



# ویسکوزیته غیر نیوتنی، ویسکوزیته سینماتیک و ویسکوزیته گازها



سیالاتی که از رابطه ویسکوزیته نیوتن تبعیت می کنند، سیالات نیوتنی نام دارند. گازها سیال

نیوتنی هستند. اما مایعات هگلی سیال نیوتنی نیستند. سرابها، مواد خمیری و سوسپانسیون ها

جز سیالات غیر نیوتنی هستند.

برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی:

Bingham plastics در واقع دارای نوعی

تنش تسلیم هستند و بعد رفتار سیال

نیوتنی دارند.



Pseudoelastics : با افزایش سرعت کرنش برشی، دشل می شوند.

## سیال دیلاتانت

- این سیال غلیظ شونده برشی است؛ یعنی با افزایش اهنگ کرنش، مقاومت آن افزایش می‌یابد. سوسپانسیون‌های ذرات نشاسته یا شن در آب نمونه‌هایی از سیال دیلاتانت هستند.

- مثال‌ها: شنزار Beach sand, فلدسپار Feldspar, شن‌های روان Quick Sand, نشاسته در آب Starch in water



## شبه پلاستیک

- این سیال رقیق شونده برشی است؛ یعنی با افزایش آهنگ کرنش، مقاومت آن کاهش می‌یابد.
- سیال بسیار رقیق شونده را شبه پلاستیک می‌گویند.
- محلول‌های پلیمری، و سپانسیون‌های کولئیدی، خمیر آب در کاغذ، رنگ لاتکس، پلاسمای خون، شربت‌ها و شیر قند، از سیالات شبه پلاستیک هستند.
- رنگ یکی از رایج‌ترین سیالات شبه پلاستیک است. (رنگ‌ها در هنگام ریختن سفت هستند ولی اگر به شدت به هم زده شوند رقیق خواهند شد)



# سیال بینگهام

- نوع دیگری از سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان نیز وجود دارد که به عنوان سیال بینگهام شناخته می شود.
- این نوع سیال برای جاری شدن و جریان یافتن، نیاز به یک مقدار مشخص تنش اولیه هستند.
- در واقع یک آستانه تنش برشی برای آن‌ها تعریف شده که قبل از آنکه میزان تنش برشی به این آستانه برسد، هیچ جریانی دیده نمی شود و بعد از آن، سیال شروع به جریان یافتن می کند. این سیالات را سیالات پلاستیک می نامند.
- سیال بینگهام به نوعی از سیالات پلاستیک گفته می شود که ویسکوزیته آن‌ها ثابت باقی می ماند.
- رفتار این سیال تحت تنش های کمتر از تنش تسلیم رفتار جامد را از خود نشان می دهد و تحت تاثیر تنش های بالاتر از آن رفتار سیال نیوتنی دارد، مانند خمیر دندان و کامپوزیت های سیلیکا-پلیمری.



# ویسکوزیته سینماتیک

ویسکوزیته سینماتیک :

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

ذرات نفوذ موستوم توسط مکانیزم مولکولی نشان می دهد.

$$\nu : \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

دیپانسیون :

تمام کمیت های که واحد یا دیپانسیون  $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$  دارند، نوعی (دیفوزیون) ویانوسی نفوذ نشان می دهد.



# تفاوت ویسکوزیته سینماتیک و ویسکوزیته

- ویسکوزیته سینماتیک برای اندازه گیری مایعات نیوتنی و ویسکوزیته دینامیکی برای مایعات غیر نیوتنی استفاده می شود.
- به زبان ساده، ویسکوزیته سیال نیوتنی بدون توجه به مقدار برشی که برای دمای ثابت اعمال می شود (مثلاً آب، الکل، روغن معدنی) ثابت می ماند.
- سیالات غیر نیوتنی برعکس سیالات نیوتنی هستند. هنگامی که برش بر روی مایعات غیر نیوتنی اعمال می شود، ویسکوزیته سیال تغییر می کند (مانند سس گوجه فرنگی، چسب، ماسه روان).





$$\text{آب } (20^{\circ}\text{C}) : \mu = 1 \rho$$

$$\nu = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\text{آب } (80^{\circ}\text{C}) : \mu = 0.4 \rho$$

$$\nu = 0.4 \text{ cm}^2/\text{s}$$

با افزایش سیالیت، ویسکوزیته کمتر می‌شود. ویسکوزیته هم وابسته به دماست.

$$\text{هوا } (20^{\circ}\text{C}) : \mu = 0.018 \rho$$

$$\nu = 15 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$\text{هوا } (80^{\circ}\text{C}) : \mu = 0.021 \rho$$

$$\nu = 20 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

برای گارها،  $\nu$  زیادتر از مایعات است زیرا  $\rho$  برای گارها کم است. هم چنین رفتار  $\mu$  در  $\nu$

مادها برای گارها و مایعات متفرق می‌کند.



ویسکوزیته‌ی سرشاره‌ها ، بعضی از روغن‌ها و مایعات پلیمری ،  $\mu$  بین 100 poise - 1

تغییر می‌کند. برای  $H_2SO_4$  (اسید سولفوریک) ،  $\mu$  بین 1 p - 0.1 تغییر می‌کند.

برای نمک‌های مذاب ، فلزات سنگین ( $Pb, Zn, \dots$ ) ، فلزات واسطه ، آب ، بنزین ، استون

فلزات قلیائی در  $20^\circ C$  ،  $\mu$  بین 0.01 - 0.1 p تغییر می‌کند.

# نظریه جنبشی گازها

## • فرضیات این نظریه عبارتند از:

۱. گازها از ذرات بسیار کوچکی (مولکول مانند گاز اکسیژن، یا اتم مانند گاز هلیم) تشکیل شده اند. این ذرات حرکت مستقیم الخط و تصادفی دارند.
۲. در شرایط معمولی، ابعاد مولکول ها در مقایسه با فاصله مولکول ها در گاز بسیار کم است به طوری که بیشتر حجم گاز را فضای خالی تشکیل می دهد. به عبارتی، می توان گازها را متشکل از ذراتی جرم دار بدون حجم در نظر گرفت.
۳. مولکول ها با همدیگر و با جدار ظرف برخورد می کنند. در این برخوردها انرژی جنبشی کم نمی شود ولی ممکن است انرژی از مولکولی به مولکول دیگر منتقل شود. به چنین برخوردی، الاستیک یا کشسان گویند.
- ۴- انرژی جنبشی متوسط یک گاز فقط به دما بستگی دارد و ارتباطی به فشار و ماهیت مولکول ندارد.
۵. نیروی جاذبه بین مولکولهای گاز بسیار ناچیز است و در اغلب موارد از آن صرف نظر می شود.

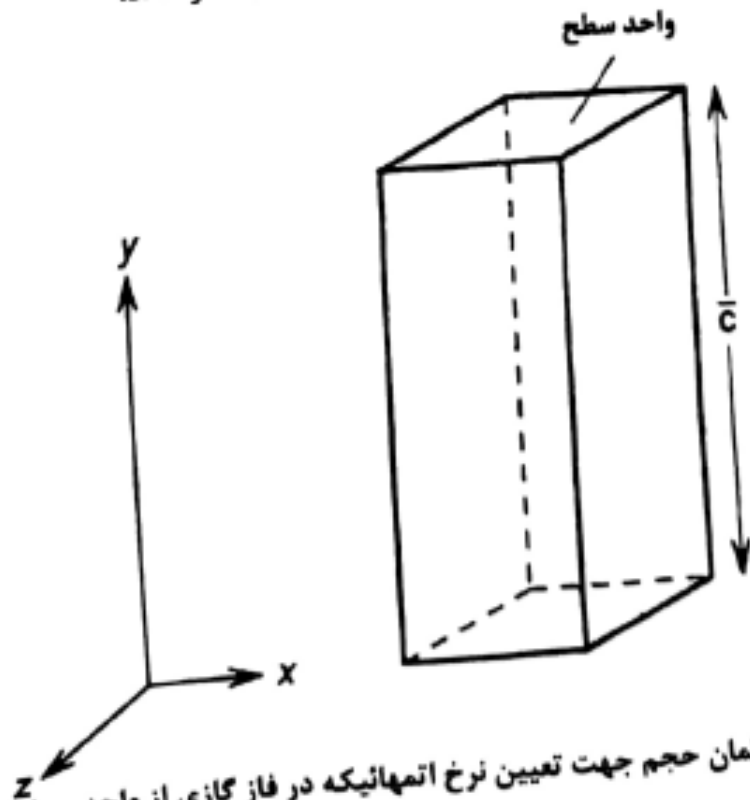


# مفروضات محاسبه فاصله ازاد اصلی (میانگین فاصله برخورد) و ویسکوزیته گازها

۱- اتمها صلیباند، آنها کره‌های بدون جاذبه با قطر  $d$  بوده که دستخوش برخوردهای کاملاً الاستیک با یکدیگر می‌باشند.

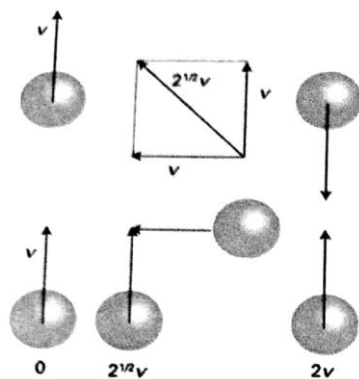
۲- تمام اتمها با یک سرعت که همان سرعت متوسط است، حرکت می‌کنند.  $\left(\frac{\lambda RT}{\pi M}\right)^{1/2}$

۳- تمام اتمها در جهاتی موازی محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  در حال حرکتند، یعنی  $\frac{1}{6}$  آنها روی یکی از جهات  $+x$ ،  $-x$ ،  $+y$ ،  $-y$ ،  $+z$ ،  $-z$  در حال حرکتند.

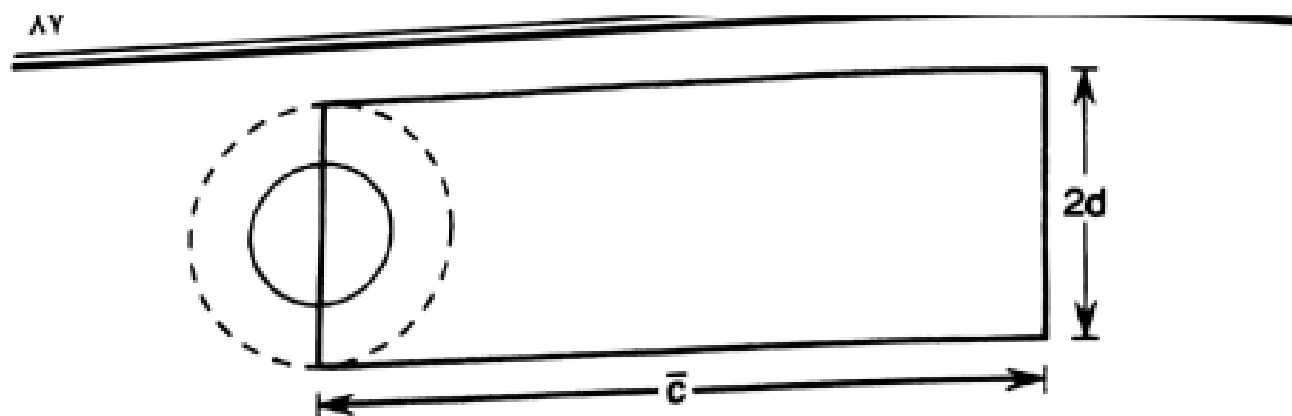


شکل ۲-۲۳ المان حجم جهت تعیین نرخ اتمهائیکه در فاز گازی از واحد سطح عبور می‌کنند

شکل ۲-۲۳ یک حجم منشوری با سطح مقطع واحد و طول  $\bar{c}$  نشان می‌دهد. اگر دانسیته گاز  $n$  اتم در واحد حجم باشد، منشور شامل  $n\bar{c}$  که  $\frac{1}{6}$  آنها در جهت  $z$ - حرکت می‌کنند. در نتیجه، تعداد اتم‌هایی که از قاعده این حجم در واحد زمان عبور می‌کنند،  $\frac{n\bar{c}}{6}$  است. یک برخورد بین دو اتم وقتی اتفاق می‌افتد که فاصله مراکز آنها تا مقدار  $d$  کاهش یابد. پس هر اتم گریز به حجم  $\frac{4}{3}\pi d^3$  را به عنوان حریم نسبت به هر اتم دیگر اختیار می‌کند. مطابق شکل ۲-۲۴ یک اتم که با سرعت  $\bar{c}$  حرکت می‌کند یک حجم  $\pi d^2 \bar{c}$  را در واحد زمان جاروب می‌نماید که در این حجم،  $n\pi d^2 \bar{c}$  اتم داریم، حرکت اتم باعث  $n\pi d^2 \bar{c}$  برخورد با یکدیگر در واحد زمان می‌شود. این بحث وقتی ساده می‌شود که فرض کنیم که تمام  $n$  اتم در حجم جاروب کرده ثابت باشند. اگر بخواهیم ارتباط سرعت‌ها را در نظر داشته باشیم. تعداد برخوردها در ثانیه به صورت  $\sqrt{2}n\pi d^2 \bar{c}$  بدست می‌آید و از این رو فاصله متوسط طی شده در برخوردها که به فاصله آزاد اصلی<sup>۱</sup> معروف است بصورت زیر محاسبه می‌شود.



$$\lambda = \frac{\text{فاصله پیموده شده در واحد زمان}}{\text{تعداد برخوردها در واحد زمان}} = \frac{\bar{c}}{\sqrt{2}n\pi d^2 \bar{c}} = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2}$$



شکل ۲-۲۴ حجم در یک فاز گازی در مورد تعداد برخوردهایی که یک اتم با اتم‌های دیگر در واحد زمان تجربه می‌کند.

رابطه بین فاصله آزاد و فشار در گاز کامل

$$pV = nRT$$

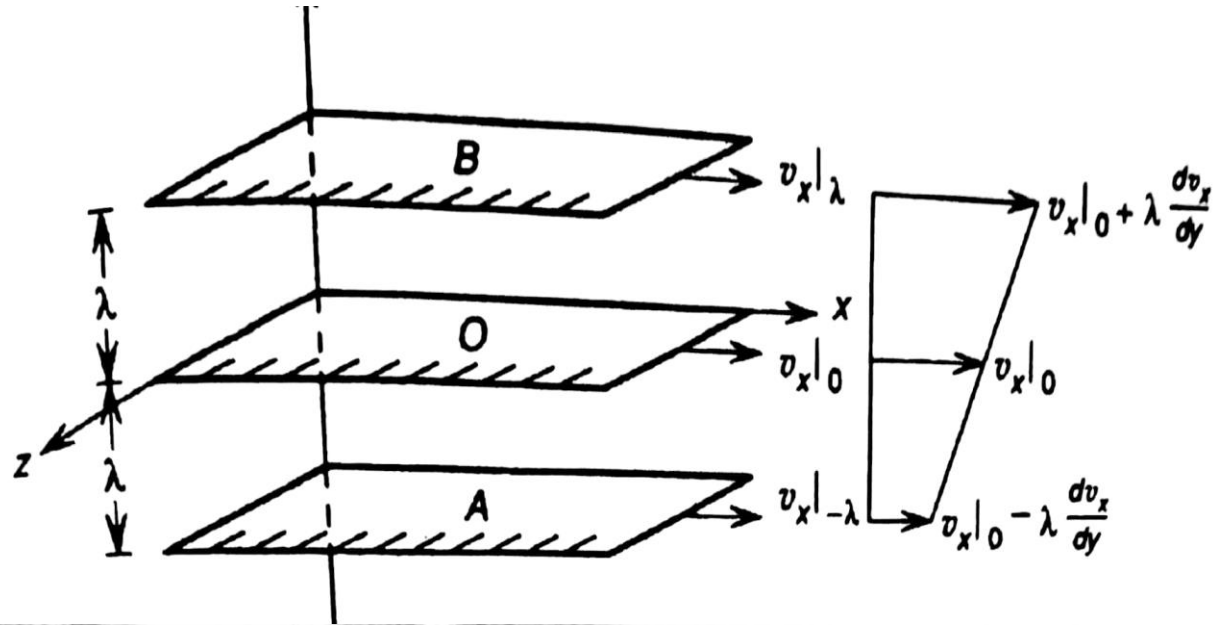
$$pV = \frac{n N_A k T}{N} \Rightarrow n = \frac{N}{V} = \frac{\rho}{k T}$$

تعداد ذرات  
حاصل از حجم

$$\sqrt{2} n \bar{c} = \sqrt{2} \frac{\rho}{k T} n \bar{c} = \sqrt{2} \frac{\rho}{k T} n \bar{c}$$

فرکانس برخوردها

## ویسکوزیته گازها با استفاده از نظریه جنبشی



یک جریان آرام و در جهت  $x$  در نظر بگیرید که گوا دایان سرعت آن نسبت به  $y$  خطی است. در شکل بالا جریان توسط صفحاتی از اتم‌ها که بر فاصله آزاد اصلی از یکدیگر موقوفی

شکلند.





تعداد اتم هایی که از واحد سطح  $A$  در واحد زمان به طور عمودی

به صفحه  $O$  می ریزد برابر  $\frac{1}{6} n \bar{c}$  است (  $\bar{c}$  سرعت متوسط ) و از

آنجا که هر مولکول دارای یک سطح مؤمنتم در جهت  $X$  در

صفحه  $A$  (  $\frac{1}{2} m v_x$  ) دارده سرعت انتقال مؤمنتم به واحد

سطح صفحه  $O$  در جهت  $X$  به صورت  $\frac{1}{2} n c m v_x$  است

به طور مشابه، سرعت انتقال موج در  $y$  و  $z$  در  $t = 0$  در

حالت  $y = 0$  - خاصی از پیش اتم های صفحه  $B$  به صورت

$$\frac{1}{4} n \bar{c} m v_x \Big|_y$$

پس تغییرات موج در  $y$  و  $z$  در  $t = 0$  برابر است با

$$\frac{1}{4} n \bar{c} m v_x \Big|_y - \frac{1}{4} n \bar{c} m v_x \Big|_{y+\lambda} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{4} n \bar{c} m (v_x|_y - \lambda \frac{dv_x}{dy}) - \frac{1}{4} n \bar{c} m (v_x|_{y+\lambda} + \lambda \frac{dv_x}{dy})$$

$$= -\frac{1}{4} n \bar{c} m \lambda \frac{dv_x}{dy}$$

$$\tau_{yx} = -\frac{1}{3} n \bar{c} m \lambda \frac{dv_x}{dy}$$



# فرمول نهایی ویسکوزیته گاز بر اساس نظریه جنبشی

ویسکوزیته گاز را بر حسب (g/cm.s)poise

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{\pi m k T}}{\pi d^2}$$

$$\eta = \frac{2/6692 \times 10^{-5} \sqrt{MT}}{d^2}$$

بر حسب گرم

$M$  = وزن اتمی

$T$ : بر حسب کلوین

$d$ : بر حسب آنگستروم ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ )



## انحراف از نظریه جنبشی

- داده های مربوط به گازهای مختلف نشان می دهد که  $\mu$  سریعتر از  $\sqrt{T}$  افزایش می یابد. بنابراین برای توصیف بهتر وابستگی دمایی  $\mu$  باید مدل کره صلب را با مدلی تعویض کنیم که نیروهای جاذبه و دافعه را دقیق تر نشان دهد.



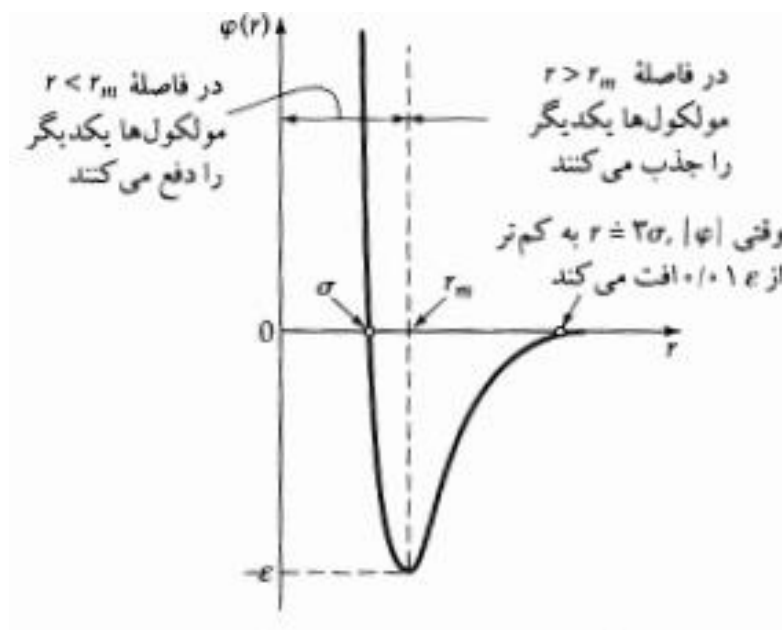
# نظریه چابمن

یکی از نظریه‌های دقیق سینتیک گازهای تک‌اتمی با چگالی پایین در اوایل قرن بیستم، توسط چابمن در انگلستان، و به صورت مستقل از او، توسط انسکوگ در سوئد پی‌ریزی شد. نظریه چابمن-انسکوگ عبارت‌هایی برای خواص انتقال، برحسب انرژی پتانسیل بین مولکولی  $\varphi(r)$ ، ارائه می‌دهد؛  $r$  فاصله بین یک جفت مولکول است که باهم برخورد می‌کنند. بنابراین نیروی بین مولکولی از رابطه  $F(r) = -d\varphi/dr$  به دست می‌آید. صورت تابعی دقیق  $\varphi(r)$  معلوم نیست؛ اما یک رابطه تجربی رضایت‌بخش برای مولکول‌های غیرقطبی پتانسیل لندارد-جونز است:

$$\phi(r) = \epsilon \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$



که در آن  $\sigma$  قطر مشخصه مولکول‌هاست که غالباً قطر برخورد نامیده می‌شود و  $\epsilon$  انرژی مشخصه است که عملاً انرژی جاذبه ماکزیمم بین یک جفت مولکول است. این تابع که در شکل زیر نشان داده شده است، ویژگی‌های مشخصه نیروهای بین‌مولکولی را نمایش می‌دهد: جاذبه ضعیف در فواصل زیاد و دافعه قوی در فواصل کم. مقدار پارامترهای  $\sigma$  و  $\epsilon$  را برای بسیاری از مواد می‌دانیم:



ویسکوزیته یک گاز تک‌اتمی با وزن مولکولی  $M$  را می‌توان برحسب پارامترهای لند-جونز، به صورت زیر نوشت:

$$\mu = \frac{5}{16} \frac{\sqrt{\pi m k T}}{\pi \sigma^2 \Omega_{\mu}} \quad \text{یا} \quad \mu = 2,6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_{\mu}} \quad (14-4.1)$$

در صورت دوم این معادله، اگر  $T [=] \text{K}$  و  $\sigma [=] \text{\AA}$ ، آنگاه  $\mu [=] \text{g/cm} \cdot \text{s}$ . کمیت بدون بُعد  $\Omega_{\mu}$  تابعی با تغییرات آهسته از دمای بدون بُعد  $kT/\epsilon$ ، از مرتبه بزرگی واحد است که در جدول ۲.۵ گفته شده است. این تابع را «انتگرال برخورد برای ویسکوزیته» می‌نامند، زیرا جزئیات مسیریابی را که مولکول‌ها در حین برخورد دوتایی دنبال می‌کنند، به حساب می‌آورد. اگر گاز از کره‌های صلبی به قطر  $\sigma$  (به جای مولکول‌های حقیقی با نیروهای جاذبه و دافعه) تشکیل شده بود، آنگاه  $\Omega_{\mu}$  دقیقاً برابر واحد می‌شد. بنابراین تابع  $\Omega_{\mu}$  را می‌توان به صورت تابع توصیف‌کننده انحراف از رفتار کره صلب تعبیر کرد.



محاسبه ویسکوزیته گاز خالص با جگالی پایین  
 ویسکوزیته گاز CO<sub>2</sub> را در دماهای ۲۰۰، ۳۰۰، و ۸۰۰ K و فشار ۱ اتمسفر محاسبه کنید.

حل  
 با استفاده از معادله قبل از جدول ۱.۰ پارامترهای لنارد-جونز برای گاز CO<sub>2</sub> را به دست می آوریم:  $\epsilon/K = 190 K$   
 و  $\sigma = 3.996 \text{ \AA}$ . وزن مولکولی CO<sub>2</sub> برابر است با ۴۴.۰۱.

با قرار دادن  $M$  و  $\sigma$

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{44.01 T}}{(3.996)^2 \Omega_\mu} = 1.109 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{T}}{\Omega_\mu}$$

که در آن  $\mu [=] \text{ g/cm} \cdot \text{s}$  و  $T [=] \text{ K}$ . بقیه محاسبات را به صورت جدول نشان می دهیم.

$T(K)$	$KT/\epsilon$	$\Omega_\mu$	$\sqrt{T}$	ویسکوزیته (g/cm · s)
۲۰۰	۱,۰۵۳	۱,۵۴۸	۱۴,۱۴	$۱,۰۱۳ \times ۱۰^{-۴}$
۳۰۰	۱,۵۸	۱,۲۸۶	۱۷,۳۲	$۱,۴۹۴ \times ۱۰^{-۴}$
۸۰۰	۴,۲۱	۰,۹۵۹۵	۲۸,۲۸	$۳,۲۶۹ \times ۱۰^{-۴}$



جدول ۱.۵ پارامترهای پتانسیل لارند-جوز (۱۲-۶) و خواص بحرانی.

ماده	وزن مولکولی $M$	پارامترهای لارند-جوز			خواص بحرانی				
		$\sigma$ (Å)	$\epsilon/K$ (K)	Ref.	$T_c$ (K)	$P_c$ (atm)	$\bar{V}_c$ (cm <sup>3</sup> /g-mole)	$\mu_c \times 10^6$ (g/cm · s)	$k_c \times 10^6$ (cal/cm · s · K)
<b>عناصر سبک</b>									
H <sub>2</sub>	۲,۰۱۶	۲,۹۱۵	۳۸,۰	(الف)	۳۳,۳	۱۲,۸۰	۶۵,۰	۳۲,۷	-
He	۴,۰۰۳	۲,۵۷۶	۱۰,۲	(الف)	۵,۲۶	۲,۲۶	۵۷,۸	۲۵,۴	-
<b>گازهای نجیب</b>									
Ne	۲۰,۱۸۰	۲,۷۸۹	۳۵,۷	(الف)	۴۴,۵	۲۶,۹	۴۱,۷	۱۵۶	۷۹,۲
Ar	۳۹,۹۴۸	۳,۴۳۲	۱۲۲,۴	(ب)	۱۵۰,۷	۴۸,۰	۷۵,۲	۲۶۴	۷۱,۰
Kr	۸۳,۸۰	۳,۶۷۵	۱۷۰,۰	(ب)	۲۰۹,۴	۵۴,۳	۹۲,۲	۳۹۶	۴۹,۴
Xe	۱۳۱,۲۹	۴,۰۰۹	۲۳۴,۷	(ب)	۲۸۹,۸	۵۸,۰	۱۱۸,۸	۴۹۰	۴۰,۲
<b>گازهای چند اتمی ساده</b>									
هو <sup>±</sup>	۲۸,۹۶۴	۳,۶۱۷	۹۷,۰	(الف)	± ۱۳۲,۴	± ۳۷,۰	± ۸۶,۷	۱۹۳	۹۰,۸
N <sub>2</sub>	۲۸,۰۱۳	۳,۶۶۷	۹۹,۸	(ب)	۱۲۶,۲	۳۳,۵	۹۰,۱	۱۸۰	۸۶,۸
O <sub>2</sub>	۳۱,۹۹۹	۳,۴۳۳	۱۱۳	(الف)	۱۵۴,۴	۴۹,۷	۷۴,۴	۲۵۰	۱۰۵,۳
CO	۲۸,۰۱۰	۳,۵۹۰	۱۱۰	(الف)	۱۳۲,۹	۳۴,۵	۹۳,۱	۱۹۰	۸۶,۵
CO <sub>2</sub>	۴۴,۰۱۰	۳,۹۹۶	۱۹۰	(الف)	۳۰۴,۲	۷۲,۸	۹۴,۱	۳۲۳	۱۲۲
NO	۳۰,۰۰۶	۳,۴۷۰	۱۱۹	(الف)	۱۸۰	۶۴	۵۷	۲۵۸	۱۱۸,۲
N <sub>2</sub> O	۴۴,۰۱۲	۳,۸۷۹	۲۲۰	(الف)	۳۰۹,۷	۷۱,۷	۹۶,۳	۳۳۲	۱۳۱
SO <sub>2</sub>	۶۴,۰۶۵	۴,۰۲۶	۳۶۳	(ج)	۴۳۰,۷	۷۷,۸	۱۲۲	۴۱۱	۹۸,۶
F <sub>2</sub>	۳۷,۹۹۷	۳,۶۵۳	۱۱۲	(الف)	-	-	-	-	-
Cl <sub>2</sub>	۷۰,۹۰۵	۴,۱۱۵	۳۵۷	(الف)	۴۱۷	۷۶,۱	۱۲۴	۴۲۰	۹۷,۰
Br <sub>2</sub>	۱۵۹,۸۰۸	۴,۲۶۸	۵۲۰	(الف)	۵۸۴	۱۰۲	۱۴۴	-	-
I <sub>2</sub>	۲۵۳,۸۰۹	۴,۹۸۲	۵۵۰	(الف)	۸۰۰	-	-	-	-
<b>هیدروکربن‌ها</b>									
CH <sub>4</sub>	۱۶,۰۴	۳,۷۸۰	۱۵۴	(ب)	۱۹۱,۱	۴۵,۸	۹۸,۷	۱۵۹	۱۵۸
CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub>	۲۶,۰۴	۴,۱۱۴	۲۱۲	(د)	۳۰۸,۷	۶۱,۶	۱۱۲,۹	۲۳۷	-



جدول ۲.۵: انتگرال‌های برخورد برای کاربرد همراه با پتانسیل لندارد-جونز (۱۲-۶) برای پیش‌بینی خواص انتقال گازها در چگالی‌های پایین.  $\Omega_{D,AB}$

$KT/\epsilon$ یا $KT/\epsilon_{AB}$	$\Omega_{\mu} = \Omega_k$ (برای ویسکوزیته و رسانش گرمایی)	$\Omega_{D,AB}$ (برای ضریب نفوذ)	$KT/\epsilon$ یا $KT/\epsilon_{AB}$	$\Omega_{\mu} = \Omega_k$ (برای ویسکوزیته و رسانش گرمایی)	$\Omega_{D,AB}$ (برای ضریب نفوذ)
-۰٫۳-	۲٫۸۴-	۲٫۶۴۹	۲٫۷	۱٫-۶۹۱	-۰٫۹۷۸۲
-۰٫۳۵	۲٫۶۷۶	۲٫۴۶۸	۲٫۸	۱٫-۵۸۳	-۰٫۹۶۸۲
-۰٫۴۰	۲٫۵۲۱	۲٫۳۱۴	۲٫۹	۱٫-۴۸۲	-۰٫۹۵۸۸
-۰٫۴۵	۲٫۴-۱	۲٫۱۸۲	۳٫۰	۱٫-۳۸۸	-۰٫۹۵۰۰
-۰٫۵۰	۲٫۲۸۴	۲٫-۶۶	۳٫۱	۱٫-۳۰۰	-۰٫۹۴۱۸
-۰٫۵۵	۲٫۱۷۸	۱٫۹۶۵	۳٫۲	۱٫-۲۱۷	-۰٫۹۳۴۰
-۰٫۶۰	۲٫-۸۴	۱٫۸۷۷	۳٫۳	۱٫-۱۳۹	-۰٫۹۲۶۷
-۰٫۶۵	۱٫۹۹۹	۱٫۷۹۹	۳٫۴	۱٫-۶۶	-۰٫۹۱۹۷
-۰٫۷۰	۱٫۹۲۲	۱٫۷۲۹	۳٫۵	-۰٫۹۹۹۶	-۰٫۹۱۳۱
-۰٫۷۵	۱٫۸۵۳	۱٫۶۶۷	۳٫۶	-۰٫۹۹۳۱	-۰٫۹۰۶۸
-۰٫۸۰	۱٫۷۹-	۱٫۶۱۲	۳٫۷	-۰٫۹۸۶۸	-۰٫۹۰۰۸
-۰٫۸۵	۱٫۷۳۴	۱٫۵۶۲	۳٫۸	-۰٫۹۸-۹	-۰٫۸۹۵۲
-۰٫۹۰	۱٫۶۸۲	۱٫۵۱۷	۳٫۹	-۰٫۹۷۵۳	-۰٫۸۸۹۷
-۰٫۹۵	۱٫۶۳۶	۱٫۴۷۷	۴٫۰	-۰٫۹۶۹۹	-۰٫۸۸۴۵
۱٫۰-	۱٫۵۹۳	۱٫۴۴-	۴٫۱	-۰٫۹۶۴۷	-۰٫۸۷۹۶
۱٫۰۵	۱٫۵۵۴	۱٫۴۰۶	۴٫۲	-۰٫۹۵۹۸	-۰٫۸۷۴۸
۱٫۱۰	۱٫۵۱۸	۱٫۳۷۵	۴٫۳	-۰٫۹۵۵۱	-۰٫۸۷-۳
۱٫۱۵	۱٫۴۸۵	۱٫۳۴۷	۴٫۴	-۰٫۹۵۰۶	-۰٫۸۶۵۹
۱٫۲۰	۱٫۴۵۵	۱٫۳۲-	۴٫۵	-۰٫۹۴۶۲	-۰٫۸۶۱۷
۱٫۲۵	۱٫۴۲۷	۱٫۲۹۶	۴٫۶	-۰٫۹۴۲۰	-۰٫۸۵۷۶
۱٫۳۰	۱٫۴-۱	۱٫۲۷۴	۴٫۷	-۰٫۹۳۸-	-۰٫۸۵۳۷
۱٫۳۵	۱٫۳۷۷	۱٫۲۵۲	۴٫۸	-۰٫۹۳۴۱	-۰٫۸۴۹۹
۱٫۴۰	۱٫۳۵۵	۱٫۲۳۴	۴٫۹	-۰٫۹۳۰۴	-۰٫۸۴۶۳
۱٫۴۵	۱٫۳۳۴	۱٫۲۱۶	۵٫۰	-۰٫۹۲۶۸	-۰٫۸۴۲۸
۱٫۵۰	۱٫۳۱۵	۱٫۱۹۹	۶٫۰	-۰٫۸۹۶۲	-۰٫۸۱۳۹
۱٫۵۵	۱٫۲۹۷	۱٫۱۸۳	۷٫۰	-۰٫۸۷۳۷	-۰٫۷۸۹۸
۱٫۶۰	۱٫۲۸-	۱٫۱۶۸	۸٫۰	-۰٫۸۵۳۸	-۰٫۷۷۱۱
۱٫۶۵	۱٫۲۶۴	۱٫۱۵۴	۹٫۰	-۰٫۸۳۸-	-۰٫۷۵۵۵
۱٫۷۰	۱٫۲۴۹	۱٫۱۴۱	۱۰٫۰	-۰٫۸۲۴۴	-۰٫۷۴۳۳
۱٫۷۵	۱٫۲۳۵	۱٫۱۲۸	۱۲٫۰	-۰٫۸-۱۸	-۰٫۷۲-۲
۱٫۸۰	۱٫۲۲۲	۱٫۱۱۷	۱۴٫۰	-۰٫۷۸۳۶	-۰٫۷-۲۵
۱٫۸۵	۱٫۲-۹	۱٫۱-۵	۱۶٫۰	-۰٫۷۶۸۳	-۰٫۶۸۷۸
۱٫۹۰	۱٫۱۹۸	۱٫-۹۵	۱۸٫۰	-۰٫۷۵۵۲	-۰٫۶۷۵۱
۱٫۹۵	۱٫۱۸۶	۱٫-۸۵	۲۰٫۰	-۰٫۷۴۳۶	-۰٫۶۶۴-
۲٫۰-	۱٫۱۷۶	۱٫-۷۵	۲۵٫۰	-۰٫۷۱۹۸	-۰٫۶۴۱۴
۲٫۱۰	۱٫۱۵۶	۱٫-۵۸	۳۰٫۰	-۰٫۷-۱۰	-۰٫۶۲۳۵
۲٫۲۰	۱٫۱۳۸	۱٫-۴۲	۳۵٫۰	-۰٫۶۸۵۴	-۰٫۶-۸۸
۲٫۳۰	۱٫۱۲۴	۱٫-۲۷	۴۰٫۰	-۰٫۶۷۳۳	-۰٫۵۹۶۴
۲٫۴۰	۱٫۱-۷	۱٫-۱۳	۵۰٫۰	-۰٫۶۵۱-	-۰٫۵۷۶۳
۲٫۵۰	۱٫-۹۳۳	۱٫-۰-۶	۷۵٫۰	-۰٫۶۱۴-	-۰٫۵۴۱۵
۲٫۶۰	۱٫-۸-۷	-۰٫۹۸۹-	۱۰۰٫۰	-۰٫۵۸۸۷	-۰٫۵۱۸-

# ویسکوزیته مخلوط گاز بر اساس فرمول ویلک

- برای محاسبه ویسکوزیته مخلوط گازی می توان از فرمول تجربی زیر استفاده کرد که بسیار رضایت بخش است

$$\mu_{mix} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} \mu_{\alpha}}{\sum_{\beta} x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}}$$

که در آن کمیت‌های بدون بعد  $\Phi_{\alpha\beta}$  عبارت‌اند از:

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \left( 1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[ 1 + \left( \frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/2} \left( \frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/2} \right]^2$$



پیش‌بینی ویسکوزیته مخلوط گازی با چگالی پایین  
 ویسکوزیته مخلوط گازی زیر را در فشار ۱ اتمسفر و دمای ۲۹۳ K، با استفاده از داده‌های مربوط به اجزای خالص  
 آن در فشار و دمای مشابه، تخمین بزنید:

گونه $\alpha$	کسر مولی $x_\alpha$	وزن مولکولی $M_\alpha$	ویسکوزیته $\mu_\alpha$ (g/cm · s)
۱. CO <sub>2</sub>	۰,۱۳۳	۴۴,۰۱	$1462 \times 10^{-7}$
۲. O <sub>2</sub>	۰,۰۳۹	۳۲,۰۰	$2031 \times 10^{-7}$
۳. N <sub>2</sub>	۰,۸۲۸	۲۸,۰۲	$1754 \times 10^{-7}$



• از معادلات زیر استفاده می کنیم

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} \mu_{\alpha}}{\sum_{\beta} x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}} \quad \Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \left( 1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/\tau} \left[ 1 + \left( \frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/\tau} \left( \frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/\tau} \right]^{\tau}$$

$\alpha$	$\beta$	$M_{\alpha}/M_{\beta}$	$\mu_{\alpha}/\mu_{\beta}$	$\Phi_{\alpha\beta}$	$\sum_{\beta=1}^{\tau} x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}$
۱.	۱	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	
	۲	۱,۳۷۵	۰,۷۲۰	۰,۷۳۰	۰,۷۶۳
	۳	۱,۵۷۱	۰,۸۳۴	۰,۷۲۷	
۲.	۱	۰,۷۲۷	۱,۳۸۹	۱,۳۹۴	
	۲	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۵۷
	۳	۱,۱۴۲	۱,۱۵۸	۱,۰۰۶	
۳.	۱	۰,۶۳۷	۱,۲۰۰	۱,۳۷۰	
	۲	۰,۸۷۶	۰,۸۶۴	۰,۹۹۳	۱,۰۴۹
	۳	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	۱,۰۰۰	



سپس از معادله زیر استفاده می کنیم

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{x_{\alpha} \mu_{\alpha}}{\sum_{\beta} x_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}}$$

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{(0,1333)(1462)(10^{-7})}{0,763} + \frac{(0,039)(2031)(10^{-7})}{1,057} + \frac{(0,828)(1754)(10^{-7})}{1,049} \\ &= 1714 \times 10^{-7} \text{ g/cm} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

مقدار مشاهده شده<sup>۱۲</sup> برابر است با:  $1793 \times 10^{-7} \text{ g/cm} \cdot \text{s}$ .



ویسکوزیته مخلوط گاز در چگالی پایین. داده‌های زیر<sup>۱</sup> برای ویسکوزیته‌های مخلوط‌های هیدروژن و فرئون-۱۲ (دی‌کلرودی‌فلوئورومتان) در دمای ۲۵°C و فشار ۱ اتمسفر مفروض است:

$$10^6 \mu \text{ (پوناز): } H_2: 88.4.$$

$$10^6 \mu \text{ (پوناز): دی‌کلرودی‌فلوئورومتان } 124.0$$

ویسکوزیته‌های مخلوط کسر مولی هیدروژن و ۰/۱۵ و ۰/۴۵ را به دست آورید؟

$$\Phi_{11} = \Phi_{22} = 1.0$$

$$\Phi_{12} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left( 1 + \frac{2.016}{120.92} \right)^{-1/2} \left[ 1 + \left( \frac{88.4}{124.0} \right)^{1/2} \left( \frac{120.92}{2.016} \right)^{1/4} \right]^2$$

$$= 3.934$$

$$\Phi_{21} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left( 1 + \frac{120.92}{2.016} \right)^{-1/2} \left[ 1 + \left( \frac{124.0}{88.4} \right)^{1/2} \left( \frac{2.016}{120.92} \right)^{1/4} \right]^2$$

$$= 0.0920$$

