$S = \frac{\gamma_{fluid}}{\gamma_{water}} = \frac{\rho_{fluid}}{\rho_{water}}$$

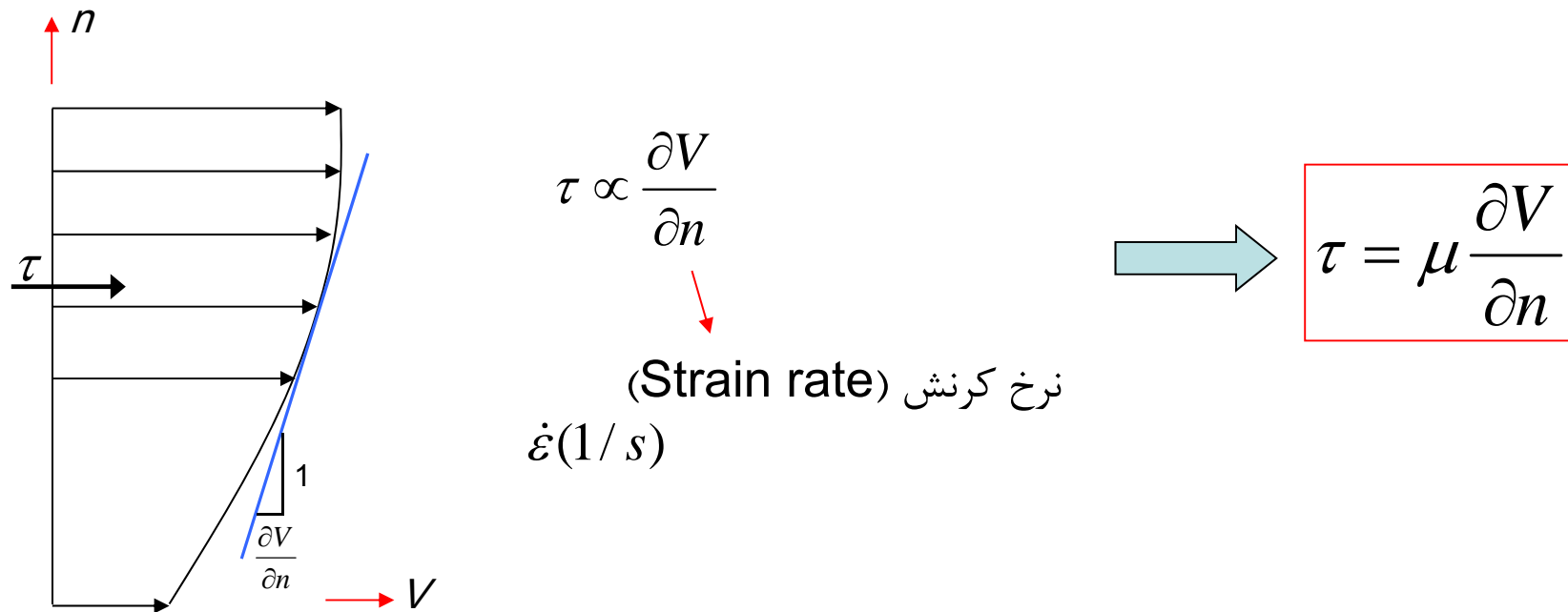
چگالی نسبی بی بعد است. مثلاً چگالی نسبی جیوه در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر است با:

$$S_{Hg} = \frac{\gamma_{hg}}{\gamma_{H_2O}} = \frac{133 \text{ kN/m}^3}{9.81 \text{ kN/m}^3} = 13.6$$



## قانون لزجت نیوتن: (Newton's Viscosity Law)

در یک جریان آرام (Laminar flow) که ذرات سیال در خطوط مستقیم و موازی حرکت می کنند، در سیالات نیوتنی (Newtonian Fluids) تنش برشی بر روی سطحی مماس بر امتداد جریان متناسب است با میزان تغییر سرعت در امتداد عمود بر آن سطح:



$\mu$ : ضریب لزجت (Coefficient of viscosity) یا ضریب لزجت دینامیکی با بعد  $(ML^{-1}T^{-1})$ :

$$\mu = \frac{\tau}{dV/dy} = \frac{N/m^2}{(m/s)/m} = N \times s / m^2 = kg / m.s$$

در سیستم SI واحد آن  $kg/m.s$  یا  $N.s/m^2$  می باشد که نام بخصوصی ندارد.

در سیستم CGS واحد لزجت  $g/cm.s$  می باشد که پواز (poise) نامیده می شود.

$$1 \frac{kg}{m.s} = \frac{1000 gr}{100 cm.s} = 10 poise \quad 1 centipoise = 0.01 poise$$

### Typical values:

Water dynamic viscosity = 1 centipoises ( $10^{-2}$  poise) =  $1.005 \cdot 10^{-3} kg/m.s$   
(at temperature  $T = 20^\circ C$  and pressure of 1 atm)

اگر لزجت دینامیک را بر جرم مخصوص تقسیم کنیم، لزجت سینماتیک (kinematic viscosity) بدست می آید:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{ML^{-1}T^{-1}}{M/L^3} = L^2T^{-1} = m^2/s$$

در سیستم SI واحد آن  $m^2/s$  و در CGS استوک (stoke) می باشد. در USCS نیز با  $ft^2/s$  نمایش داده می شود.

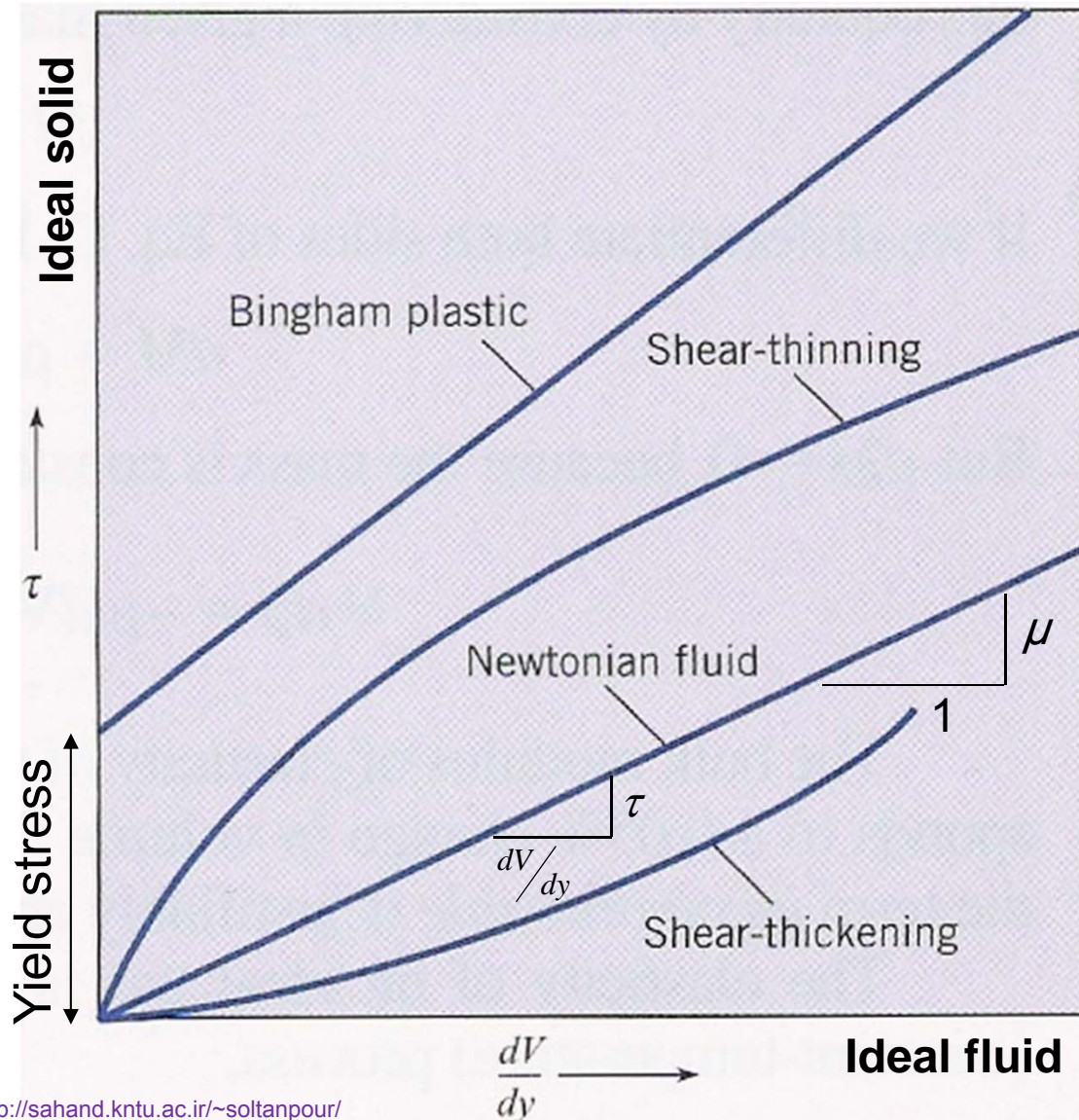
$$1 \frac{m^2}{s} = 10^4 stoke$$

### Typical values:

Water =  $1.14 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ , Air =  $1.46 \times 10^{-5} m^2 s^{-1}$ , Mercury =  $1.145 \times 10^{-4} m^2 s^{-1}$ ,  
Paraffin Oil =  $2.375 \times 10^{-3} m^2 s^{-1}$ .

## سیالات نیوتنی (NEWTONIAN) و غیر نیوتنی (NON-NEWTONIAN)

سیالات نیوتنی بر خلاف سیالات غیر نیوتنی سیالاتی هستند که در آنها نسبت تنش برشی و نرخ کرنش برشی خطی است.



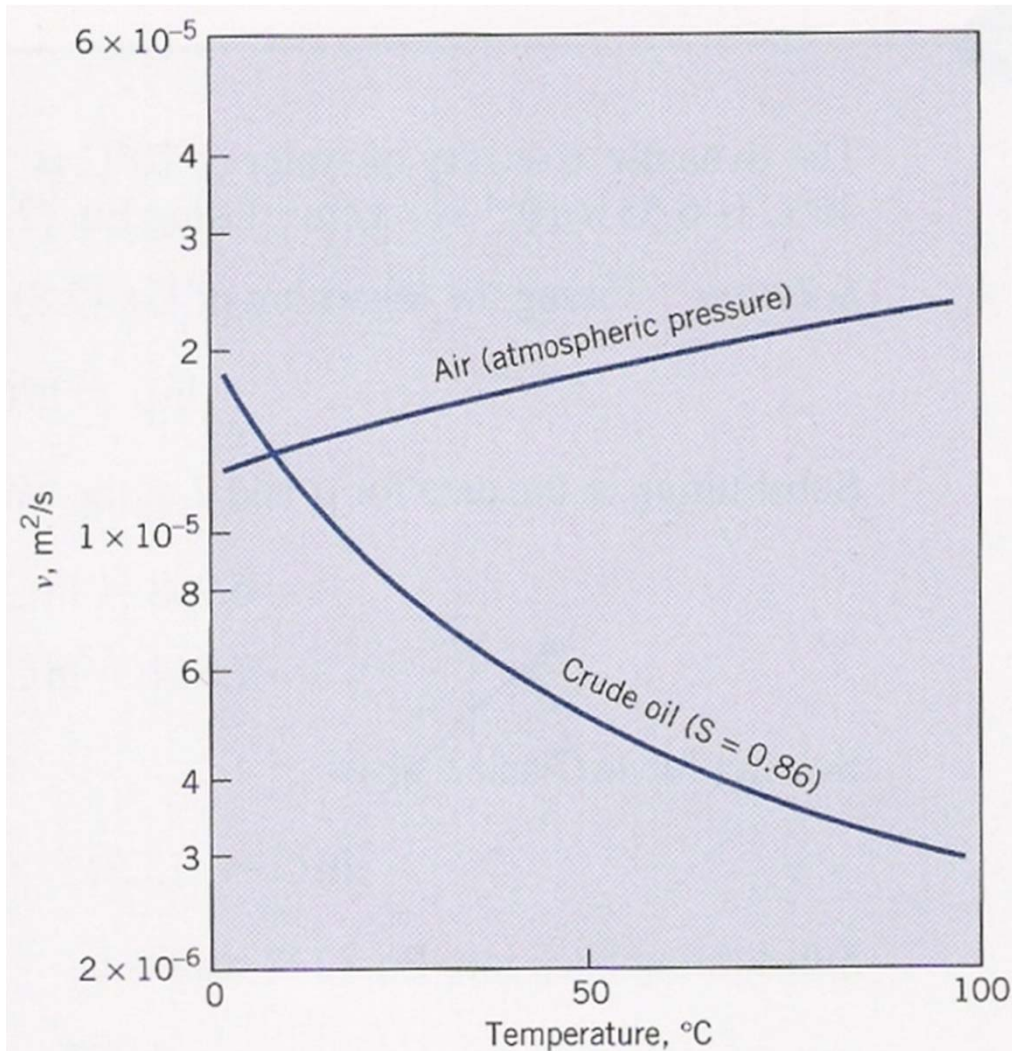
در کنار سیالات نیوتنی که اکثر مایعات ساده و گازها را شامل می شوند، سیالاتی وجود دارند (خمیر *paste*، دوغاب *slurry*، گریس *grease*، پلیمرهای بلند *high polymer*...) که رابطه تنش و نرخ کرنش در آنها خطی نیست.

سیال ایده آل سیال غیر قابل تراکم و غیر لزج است ( $\mu=0$ ) که در آن تنش برشی تحت هیچ نوع حرکتی ایجاد نمی شود.

## تغییرات لزجت نسبت به تغییر فشار و درجه حرارت:

gas and liquid  $\mu \uparrow p \uparrow$ , but small  $\Delta\mu$

gas:	$\mu \uparrow$	$T \uparrow$	} Due to structural differences, more molecular activity, decreased cohesive forces
liquid:	$\mu \downarrow$	$T \uparrow$	



لزجت مایعات و گازها با افزایش فشار کمی افزایش می یابد.  
 لزجت مایعات با افزایش دما کاهش می یابد در صورتی که  
 گازها رفتاری دقیقاً متضاد دارند.  
 در مایعات لزجت ناشی از جاذبه بین ملکولی قوی است که  
 با افزایش دما کاهش می یابد:

$$\mu = Ce^{b/T}$$

$\mu$ : لزجت دینامیکی سیال

$C, b$ : ضرائب تجربی

$T$ : درجه حرارت

در گازها ملکولها از یکدیگر دور بوده و تحرک زیادی دارند  
 لذا جاذبه ملکولی کم است. حرکات و برخورد ملکولها که  
 عامل لزجت است با افزایش دما بیشتر می شود.

## گاز کامل: (Perfect gas)

گاز کامل سیالی است که اثرات متقابل ملکولهای سیال صرفاً ناشی از برخوردهای کاملاً الاستیک باشد.

حجم مخصوص (Specific volume)

$$pv_s = RT \quad (\text{Equation of State}) \quad \text{معادله حالت}$$

یا

$$p = \rho RT$$

$R$  (ثابت گاز) فقط به وزن ملکولی سیال بستگی دارد:

$$R = \frac{p}{\rho T} = \frac{\frac{N}{m^2}}{\frac{kg}{m^3} (^{\circ}K)} = \frac{N \cdot m}{kg (^{\circ}K)} = \frac{J}{kg (^{\circ}K)}$$

رفتار گاز کامل بر مبنای فقدان کامل جاذبه ملکولی است لذا رفتار گازها در نزدیک شرایط تقطیر تا حد زیادی از رفتار گاز کامل دور می شود.

در جرم مشخص  $m$  از یک گاز:  $\frac{P_1}{\rho_1 T_1} = \frac{P_2}{\rho_2 T_2} = R$  و یا

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = mR$$

## قانون آووگادرو: (Avogadro's law)

یک مول از کلیه گازها در شرایط متعارف ( $P=1 \text{ atm}$ ,  $T=273 \text{ °k}$ ) ۲۲/۴ لیتر حجم را اشغال می کند.

$10^{23} \times 6/02$  ملکول گاز برابر با جرم ملکولی آن (مثلا ۳۲ g اکسیژن  $O_2$ )

### ثابت جهانی گازها:

دو محفظه گاز را در شرایط یکسان دما، فشار و حجم در نظر می گیریم:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P_1 V_1}{T_1} = m_1 R_1 \\ \frac{P_2 V_2}{T_2} = m_2 R_2 \end{array} \right. \xrightarrow{V_1 = V_2 \quad T_1 = T_2 \quad P_1 = P_2} m_1 R_1 = m_2 R_2$$

اما تعداد ملکولهای دو ظرف برابر است (بر مبنای قانون آووگادرو حجمهای مساوی از گازها در شرایط یکسان دما و فشار مطلق تعداد ملکول یکسانی دارند):

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} = \frac{M_1}{M_2}$$

جرم  $10^{23} \times 6/02$  ملکول (مول) از گاز اول (gr) ← جرم  $n$  ملکول از گاز اول

جرم  $10^{23} \times 6/02$  ملکول (مول) از گاز دوم (gr) ← جرم  $n$  ملکول از گاز دوم

که در آن  $M$  کیلوگرم مول از گاز می باشد (یک کیلوگرم مول از هرگاز، جرمی از گاز با واحد کیلوگرم است که از نظر عددی مساوی جرم ملکولی آن گاز باشد، مثلا یک کیلوگرم مول اکسیژن برابر 32 kg می باشد)\*.

$$\longrightarrow M_1 R_1 = M_2 R_2$$

و یا

$$MR = cte$$

$MR$  ثابت جهانی گازها نامیده می شود و در سیستم واحدها بین المللی برابر است با:

$$MR = 8312 \text{ J} / ^\circ K$$



$$R = \frac{8312}{M} \text{ J} / \text{kg}^\circ K$$



## مدول حجمی: (bulk modulus)

در تغییرات سریع و یا فشار بسیار زیاد قابلیت تراکم مایعات اهمیت پیدا می کند.

$$\beta = \frac{-1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

ضریب تراکم پذیری (Coefficient of compressibility)

دمای ثابت (Isothermal) با واحد  $1/pa$

$$E[k] = -v \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_T = - \left( \frac{\partial p}{\partial v / v} \right)_T$$

مدول حجمی (بالک)

با واحد  $pa$

مقدار  $k$  برای آب در دمای اطاق و فشار اتمسفر برابر  $2068 \text{ Mpa}$  می باشد. \*\* مقدار  $k$  با افزایش فشار افزایش می یابد مثلاً در فشار  $3000 \text{ atm}$  مدول حجمی آب دو برابر می شود.



## فشار بخار: (Vapor pressure)

وقتی تبخیر مایعات در یک محیط محصور صورت گیرد، ملکولهای بخار فشاری جزئی در فضا وارد می کنند که در حالت تعادل به عنوان فشار بخار شناخته می شود. حالت تعادل وضعیتی است که تعداد ملکولهای برخورد کننده به سطح مایع که وارد مایع می شوند برابر با تعداد ملکولهای جدا شونده از سطح مایع باشند.

از آنجایی که فعالیت ملکولی تابعی از دما است، فشار بخار سیال نیز بستگی به دما داشته و با افزایش دما زیاد می شود. زمانی که فشار روی مایع برابر فشار بخار مایع باشد، مایع می جوشد. مثلا اگر فشار به حد کافی کاهش یابد آب در دمای اطاق می جوشد در حالی که در فشار طبیعی (۱ اتمسفر) آب در دمای ۱۰۰ درجه می جوشد (در نقاط مرتفع نقطه جوش کمتر از ۱۰۰ درجه اما در زودپز بیشتر از ۱۰۰ درجه است).

## خلا زایی: (Cavitation)

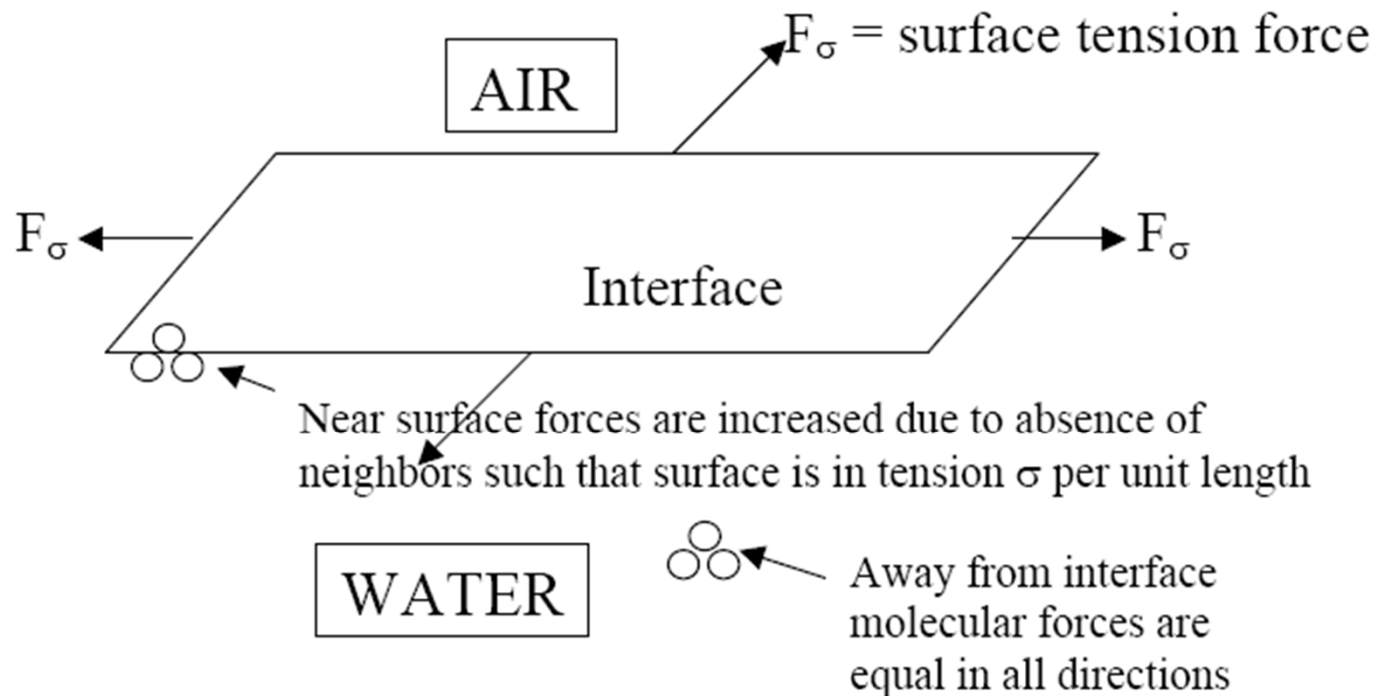
اگر تبدیل مایع به گاز صرفا ناشی از افزایش دما باشد آن را تبخیر (Evaporation) می نامند و چنانچه در اثر کاهش فشار روی دهد (فشار سیال از فشار بخار کمتر گردد) خلا زایی (Cavitation) نامیده می شود.

خطر خلا زایی در ورودی پمپها و خروجی توربین ها وجود دارد. نقاط خلا ایجاد شده توسط جریان به مناطق با فشار بالاتر منتقل شده و به سرعت پر می شوند که به کاهش راندمان و خوردگی فلزات منجر می شود.

## کشش سطحی: (Surface tension)

پدیده کشش سطحی ناشی از اختلاف جاذبه بین ملکولهای یکسان (پیوستگی-Cohesion) و جاذبه بین ملکولهای غیر یکسان (چسبندگی-Adhesion) است.

در داخل مایع، نیروهای پیوستگی یکدیگر را خنثی می کنند ولی در سطح آزاد مایع نیروهای پیوستگی که از پایین اثر می کنند از نیروهای چسبندگی محل تماس مایع و گاز بیشتر می شود. بدلیل تفاوت این نیروها مرز دو سیال شبیه یک پوسته تحت کشش عمل می کند.

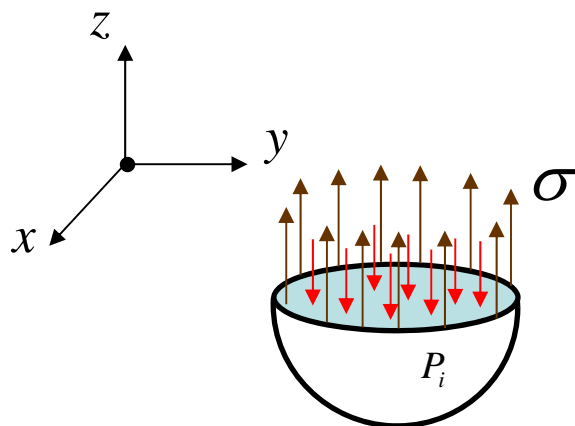


$$\sigma_{\text{air/water}} = 0.073 \text{ N/m}$$

$$F_\sigma = \sigma \times L = \text{Force normal to cut, } L = \text{length of cut}$$

ضریب کشش سطحی (شدت بارگذاری خطی مماس بر سطح)

اگر قطره ای به شعاع  $R$  و فشار نسبی داخلی (فشار داخل منهای فشار اتمسفر)  $P_i$  را در حال تعادل در نظر بگیریم\*:



$$\sum F_z = 0$$

$$\implies -P_i(\pi R^2) + \sigma(2\pi R) = 0$$

$$P_i = \frac{2\sigma}{R}$$

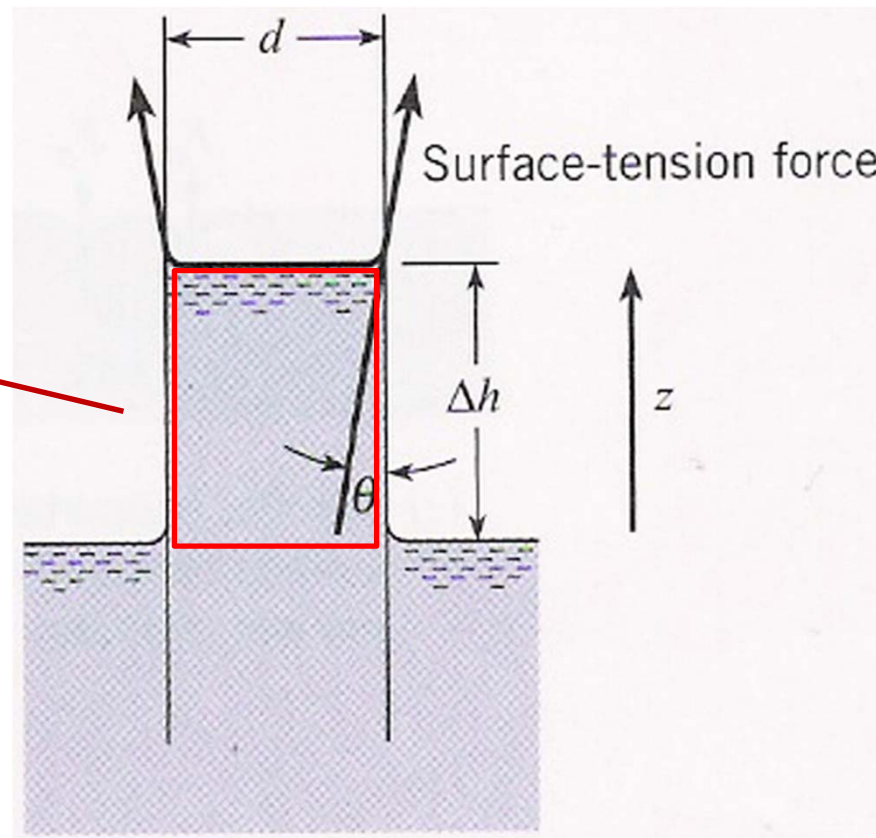
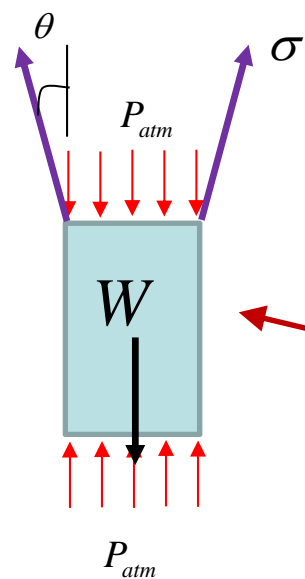
مثلا با در نظر گرفتن این امر که ضریب کشش سطحی در دمای اتاق برای آب مجاور هوا برابر با  $\sigma = 0.073 \text{ N/m}$  است، در قطره ای به شعاع  $0.5 \text{ mm}$ :

$$P_i = \frac{2 \times 0.073}{0.5 \times 10^{-3}} = 292 \text{ Pa} \\ = 0.00288 \text{ atm} \quad (1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa})$$

در حباب کشش سطحی در هر دو وجه داخلی و خارجی (محل‌های تماس با هوا) وجود دارد. بنابراین\*\*:

$$-P_i(\pi R^2) + 2\sigma(2\pi R) = 0 \implies P_i = \frac{4\sigma}{R}$$

# موئینگی: (Capillary)



$$\sum F_z = 0$$



$$(\pi d)\sigma \cos \theta - W = 0$$

$$(\pi d)\sigma \cos \theta - \frac{\pi d^2}{4} \times \Delta h \times \gamma = 0$$

$$\Delta h = \frac{4\sigma \cos \theta}{d\gamma}$$