

# موازنه جرم و انرژی

## Mass & Energy Balance

ویرایش اول

# Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering

مدرس جزوه :

**دکتر سیدعلی اشرفی زاده**

(عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول)

تدریس شده در ترم دوم سال تحصیلی ۸۶-۸۵

گردآوری و تایپ :

**بهنام علی نژاد داویدی**

(دانشجوی مهندسی شیمی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول)

بهار ۱۳۸۸



## مقدمه

با توجه به جایگاه ویژه ی درس موازنه جرم و انرژی در مهندسی شیمی و ارتباط عمیق آن با سایر دروس اصلی این رشته و توجه به این مسئله که عدم درک صحیح بسیاری از مفاهیم اساسی مهندسی شیمی از ضعف در دروس پایه و مفاهیم اولیه ناشی می گردد ، وجود نسخه ای جامع در این زمینه می تواند نقش مؤثری در ارتقای سطح یادگیری مباحث مرتبط ایفا نماید.

نسخه ی حاضر، جزوه ی درس موازنه ی جرم و انرژی است که توسط استاد ارجمند جناب دکتر اشرفی زاده عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول در ترم دوم سال تحصیلی ۸۶ - ۸۵ تدریس گردیده و توسط اینجانب گردآوری و تایپ شده است

از ویژگی های این نسخه آموزشی می توان به پوشش کامل مطالب اساسی درس به صورت نکته به نکته همراه با نمونه های حل شده ی فراوان اشاره نمود .

امید است این تلاش گامی هر چند کوتاه اما مؤثر در پیشبرد اهداف آموزشی گروه مهندسی شیمی تلقی گردد.

بهنام علی نژاد داویدی

بهار ۱۳۸۸

## عناوین مطالب

### فصل اول - اصول محاسبات در مهندسی شیمی

کمیت ها و واحد ها  
انواع کمیت ها  
مفهوم  $g_c$   
مول  
جرم اتمی و جرم مولکولی  
جرم حجمی  
وزن مخصوص (چگالی)  
درجه ی (API)  
حجم مخصوص  
دبی ( شدت جریان )  
محاسبه دبی جرمی ، مولی و حجمی  
جزء جرمی ، مولی و حجمی  
آنالیز ( تجزیه )  
غلظت  
مینا  
دما  
فشار  
فشار نسبی و مطلق  
برقراری تعادل در لوله های حاوی سیالات  
محاسبات استوکیومتری  
درجه تکمیل واکنش  
میزان تبدیل  
تولید انتخابی  
بازده

### فصل دوم - موازنه ماده

تعاریف و مفاهیم موازنه ماده  
بررسی سیستم های بدون واکنش  
بررسی سیستم های همراه با واکنش  
انواع فرآیندهای شیمیایی در صنعت  
برنامه ریزی برای تجزیه تحلیل مسائل موازنه مواد

سیستم های شامل زیر سیستم  
مسائل موازنه مواد با حل مستقیم  
موازنه مواد با استفاده از روش های جبری  
جریان برگشتی  
جریان کنار گذر  
جریان زدایشی

## فصل سوم – خواص سیالات

گازها  
معادله حالت گاز ایده آل  
ثابت عمومی گازها  
جرم ویژه و چگالی  
قانون دالتون  
محاسبه فشار جزئی  
قانون آماگات  
محاسبه حجم جزئی  
گازهای حقیقی  
معادله واندروالس  
معادله حالت تراکم پذیری برای گاز حقیقی  
نمودار دما- فشار برای مواد خالص  
نقطه بحرانی  
مخلوط گازهای حقیقی  
معادلات حالت  
متوسط ثابت ها در معادلات حالت  
متوسط ضریب تراکم پذیری  
مشخصات شبه بحرانی  
فشاربخار  
نکاتی پیرامون نمودار دما - فشار برای مواد خالص  
حالت اشباع  
کیفیت  
جداول بخار اشباع  
تشخیص حالت اشباع ( یا مادون اشباع و یا مافوق اشباع)  
ارتباط مول ، فشار ، حجم هوا و بخار آب  
تعادل گاز - مایع در سیستم های چندتایی (V.L.E)

قانون رانولت

قانون هنری

## فصل چهارم – موازنه ی انرژی

انواع اصلی انرژی

کار (  $W$  )

گرما (  $Q$  )

انرژی داخلی

آنتالپی

انرژی پتانسیل

انرژی جنبشی

قانون اول ترمودینامیک

بیان ریاضی قانون اول ترمودینامیک

استفاده از ظرفیت حرارتی متوسط در محاسبه آنتالپی

محاسبه آنتالپی برای مخلوط ها

محاسبه آنتالپی با استفاده از جداول آنتالپی

پیدا کردن آنتالپی از جداول بخار

موازنه عمومی انرژی

موازنه انرژی همراه با واکنش های شیمیایی

نحوه لحاظ کردن تغییرات انرژی حاصل از واکنش در موازنه انرژی

ارزش حرارتی سوخت

ارتباط بین گرمای واکنش در فشار ثابت و گرمای واکنش در حجم ثابت

موازنه انرژی در حالیکه محصولات و ترکیب شونده ها در 25 درجه سانتیگراد ( دمای مبنا ) نباشند

محاسبه دمای آدیاباتیک شعله

مرجع مورد استفاده :

## اصول بنیانی و مبانی محاسبات در مهندسی شیمی

نوشته دوید هیمبل بلاو – ترجمه دکتر مرتضی سهرابی



فصل اول :

# اصول محاسبات در مهندسی شیمی

## کمیت ها و واحد ها

- نکته ۱-** هیچ عدد بدون بعد و واحدی مفهوم فیزیکی نخواهد داشت.
- نکته ۲-** در جمع و تفریق کمیت های فیزیکی فقط آن دسته از کمیت هایی حق دارند با یکدیگر جمع شوند (یا تفریق شوند) که جنس آنها یکی باشد. (نه لزوماً واحد آنها)
- نکته ۳-** ضرب و تقسیم کمیت های فیزیکی حتی اگر دارای واحد مشترک یا جنس مشترک هم نباشند امکان پذیر است.

مثال :

$$3\text{kg} + 2\text{m}$$

نادرست

$$3\text{kg} + 2\text{kg} = 5\text{kg}$$

درست

$$2\text{kg} + 2\text{g}$$

قابل جمع هستند ولی ابتدا باید واحدها یکی شود  
در ضرب و تقسیم لزوماً جنس کمیت ها یکی نیست.

مثال :

$$F = m \cdot a$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

## انواع کمیت ها

- ۱- کمیت های اصلی :** کمیت هایی که وجودشان وابسته به کمیت دیگری نیست. تعداد آنها محدود است و مهم ترین آنها عبارتند از : طول ، جرم ، زمان ، مول و دما
- ۲- کمیت های فرعی :** کمیت هایی که وجودشان وابسته به کمیت دیگری است . تعداد آنها نامحدود بوده و مهم ترین آنها عبارتند از : نیرو ، دانسیته ، فشار ، حجم ، سطح و ...

اینکه هر کمیت را چگونه اندازه می گیریم و معیار سنجش آن چیست را واحد آن کمیت گویند. از آنجا که سیستم های آحاد مختلفی وجود دارد که در حال حاضر نیز در صنایع مختلف از آنها استفاده می شود به ناچار می بایست با آنها آشنا شد و ضرایب تبدیل این واحدها به یکدیگر را دانست.



کمیت سیستم	طول	جرم	زمان	دما	مول	نیرو	انرژی
SI	m	Kg	sec	$^{\circ}\text{C}$ و K	gmole	N	J
cgs	cm	gr	sec	$^{\circ}\text{C}$ و K	gmole	dyne	erg , cal
مهندسی امریکایی	ft	lbm	sec	$^{\circ}\text{F}$ و $^{\circ}\text{R}$	lbmole	lb	Btu , lb.ft
مهندسی انگلیسی	ft	slug	sec	$^{\circ}\text{F}$ و $^{\circ}\text{R}$	lbmole	lbw	Btu
انگلیسی مطلق	ft	poundal	sec	$^{\circ}\text{F}$ و $^{\circ}\text{R}$	lbmole	poundal	Ft.poundal
دیمانسین	L	M	T	K	Mole	$\text{M.L.} \cdot \text{T}^{-2}$	$\text{M.L}^2 \cdot \text{T}^{-2}$

جدول یکاها در سیستم های مختلف

**تذکره - ۱:** دیمانسین هر کمیت نشان دهنده ی جنس آن کمیت می باشد که با حروف انگلیسی بطور قراردادی نشان داده می شود.

**تذکره - ۲:** اعداد و پارامترهایی که در توابع ریاضی قرار می گیرند بدون بعد و واحد در نظر گرفته می شوند.

برخی از تبدیل واحد های مهم در زیر آورده شده است :

مثال: ۵۰ پوند چند کیلو گرم است ؟

$$1\text{lbm} = 0.454 \text{ Kg}$$

$$50\text{lbm} \times \frac{0.454\text{kg}}{1\text{lbm}} = 50 \times 0.454\text{kg} = 22.7 \text{ Kg}$$

**یک فیزیکی:** یک فیزیکی از ارتباط بین آحاد در سیستم های مختلف بدست می آید و دارای

خاصیتی است که واحد کمیت فیزیکی را تغییر می دهد بدون اینکه جنس آن کمیت را عوض کند.

**نکته:** می توان بی شمار یک فیزیکی تعریف کرد ولی بنا به نوع مسئله می بایست از یک فیزیکی صحیح و مناسب با تبدیل واحد استفاده نمود.

**نکته:** یک فیزیکی یک عامل خنثی در ضرب است .

مثال :

$$1\text{lbm} = 0.454 \text{ Kg}$$

$$\frac{1\text{lbm}}{0.454\text{Kg}} = \frac{0.454\text{Kg}}{0.454\text{Kg}}$$

$$\Rightarrow \text{یک فیزیکی} \frac{1\text{lbm}}{0.454\text{Kg}} = 1$$

**تذکر:** در صورت نیاز می توان از یک فیزیکی چند بار به طور متوالی استفاده کرد.

مثال: اگر هواپیمایی با سرعت  $2200\text{ft/s}$  حرکت کند سرعت آن را بر حسب کیلومتر بر ساعت بدست آورید؟

$$2200 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \left| \frac{12\text{in}}{1\text{ft}} \right| \left| \frac{2.54\text{cm}}{1\text{in}} \right| \left| \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \right| \left| \frac{1\text{km}}{1000\text{m}} \right| \left| \frac{60\text{sec}}{1\text{min}} \right| \left| \frac{60\text{min}}{1\text{hr}} \right| = 950.4 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

**تذکر:** در صورت نیاز می توان یک فیزیکی را به توان رساند.

مثال: اگر حجم ظرفی  $1500 \text{ in}^3$  باشد حجم را بر حسب  $\text{m}^3$  بدست آورید؟

$$1500\text{in}^3 = ?\text{m}^3$$

$$1\text{in}^3 = (2.54\text{cm})^3 \Rightarrow 1\text{in}^3 = 2.54^3 \text{cm}^3 \Rightarrow \frac{1\text{in}^3}{2.54^3} = 1$$

$$\Rightarrow 1500\text{in}^3 \left| \frac{2.54^3 \text{cm}^3}{1\text{in}^3} \right| \left| \frac{1\text{m}^3}{100^3 \text{cm}^3} \right| = 2.4581\text{m}^3$$

مثال: چنانچه یک لوله روزانه  $400\text{in}^3$  آب را به داخل یک مخزن هدایت کند محاسبه کنید که در

هر دقیقه چند  $\text{cm}^3$  آب وارد مخزن می شود؟

$$\frac{400\text{in}^3}{\text{day}} = ? \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

$$\frac{400\text{in}^3}{\text{day}} \left| \frac{2.45^3 \text{cm}^3}{1^3 \text{in}^3} \right| \left| \frac{1\text{day}}{24 \times 60 \text{min}} \right| = 4.5 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

مثال: در صورتیکه ضریب انتقال حرارت از یک لوله توسط رابطه ی  $h = 0.02G \cdot \frac{G^{0.6}}{D^{0.4}}$  بدست آید که در آن  $h$  ضریب انتقال حرارت بر حسب  $\frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot F}$  و  $G$  شدت جریان بر حسب  $\frac{lb_m}{hr \cdot ft^2}$  و  $D$  قطر خارجی بر حسب  $ft$  باشد و بخواهیم  $h$  را بر حسب  $\frac{cal}{min \cdot cm^2 \cdot ^\circ C}$  بیان کنیم ثابت عددی بجای  $0.026$  چه خواهد بود؟

حل:

$$1Btu = 252Cal$$

$$1hr = 60min$$

$$1in = 2.54cm$$

$$1ft = 12in$$

$$1^\circ C = 1.8^\circ F$$

$$h = (0.02G \cdot \frac{G^{0.6}}{D^{0.4}}) \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot F} \left| \frac{252Cal}{1Btu} \right| \left| \frac{1hr}{60min} \right| \left| \frac{1ft^2}{144in^2} \right| \left| \frac{1in^2}{2.54^2in^2} \right| \left| \frac{1.8^\circ F}{1^\circ F} \right|$$

$$= \left( \frac{0.026 \times 252 \times 1.8}{60 \times 144 \times 2.54^2} \frac{G^{0.6}}{D^{0.4}} \right) \frac{Cal}{min \cdot cm^2 \cdot ^\circ C} = (2.11 \times 10^{-4} \frac{G^{0.6}}{D^{0.6}}) \frac{Cal}{min \cdot cm^2 \cdot ^\circ C}$$

در مثال قبل چنانچه بخواهیم  $G$  و  $D$  به ترتیب بر حسب واحدهای  $\frac{Cal}{min \cdot cm^2}$  و  $cm$  بیان شوند و  $h$  به حسب همان واحد بدست آمده در مثال قبل باشد ثابت عددی را به نحو مناسب بدست آورید.

$$h = 2.11 \times 10^{-4} \frac{(G \frac{lbm}{hr \cdot ft^2} \left| \frac{454gr}{1lbm} \right| \left| \frac{1hr}{60min} \right| \left| \frac{1ft^2}{12^2in^2} \right| \left| \frac{1in^2}{2.54^2cm^2} \right|)^{0.6}}{(D \frac{ft}{1ft} \left| \frac{12in}{1ft} \right| \left| \frac{2.54cm}{1in} \right|)^{0.4}}$$

$$= 2.11 \times 10^{-4} \frac{(\frac{454}{60 \times 10^2 \times 2.54^2})^{0.6} G^{0.6}}{(12 \times 2.54)^{0.4} D^{0.4}} = 3.10^{-6} \frac{G^{0.6}}{D^{0.4}}$$

مثال: چنانچه در رابطه زیر  $D$  فاصله و بر حسب میکرون،  $t$  زمان و بر حسب ثانیه باشد، فرمول را به نحوی تغییر دهید که  $D$  بر حسب  $in$  و  $t$  بر دقیقه باشد.

$$d = 16.2 - 16.2e^{-0.021t}$$

$$d = \frac{16.2\mu}{1\mu} \left| \frac{10^{-6}m}{1\mu} \right| \left| \frac{100cm}{1m} \right| \left| \frac{1in}{2.54cm} \right| - \frac{16.2\mu}{1\mu} \left| \frac{10^{-6}m}{1\mu} \right| \left| \frac{100cm}{1m} \right| \left| \frac{1in}{2.54cm} \right| e^{-\frac{0.021}{sec} \left| \frac{60sec}{1min} \right|}$$

$$\Rightarrow d = 0.38 \times 10^{-4} - 0.38e^{-1.26t}$$

**$g_c$ :**

در سیستم مهندسی به دو دلیل از ثابت  $g_c$  استفاده می شود.

۱- تعدیل واحد ها در فرمول قانون دوم نیوتن  $F=m.a$

۲- یکی کردن عدد جرم و عدد وزن

مقدار عددی عددی  $g_c$  برابر با 32.174 می باشد که مقدار ثابت گرانش بر حسب  $(ft/sec^2)$  در سطح دریا و عرض جغرافیایی  $45^\circ$  می باشد.

با نوشتن  $F=m.a/g_c$  می توان نتیجه گرفت که برای بدست آوردن  $F$  بر حسب  $lb_f$  می بایست

واحد  $g_c$  به صورت زیر باشد:

$$[g_c] = \frac{lb_m \cdot ft}{lb_f \cdot sec^2}$$

و برای یکی شدن عدد جرم و عدد وزن می بایست مقدار عددی  $g_c$  با توجه به رابطه ی  $W = \frac{m \cdot g}{g_c}$  برابر 32.174 باشد.

برای تعدیل واحد ها در محاسبات انرژی نیز می بایست در سیستم مهندسی  $g_c$  را لحاظ کنیم. با این کار انرژی بر حسب  $ft \cdot lb_f$  بدست می آید و روابط زیر را به کار می بریم:

$$W = F \cdot d = \frac{m \cdot g}{g_c} \cdot d$$

$$\Rightarrow lb_m \times \frac{\frac{ft}{sec^2} \times ft}{\frac{lb_m \cdot ft}{lb_f \cdot sec^2}} = ft \cdot lb_f$$

مثال: جسی به جرم  $10lb_m$  چه وزنی بر حسب  $lb$  دارد؟

$$W = m \cdot \frac{g}{g_c} \Rightarrow W = 10 \times \frac{32.2}{32.174} \cong 10lb_f$$

مثال:  $100lb_m$  آب بوسیله یک خط لوله و با سرعت  $10 \frac{ft}{sec}$  در حال حرکت است. انرژی جنبشی آن را بر حسب Btu محاسبه کنید.

$$1Btu = 778lb_f \cdot ft$$

$$g_c = 32.174 \frac{lb_m \cdot ft}{sec^2 \cdot lb_f}$$

$$g = 32.2 \frac{ft}{sec^2}$$

$$E_k = \frac{1}{2} \frac{mV^2}{g_c} = \frac{1}{2} \times \frac{100 \times 10^2}{32.174} = 155 ft \cdot lb_f \Rightarrow 155 ft \cdot lb_f \times \frac{1Btu}{778 ft \cdot lb_f} = \frac{155}{778} Btu$$

مثال: انرژی پتانسیل یک بشکه آب را که محتوی  $100lb_m$  می باشد و نسبت به سطح زمین  $10ft$  ارتفاع دارد را محاسبه کنید.

$$E_p = \frac{mgh}{g_c} = \frac{100 \times 32.2 \times 10}{32.174} = 1001 ft.lb_f$$

## مول (Mole)

طبق آزمایشات آووگادرو یک گرم مول از هر ماده دارای تعداد  $6.023 \times 10^{23}$  ذره بنیادی از آن ماده است.

واحد های اصلی مول عبارتند از گرم مول ( $gmole$ ) ، پوند مول ( $lbmole$ ) و کیلومول ( $Kmole$ )

ذره ی بنیادی  $1 gmole = 6.02 \times 10^{23}$

ذره ی بنیادی  $1 lbmole = 454 gmole = 454 \times 6.02 \times 10^{23}$

ذره ی بنیادی  $1 Kmole = 1000 gmole = 1000 \times 6.02 \times 10^{23}$

**نکته ۱-** ذره بنیادی (تشکیل دهنده) برای مواد سازنده تک اتمی، اتم و برای مقادیر مرکب و یا مواد ساده چند اتمی، مولکول است.

**نکته ۲-** چنانچه کلمه مول به تنهایی به کار رود منظور گرم مول است.

مثلاً وقتی می گوئیم یک گرم مول آهن منظور  $6.02 \times 10^{23}$ ، اتم آهن است ولی وقتی می گوئیم یک گرم مول آب منظور  $6.02 \times 10^{23}$ ، مولکول آب است.

## جرم اتمی و جرم مولکولی

**جرم اتمی:** جرم اتم های یک جسم به تعداد  $6.02 \times 10^{23}$ ، عدد اتم بر حسب گرم را جرم اتمی می نامیم. (به عبارت دیگر جرم یک گرم مول از هر ماده بر حسب گرم)

**جرم مولکولی:** جرم مولکول های یک جسم به تعداد  $6.02 \times 10^{23}$ ، عدد مولکول بر حسب گرم را جرم مولکولی می نامیم. (به عبارت دیگر جرم یک گرم مول از هر ماده بر حسب گرم)

**نکته ۱ -** جرم اتمی برای مواد ساده تک اتمی و جرم مولکولی برای مواد مرکب و مواد ساده چند اتمی کاربرد دارد.

**نکته ۲ -** از آنجایی که جرم اتمی و جرم مولکولی کمیت های فرعی هستند لذا می بایست محاسبه شود. رابطه محاسبه آنها به صورت زیر است.

$$M = \frac{m}{n}$$

**m** = جرم

**n** = تعداد مول

**M** = جرم اتم یا مولکولی

**نکته ۳ -** با توجه به رابطه ی فوق می توان دیمانسیون جرم اتمی و جرم مولکولی را به صورت زیر بدست آورد .

$$[M] = \frac{[m]}{[n]} = \frac{M}{mole}$$

$$[M] = M \cdot mole^{-1}$$

**نکته ۴ -** با توجه به دیمانسیون بدست آمده برای جرم اتمی و جرم مولکولی می توان واحدهای اصلی زیر را برای این کمیت ها معرفی کرد.

**SI , cgs :**  $\frac{gr}{gmole}$  استاندارد

**(Eng) :**  $\frac{lbm}{lbmole}$  مهندسی

**:**  $\frac{Kg}{K mole}$  واحد فرعی

**نکته :** برای برقراری ارتباط بین اعداد جرم اتمی و جرم مولکولی در واحدهای گوناگون به عنوان مثال مس را در نظر می گیریم :

$$Cu = 64 \frac{gr}{gmole} \left| \frac{1lbm}{454gr} \right| \frac{454mole}{1lbmole} = 64 \frac{lbm}{lbmole} = 64 \frac{Kg}{kmole}$$

با توجه به نمونه فوق می توان گفت که عدد جرم اتمی و جرم مولکولی در واحد های مختلف یکی بدست می آید . ولی واحد متفاوتی دارد. مثلاً وقتی می گوئیم مس  $cu = 64 \frac{gr}{gmole}$  است یعنی اینکه یک gmole مس 64 گرم جرم دارد و یا اینکه وقتی می گوئیم مس  $64 \frac{lbm}{lbmole}$  مفهوم این است که یک lbmole ، 64 پوند جرم دارد.

**تذکر:** مول از نظر لغوی به توده و انباشته ترجمه شده است که به درستی بیان کننده مفهوم فیزیکی و علمی این واژه نیست.

### دانسیته ( جرم حجمی ) ( جرم ویژه )

جرم واحد حجم هر ماده را گویند و داریم :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{M}{L^3} = M.L^{-3}$$

**نکته ۱:** برخی مایعات در اثر تغییر فشار از خود تغییر حجم نشان می دهند این مایعات را مایعات تراکم پذیر می نامند.

**نکته ۲:** برای مایعات تراکم ناپذیر و جامدات دانسیته تابع فشار نیست و فقط تابع دما است. ولی برای گازها و مایعات تراکم پذیر هم تابع دما و هم تابع فشار است.

**نکته ۳:** برای مواد ناخالص علاوه بر مطالب قبلی دانسیته تابع غلظت نیز هست.

**نکته ۴:** از آنجائیکه در برخی محاسبات مهندسی تغییرات دانسیته و مطالعه روی آن اهمیت بسزایی دارد . یک سری گراف ها و نمودار هایی که از طریق آزمایش بدست می آیند مورد استفاده قرار می گیرند.

**نکته ۵:** چنانچه در مسئله ای دما و فشار قید نشوند حالت STP فرض می شود.

شرایط STP برای مایعات و جامدات ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار 1atm بوده اما برای گازها صفر درجه سانتیگراد و فشار 1atm می باشد.

## چگالی ( وزن مخصوص )- Specific gravity

نسبت جرم حجمی جسم به جرم حجمی جسم مینا را چگالی آن جسم می نامند.

$$Sp.gr = \frac{\rho_{a,T,P}}{\rho_{o,T_o,P_o}}$$

**نکته ۱:** ماده ی مینا برای مایعات و جامدات آب و برای گازها هواست.

**نکته ۲:** صورت و مخرج می بایست دارای یک واحد باشند.

### طریقه بیان چگالی :

معمولاً باید دمای هر کدام از دو ماده مشخص باشد به عنوان مثال اگر وزن مخصوص یک جسم جامد بصورت زیر داده شده باشد :

$$Sp.gr = 0.73 \frac{20^{\circ}C}{40^{\circ}C}$$

منظور این است که جرم حجمی ماده مورد نظر در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تقسیم بر جرم حجمی آب در ۴ درجه سانتیگراد برابر ۰,۷۳ است که همان چگالی جسم می باشد. (چنانچه دمایی قید نشود منظور این بوده که هر دو جسم در شرایط STP بوده اند و یا اگر برای یکی از مواد دما مشخص شود برای آن ماده نیز صادق است که در این صورت نیازی به بیان دما در کنار عدد چگالی نیست.

**تذکر:** در برخی موارد برای بیان چگالی امکان دارد واحد صورت و واحد مخرج یکی نباشد که در آن صورت می بایست حتماً واحد آنها بیان شود به عنوان مثال اگر یک چگالی بصورت زیر داده شده باشد :

$$Sp.gr = 150 \frac{20^{\circ}C}{4^{\circ}C} \frac{\frac{Kg}{m^3}}{\frac{gr}{cm^3}}$$

منظور این بوده که دانسیته جسم مورد نظر در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و بر حسب  $\frac{Kg}{m^3}$  بر دانسیته جسم مینا در دمای ۴ درجه سانتیگراد و بر حسب  $\frac{gr}{cm^3}$  تقسیم شده است.



مثال: چنانچه وزن مخصوص یک جسم جامد 1.25 باشد جرم حجمی آن را بر حسب  $lb / ft^3$  حساب کنید در صورتیکه  $\rho_{H_2O} = 1 \frac{gr}{cm^3}$  باشد.

راه حل اول:

محاسبه  $\rho_a$  از رابطه ی:  $sp.gr = \frac{\rho_a}{\rho_o}$  و تبدیل آن به  $lbm / ft^3$ :

$$\rho_a = \frac{1.25 gr}{cm^3} \left| \frac{1 lbm}{454 gr} \right| \frac{2.54^3 cm^3}{1 in^3} \left| \frac{12^3 in^3}{1 ft^3} \right| = 77.9 \frac{lbm}{ft^3}$$

راه حل دوم:

تبدیل  $\rho_{H_2O}$  از  $gr / cm^3$  به  $lbm / ft^3$  و استفاده از آن در رابطه ی  $sp.gr = \frac{\rho_a}{\rho_o}$

$$\rho_o = \frac{1 gr}{cm^3} \left| \frac{1 lbm}{454 gr} \right| \frac{2.54^3 cm^3}{1 in^3} \left| \frac{12^3 in^3}{1 ft^3} \right| = 62.4 \frac{lbm}{ft^3}$$

$$\Rightarrow 1.25 = \frac{\rho_a}{62.4 \frac{lbm}{ft^3}} \Rightarrow \rho_a = 1.25 \times 62.4 = 78 \frac{lbm}{ft^3}$$

مثال: اگر جرم حجمی آب در 4 درجه سانتیگراد برابر  $1 \frac{gr}{cm^3}$  باشد و چگالی یک جسم بصورت  $0.73 \frac{20^\circ C}{4^\circ C}$  داده شده باشد جرم حجمی آن را بر حسب  $\frac{lbm}{ft^3}$  بدست آورید.

$$0.73 = \frac{\rho_{solid.at.20^\circ C}}{\rho_{H_2O.at.4^\circ C}}$$

$$\Rightarrow \rho_{solid.at.20^\circ C} = \frac{1 \times 0.73 gr}{cm^3} \left| \frac{1 lb_m}{454 gr} \right| \frac{2.54^3 cm^3}{1 in^3} \left| \frac{12^3 in^3}{1 ft^3} \right| = \frac{0.73 \times 2.54^3 \times 12^3}{454} \frac{lb_m}{ft^3}$$

## درجه ی ( API ) :

در صنعت نفت چگالی مواد نفتی را غالباً توسط مقیاسی به نام درجه API می سنجند که از رابطه ی زیر محاسبه می گردد:

$$^\circ API = \frac{141.5}{Sp.gr \left( \frac{60^\circ F}{60^\circ F} \right)} - 131.5 \Rightarrow Sp.gr \frac{60^\circ F}{60^\circ F} = \frac{141.5}{^\circ API + 131.5}$$

## حجم مخصوص ( specific volume )

حجم واحد جرم را گویند .

$$v = \frac{V}{m}$$

حجم مخصوص  $v$

جرم  $m$

حجم  $V$

$$[v] = L^3 . M^{-1}$$

**نکته ۱:** برخی مواقع حجم مخصوص را به صورت مولی بیان می کنند که عبارت است از حجم واحد مول و از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$\hat{V} = \frac{V}{n}$$

حجم  $V$

تعداد مول  $n$

$\hat{V}$  حجم مخصوص مولی

$$[\hat{V}] = L^3 . \text{Mole}^{-1}$$

**تذکر:**  $\hat{V}$  را بخوانید وی بار

**نکته ۲:** حجم مخصوص در جداول ترمودینامیکی کاربرد فراوان دارد.

## دبی ( deby ) ( شدت جریان ) ( flow rate ) :

در جریان های پیوسته شدت جریان عبارت است از مقدار ماده ی عبوری در واحد زمان از یک مقطع خاص .

مقدار ماده عبوری می تواند بر حسب جرم یا مول یا حجم بیان شود.

### انواع دبی :

۱- دبی جرمی ( $\dot{m}$ ) : جرم عبوری در واحد زمان

$$\dot{m} = \frac{m}{t}$$

$$[\dot{m}] = M.T^{-1}$$

۲- دبی حجمی ( $\dot{V}$ ) ( Q ) : حجم عبوری در واحد زمان

$$\dot{V} = \frac{V}{t}$$

$$[\dot{V}] = L^3.T^{-1}$$

۳- دبی مولی ( $\dot{n}$ ) : مول عبوری در واحد زمان

$$\dot{n} = \frac{n}{t}$$

$$[\dot{n}] = Mole.T^{-1}$$

## محاسبه دبی جرمی :

$$\dot{m} = \rho.u.A$$

$\rho$  دانسیته

$u$  سرعت

$A$  سطح عمود بر جریان

تذکر :

$$[\dot{m}] = \frac{M}{L^3} \times \frac{L}{T} \times L^2 = M.T^{-1}$$

## محاسبه دبی حجمی

$$\rho = \frac{\frac{m}{t}}{\frac{V}{t}} = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \Rightarrow \dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

$$\dot{V} = \frac{\rho \cdot u \cdot A}{\rho} = u \cdot A$$

## محاسبه دبی مولی

$$M = \frac{\frac{m}{t}}{\frac{n}{t}} = \frac{\dot{m}}{\dot{n}} \Rightarrow \dot{n} = \frac{\dot{m}}{M} = \frac{\rho \cdot V \cdot A}{M}$$

تذکر: در رابطه فوق M جرم مولکولی است.

مثال: چنانچه ماده ای با جرم حجمی  $800 \frac{kg}{m^3}$  و با سرعت  $3 \frac{m}{s}$  از یک لوله استوانه ای شکل به قطر 4in عبور کند، دبی جرمی، حجمی و مولی آن را محاسبه کنید.  $M=18$

$$\dot{m} = \rho \cdot u \cdot A = 800 \frac{kg}{m^3} \left| \frac{3m}{sec} \right| \pi \times \frac{4^2 in^2}{4} \left| \frac{2.54^2 cm^2}{1^2 in^2} \right| \frac{1m^2}{100cm^2} = 19.46 \frac{kg}{sec}$$

$$A = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad \text{تذکر:}$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{19.46 \frac{kg}{sec}}{800 \frac{kg}{m^3}} = 1.24 \frac{m^3}{sec}$$

$$\dot{n} = \frac{\dot{m}}{M} = \frac{19.46 \frac{kg}{sec}}{18 \frac{kg}{kmole}} = 1.08 \frac{kmole}{sec}$$

مثال: شدت جریان خروجی یک نوع دارو از یک راکتور که دارای جرم مولکولی ۱۹۲ می باشد  $10.5 \frac{Lit}{min}$  غلظت دارو ۴۱/۲٪ (محلول در آب) و چگالی آن ۱/۰۲۴ است. غلظت دارو را بر حسب کیلوگرم بر لیتر در جریان خروجی و دبی جریان خروجی را بر حسب کیلومول بر دقیقه محاسبه کنید.  $\rho_{H_2O} = 1000 \frac{Kg}{m^3}$

$$\dot{V} = 10.5 \frac{lit}{min}$$

$$M = 192$$

$$C = 41.2\%$$

$$Sp.gr = 1.024$$

$$C_{out} = ? \frac{Kg}{lit}$$

$$n = ? \frac{K mole}{min}$$

بافرض اینکه ۴۱.۲٪ در آب باشد

$$\frac{41.2 Kg}{100 Kg_{H_2O}} \left| \frac{1000 Kg_{H_2O}}{1 m^3} \right| \frac{1 m^3}{1000 Lit} = 0.412 \frac{Kg}{Lit}$$

اگر فرض کنیم ۴۱.۲٪ مقدار حل شونده در کل محلول باشد داریم:

$$\frac{41.2 Kg}{100 Kg_{solution}} \left| \frac{1.024 \times 1000 Kg_{solution}}{1 m^3} \right| \frac{1 m^3}{1000 Lit} = 0.422 \frac{Kg}{Lit}$$

با فرض اینکه جرم مولکولی داده شده مربوط به کل محلول باشد:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \Rightarrow \dot{m} = \dot{V} \rho$$

$$\dot{n} = \frac{\dot{m}}{M} + \frac{\dot{V} \rho}{M} = \frac{10.5 Lit}{min} \left| \frac{1024 Kg}{m^3} \right| \frac{1 m^3}{1000 lit} = 0.056 \frac{K mole}{min}$$

با فرض اینکه ۱۹۲ جرم مولکولی حل شونده باشد:

$$\frac{0.422 Kg_{solute}}{Lit_{solution}} \left| \frac{10.5 lit_{solution}}{min} \right| \frac{1 K mole_{solute}}{192 Kg_{solute}} = 0.023 \frac{K mole}{min}$$

نکته :

به مثال های زیر در گرد کردن اعداد توجه کنید :

$$20.465 \rightarrow 20.46$$

$$20.4651 \rightarrow 20.47$$

$$20.4551 \rightarrow 20.46$$

$$20.455 \rightarrow 20.46$$

در 20.465 عدد 6 زوج بوده و به صورت 20.46 گرد می شود.

در 20.455 عدد 5 فرد بوده و به صورت 20.46 گرد می شود.

## جزء جرمی

$$mass.fraction = \frac{m_A}{m_t}$$

عبارت است از جرم ماده A تقسیم بر جرم کل محلول یا مخلوط

## جزء مولی

$$mole.fraction = \frac{n_A}{n_t}$$

عبارت است از تعداد مول ماده A تقسیم بر تعداد مول کل محلول یا مخلوط

## جزء حجمی

$$volume.fraction = \frac{V_A}{V_t}$$

عبارت است از حجم ماده A تقسیم بر حجم کل محلول یا مخلوط

نکته ۱: درصد = جزء  $\times 100$

نکته ۲: در محاسبه ی جزءها واحد صورت و مخرج باید یکی باشد.

نکته ۳: مجموع در صد های اجزاء محلول یا مخلوط = 100

مجموع جزءهای اجزای محلول یا مخلوط = 1

نکته ۴: گاهی اوقات از عبارت جزء وزنی هم استفاده می شود:

$$\text{جزء وزنی} = \frac{m_A}{m_t} = \frac{g \times m_A}{g \times m_t} = \text{جزء جرمی}$$

درصد وزنی = درصد جرمی

نکته ۵: معمولاً جزء در فاز مایع و جامد را با X و در فاز گاز را با Y نمایش می دهند.

مثال: یک محلول صنعتی تمیزکننده شامل 5Kg آب و 5Kg NaOH می باشد جزء مولی و جزء وزنی هر کدام را محاسبه کنید.

$$\begin{cases} 5\text{Kg}.H_2O \\ 5\text{Kg}.NaOH \end{cases}$$

$$\text{mass.fraction} \begin{cases} x_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{NaOH}} = \frac{5}{5+5} = 0.5 \\ x_{NaOH} = \frac{m_{NaOH}}{m_{NaOH} + m_{H_2O}} = 1 - x_{H_2O} = 0.5 \end{cases}$$

$$\text{mole.fraction} \begin{cases} \hat{x}_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_{H_2O} + n_{NaOH}} = \frac{\frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}}}{\frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}} + \frac{m_{NaOH}}{M_{NaOH}}} = \frac{\frac{5}{18}}{\frac{5}{18} + \frac{5}{40}} = 0.69 \\ \hat{x}_{NaOH} = \frac{n_{NaOH}}{n_{H_2O} + n_{NaOH}} = 1 - \hat{x}_{H_2O} = 0.31 \end{cases}$$

مثال : چنانچه در یک محلول گازی 3gmole متان با 3gmole اتان مخلوط شود و دارای شرایط

STP نیز باشیم جزء های جرمی ، مولی و حجمی را محاسبه کنید؟

محاسبه جزء های مولی :

$$\text{جزء مولی متان} = \frac{n_{CH_4}}{n_{CH_4} + n_{C_2H_6}} = \frac{3}{3+3} = 0.5$$

$$\text{جزء مولی اتان} = \frac{n_{C_2H_6}}{n_{CH_4} + n_{C_2H_6}} = \frac{3}{3+3} = 0.5$$

محاسبه جزء های جرمی :

$$\text{جزء جرمی متان} = \frac{m_{CH_4}}{m_{CH_4} + m_{C_2H_6}} = \frac{n_{CH_4} \cdot M_{CH_4}}{n_{CH_4} \cdot M_{CH_4} + n_{C_2H_6} \cdot M_{C_2H_6}} = \frac{3 \times 16}{3 \times 16 + 3 \times 30} = 0.35$$

$$\text{جزء جرمی اتان} = \frac{m_{C_2H_6}}{m_{CH_4} + m_{C_2H_6}} = \frac{n_{C_2H_6} \cdot M_{C_2H_6}}{n_{CH_4} \cdot M_{CH_4} + n_{C_2H_6} \cdot M_{C_2H_6}} = \frac{3 \times 30}{3 \times 16 + 3 \times 30} = 0.65$$

محاسبه جزء های حجمی :

$$PV = nRT \Rightarrow V = \frac{nRT}{P}$$

$$\text{جزء حجمی متان} = \frac{V_{CH_4}}{V_{CH_4} + V_{C_2H_6}} = \frac{\frac{n_{CH_4} \cdot RT}{P}}{\frac{n_{CH_4} \cdot RT}{P} + \frac{n_{C_2H_6} \cdot RT}{P}} = \frac{(\frac{RT}{P}) \cdot n_{CH_4}}{(\frac{RT}{P}) \cdot (n_{CH_4} + n_{C_2H_6})} = 0.5$$

برای محاسبه جزء حجمی اتان نیز به همین صورت عمل می کنیم.



## آنالیز ( تجزیه )

آنالیز عبارت است از بیان مقادیر اجزاء موجود در محلول یا مخلوط بر حسب درصد.

انواع آنالیز عبارتند از ( جرمی ) ، ( وزنی ) ، ( مولی ) و ( حجمی ).

**نکته ۱:** برای مایعات و جامدات همواره فرض بر این است که آنالیز به صورت جرمی ( وزنی ) است. مگر اینکه خلاف آن گفته شده باشد و برای گازها فرض بر این است که آنالیز بر حسب درصد حجمی است ، مگر آنکه خلاف آن گفته شود.

**نکته ۲:** در مورد گازهای ایده آل آنالیز مولی و حجمی با هم برابرند.

**نکته ۳:** چنانچه در محاسبه ی آنالیز گاز ها آب منظور نگردد این آنالیز را آنالیز اُرسات – Orsat – می نامند.

**نکته ۴:** در مورد گازهای غیر ایده آل نیز در این درس همواره فرض می کنیم آنالیز مولی باشد مگر آنکه در مسئله خلاف آن گفته شده باشد.

**نکته ۵:** در این درس همه ی گاز ها را ایده آل فرض می کنیم مگر آنکه خلاف آن گفته شده باشد.

مثال : در صورتیکه آنالیز هوا شامل 21٪ اکسیژن و 79٪ نیتروژن باشد جرم مولکولی هوا را محاسبه کنید؟

$$100 \text{ gmole} : \text{air} \begin{cases} 21 \text{ gmole} : O_2 \\ 79 \text{ gmole} : N_2 \end{cases}$$

$$M_{air} = \frac{m_{air}}{n_{air}} = \frac{m_{O_2} + m_{N_2}}{100 \text{ gmole}} = \frac{n_{O_2} \cdot M_{O_2} + n_{N_2} \cdot M_{N_2}}{100 \text{ gmole}} =$$

$$\frac{21 \text{ gmole} \times 32 \frac{\text{gr}}{\text{gmole}} + 79 \times 28}{100 \text{ gmole}} = 29 \frac{\text{gr}}{\text{gmole}}$$

## غلظت - Concentration

غلظت عبارت است از مقداری از حل شونده بر حسب مول یا جرم یا حجم که در مقدار معینی از حلال یا محلول بر حسب مول یا جرم یا حجم وجود داشته باشد.

حلال : solvent

حل شونده : solute

محلول : solution

**واحد های غلظت :** با توجه به تعریف فوق غلظت می تواند واحد های مختلفی داشته باشد.

$$\begin{array}{l} \text{حل شونده} \left\{ \begin{array}{l} \text{جرم} \left\{ \begin{array}{l} kg \\ gr \\ lbm \\ \dots \end{array} \right. \\ \text{حجم} \left\{ \begin{array}{l} m^3 \\ cm^3 \\ mm^3 \\ \dots \end{array} \right. \\ \text{مول} \left\{ \begin{array}{l} gmol \\ lbmole \\ kmole \\ \dots \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{جرم : } \dots \\ \text{محلول (حلال)} \left\{ \begin{array}{l} \text{حجم : } \dots \\ \text{مول : } \dots \end{array} \right. \end{array}$$

**تذکر:** چنانچه در بیان واحد غلظت اشاره ای نشود فرض بر این است که مقدار حل شونده به ازای واحد محلول داده شده است.

دو واحد خاص در غلظت عبارتند از:

p.p.m : (part per million)

p.p.b : (part per billion)

**جرمی:** مقدار جرم حل شونده در  $10^9$ ،  $10^6$  واحد جرم محلول

$$= \frac{\text{جرم حل شونده}}{10^9 (10^6) \text{ واحد جرم محلول}}$$

**مولی:** تعداد مول حل شونده در  $10^9$ ،  $10^6$  واحد مول محلول

$$= \frac{\text{تعداد مول حل شونده}}{10^9 (10^6) \text{ واحد مول محلول}}$$

**حجمی:** مقدار حجم حل شونده در  $10^9$ ،  $10^6$  واحد حجم محلول

$$= \frac{\text{مقدار حجم حل شونده}}{10^9 (10^6) \text{ واحد حجم محلول}}$$

انواع p.p.m (p.p.b):

**نکته ۱:** در بیان انواع غلظت های ppm و ppb باید واحد صورت و مخرج یکی باشد.

**نکته ۲:** در تمام تعاریف می توان به جای کلمه ی محلول از کلمه حلال استفاده کرد. (بدلیل اینکه عدد حل شونده در مقابل عدد حلال قابل نظر کردن است)

**نکته ۳:** در بیان ppm و ppb چنانچه خلاف آن گفته نشده باشد برای مایعات و جامدات همواره فرض بر این است که ppm و ppb داده شده جرمی و برای گازها، حجمی (مولی) می باشد.

**سوال:** (غلظت یک محلول مایع 10 ppm است)، این جمله چه مفهومی دارد؟

پاسخ:

این جمله می تواند مفاهیم زیر را داشته باشد:

۱- در  $10^6$  کیلوگرم از محلول یا حلال 10 کیلوگرم حل شونده وجود دارد.

۲- در  $10^6$  گرم از حلال یا محلول 10 گرم حل شونده وجود دارد.

۳- در  $10^6$  پوند حلال یا محلول 10 پوند حل شونده وجود دارد.

**سوال:** (غلظت CO در هوا 0.1ppm است)، این جمله چه مفهومی می تواند داشته باشد؟

پاسخ:

می تواند مفاهیم زیر را داشته باشد:

۱- در  $10^6 m^3$  هوا 0.1 متر مکعب CO وجود دارد.

۲- در  $10^6 cm^3$  هوا 0.1 سانیمتر مکعب CO وجود دارد.

۳- در  $10^6 in^3$  هوا 0.1 اینچ مکعب CO وجود دارد.

۴- و چون در مورد غیر ایده آل بودن صحبتی نشده می توان گفت:

$10^6 gmole$  هوا 0.1gmole CO وجود دارد.

۵- در  $10^6 lbmole$  هوا 0.1lbmole CO وجود دارد.

**مثال:** چنانچه در پساب یک کارخانه غلظت یک ماده سمی 0.01 ppm باشد و روزانه ۵۰۰ هزار کیلوگرم از این پساب وارد رودخانه شود، محاسبه کنید که در هر روز چند پوند از این ماده وارد رودخانه می شود؟

A پساب

B ماده سمی

$$C_B = 0.01 ppm$$

$$\dot{m}_A = 500000 \frac{kg}{day}$$

راه حل اول:

$$10^6 Kg A \quad 0.01 Kg B$$

$$500000 Kg A \quad ? = 5 \times 10^{-3} Kg B$$



راه حل دوم:

مبنای محاسبات بر پایه ی یک روز

$$? = \frac{0.01 \text{ Kg } B}{10^6 \text{ Kg } A} \left| \frac{500000 \text{ Kg } A}{0.454 \text{ Kg}} \right| \frac{1 \text{ lbm}}{0.454 \text{ Kg}} = 0.011 \text{ lbm}$$

مثال: محلول  $\text{HNO}_3$  در آب چگالی 1.1 در دمای 250 درجه سانتیگراد را در نظر بگیرید. غلظت  $\text{HNO}_3$

برابر  $15 \frac{\text{gr}}{\text{Lit}}$  می باشد. مطلوب است:

الف: جزء مولی  $\text{HNO}_3$  در محلول

ب: مقدار  $\text{HNO}_3$  بر حسب ppm در محلول

$$Sp.gr = 1.1$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 18$$

$$M_{\text{HNO}_3} = 63$$

$$C = 15 \frac{\text{gr}}{\text{Lit}}$$

$$15 \frac{\text{gr}}{\text{Lit}_{\text{Solution}}} \left| \frac{1 \text{ m}^3_{\text{Solution}}}{1.1 \times 1000 \text{ Kg}_{\text{Solution}}} \right| \frac{1000 \text{ Lit}}{1 \text{ m}^3} = \frac{15}{101} \frac{\text{gr}_{\text{solute}}}{\text{gr}_{\text{solution}}} = 13.63 \frac{\text{gr}_{\text{solute}}}{\text{gr}_{\text{solution}}}$$

$$\Rightarrow 1000 \text{ gr}_{\text{Solution}} \left\{ \begin{array}{l} 13.63 \text{ gr}_{\text{HNO}_3} \\ (1000 - 13.63) \text{ gr}_{\text{H}_2\text{O}} \end{array} \right.$$

$$\hat{x}_{\text{HNO}_3} = \frac{\frac{m_{\text{HNO}_3}}{M_{\text{HNO}_3}}}{\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{m_{\text{HNO}_3}}{M_{\text{HNO}_3}}} = \frac{\frac{13.63}{63}}{\frac{1000 - 13.63}{18} + \frac{13.63}{63}} = 0.0393$$

$$\text{ppm} : \frac{15 \text{ gr}_{\text{solute}}}{1 \text{ Lit}_{\text{solution}}} \left| \frac{1 \text{ m}^3_{\text{solution}}}{1.1 \times 1000 \text{ Kg}_{\text{solution}}} \right| \frac{1000 \text{ Lit}}{1 \text{ m}^3} \left| \frac{1 \text{ Kg}_{\text{solute}}}{1000 \text{ gr}} \right| \times 10^6 = 13636.36$$

## مبنا – BASE

خواص شدتی – IntenSive : به مقدار جرم بستگی ندارد.

خواص ترمودینامیکی

خواص مقداری – ExtenSive : به مقدار جرم بستگی دارند.

مطالعه روی خواص شدتی به جرم بستگی ندارد و می توان آزمایشات یا محاسبات را روی هر مقداری از ماده که راحت تر است انجام داد.

**تعریف مبنا:** عبارت است از مقداری از جسم که روی آن مطالعات خود را انجام می دهیم و نتایجی را که از آن بدست می آوریم می توان برای کل جسم یا سیستم مورد استفاده قرار داد. ( در واقع مبنا عبارت است از مرجعی که برای انجام محاسبات مربوط به هر مسئله انتخاب می شود و انتخاب درست آن غالباً سبب آسانتر شدن حل مسئله می شود).

**نکته ۱:** مبنای انتخاب شده را باید در شروع حل مسئله ذکر کرد تا همواره اساس واقعی محاسبات مد نظر باشد و هر شخص دیگری نیز که مسئله را مطالعه می کند مبنای آن را به سادگی در یابد.

**نکته ۲:** امکان دارد که نیاز داشته باشیم مبنای مسئله را در میانه راه مسئله عوض کنیم و یا اینکه از مبناهای تو در تو استفاده کنیم در این صورت هم باید مبنای جدید را قید کنیم.

**نکته ۳:** معمولاً اعدادی همچون 1، 100، 1000 که ساده تر هستند را به عنوان مبنا در نظر می گیریم.

**نکته ۴:** در برخی موارد ( معمولاً وقتی که از دبی استفاده می کنیم ) بهتر است مبنا را واحد زمان در نظر بگیریم.

**نکته ۵:** توانایی مناسب در انتخاب مبنای صحیح از طریق ممارست و تمرین حاصل خواهد شد.

مثال: اگر سوختی متشکل از 80٪ متان و 20٪ اتان داشته باشیم، نسبت تعداد اتم های کربن به تعداد اتم های هیدروژن را در این سوخت محاسبه کنید؟

$$\text{آنالیز گاز} \left\{ \begin{array}{l} 80\% \text{ } CH_4 \\ 20\% \text{ } C_2H_6 \end{array} \right.$$

$$\frac{\text{تعداد اتم C}}{\text{تعداد اتم H}} = ?$$

$$\overbrace{80\text{gmole } CH_4 \quad 20\text{gmole } C_2H_6}^{\text{Base: } 100\text{gmole of Mix}}$$

$$80\text{gmole } CH_4 : \quad \overbrace{1\text{gmole } C \quad 4\text{gmole } H}^{\text{Base: } 1\text{gmole of } CH_4}$$

$$\text{تعداد کل گرم مول C} : 1 \times 80 = 80\text{gmole}$$

$$\text{تعداد کل گرم مول H} : 4 \times 80 = 320\text{gmole}$$

$$20\text{gmole } C_2H_6 : \quad \overbrace{2\text{gmole } C \quad 6\text{gmole } H}^{\text{Base: } 1\text{gmole of } C_2H_6}$$

$$\text{تعداد کل گرم مول C} : 2 \times 20 = 40\text{gmole}$$

$$\text{تعداد کل گرم مول H} : 6 \times 20 = 120\text{gmole}$$

$$\text{تعداد کل اتم های C در مخلوط} = 80 + 20 = 120\text{gmole} \times \frac{6.02 \times 10^{23}}{1\text{gmole}}$$

$$\text{تعداد کل اتم های H در مخلوط} = 320 + 120 = 440\text{gmole} \times \frac{6.02 \times 10^{23}}{1\text{gmole}}$$

$$\text{نسبت مول های C به H} = \text{نسبت تعداد اتم C به H} = \frac{120}{440} = \frac{3}{11}$$

مثال : چنانچه یک گاز شامل 30٪ مونوکسید کربن ، 40٪ متان ، 10٪ هیدروژن و 20٪ دی اکسید کربن باشد وزن مولکولی این گاز را محاسبه کنید .

$$\begin{array}{ccc} \text{آنالیز} & \left\{ \begin{array}{l} 30\% \text{ CO} \\ 40\% \text{ CH}_4 \\ 10\% \text{ H}_2 \\ 20\% \text{ CO}_2 \end{array} \right. & \xrightarrow{\text{از ضمایم آخر کتاب همبل بلاو}} \left\{ \begin{array}{l} \text{CO} = 28 \\ \text{CH}_4 = 16 \\ \text{H}_2 = 2 \\ \text{CO}_2 = 44 \end{array} \right. \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Base: } 100 \text{ gmole of Mix} \\ \left\{ \begin{array}{l} 30 \text{ gmole CO} = 30 \times 28 \text{ gr CO} \\ 40 \text{ gmole CH}_4 = 40 \times 16 \text{ gr CH}_4 \\ 10 \text{ gmole H}_2 = 10 \times 2 \text{ gr H}_2 \\ 20 \text{ gmole CO}_2 = 20 \times 44 \text{ gr CO}_2 \end{array} \right. \end{array}$$

$$M = \frac{m}{n} = \frac{30 \times 28 + 40 \times 16 + 10 \times 2 + 20 \times 44}{100} = 23.8 \frac{\text{gr}}{\text{gmole}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{kmole}} \right) \left( \frac{\text{lbm}}{\text{lbmole}} \right)$$

مثال : با فرض اینکه آنالیز داده شده در مثال قبل وزنی باشد مسئله را حل کنید.

راه حل اول :

$$\begin{array}{l} \text{Base: } 100 \text{ gr of Mix} \\ \left\{ \begin{array}{l} 30 \text{ gr CO} = \frac{30}{28} \text{ gmole CO} \\ 40 \text{ gr CH}_4 = \frac{40}{16} \text{ gmole CH}_4 \\ 10 \text{ gr H}_2 = \frac{10}{2} \text{ gmole H}_2 \\ 20 \text{ gr CO}_2 = \frac{20}{44} \text{ gmole CO}_2 \end{array} \right. \end{array}$$

$$M = \frac{m}{n} = \frac{100 \text{ gr}}{\frac{30}{28} + \frac{40}{16} + \frac{10}{2} + \frac{20}{44}} = 11.08 \left( \frac{\text{gr}}{\text{gmole}} \right) \text{ or } \left( \frac{\text{kg}}{\text{kmole}} \right) \text{ or } \left( \frac{\text{lbm}}{\text{lbmole}} \right)$$



راه حل دوم :

تبدیل آنالیز جرمی به مولی و سپس حل مسئله :

$$\text{Base : 100gr of Mix} \left\{ \begin{array}{l} 30\text{gr CO} = \frac{30}{28} \text{ gmole} \\ 40\text{gr CH}_4 = \frac{40}{16} \text{ gmole} \\ 10\text{gr H}_2 = \frac{10}{2} \text{ gmole} \\ 20\text{gr CO}_2 = \frac{20}{44} \text{ gmole} \end{array} \right.$$

$$n_t = \frac{30}{28} + \frac{40}{16} + \frac{10}{2} + \frac{20}{44}$$

$$\text{آنالیز مولی} \left\{ \begin{array}{l} \%CO = \frac{n_{CO}}{n_t} \times 100 = \frac{\frac{30}{28}}{n_t} \times 100 = 11.9\% \\ \%CH_4 = \frac{n_{CH_4}}{n_t} \times 100 = \frac{\frac{40}{16}}{n_t} \times 100 = 27.7\% \\ \%H_2 = \frac{n_{H_2}}{n_t} \times 100 = \frac{\frac{10}{2}}{n_t} \times 100 = 55.4\% \\ \%CO_2 = \frac{n_{CO_2}}{n_t} \times 100 = \frac{\frac{20}{44}}{n_t} \times 100 = 5\% \end{array} \right.$$

گرفتن مبنای دوم برای محاسبه M از آنالیز مولی :

$$\text{Base : 100gmole of Mix} \left\{ \begin{array}{l} 11.9\text{gmole CO} = 11.9 \times 28\text{gr CO} \\ 27.7\text{gmole CH}_4 = 27.7 \times 16\text{gr CH}_4 \\ 55.4\text{gmole H}_2 = 55.4 \times 2\text{gr H}_2 \\ 5\text{gmole CO}_2 = 5 \times 44\text{gr CO}_2 \end{array} \right.$$

$$M = \frac{m}{n} = \frac{11.9 \times 28 + 27.7 \times 16 + 55.4 \times 2 + 5 \times 44}{100} = 11.07$$



مثال : نمونه ای از ذغال سنگ دارای مواد زیر می باشد :

آب	خاکستر	اکسیژن	ازت	گوگرد	ماده
3	11	6	1	2	درصد(جرمی)

باقیمانده شامل کربن و هیدروژن با نسبت اتمی  $\frac{C}{H} = 9$  می باشد. مطلوب است محاسبه در صد مواد موجود در این ذغال سنگ به طور کامل و بدون احتساب آب و خاکستر .

حل :

Base : 100Kg.Coal

$$2 + 1 + 6 + 11 + 3 = 23 \quad \Rightarrow \quad 100 - 23 = 77 \quad (\text{باقیمانده } C_9H)$$

$$m_C + m_H = W$$

Base : 10lbmole.of .C + H

$$\frac{n_H}{n_C} = 9 \Rightarrow n_H = 9n_C \quad \Rightarrow \quad n_H + n_C = 10 \quad \Rightarrow \quad 9n_C + n_C = 10$$

$$n_C = 1 \text{ lbmole} = 12 \text{ Kg} \quad C$$

$$n_H = 9 \text{ kmole} = 9 \text{ Kg} \quad H$$

$$\frac{m_C}{m_H} = \frac{12}{9} \Rightarrow \begin{cases} m_C + m_H = 77 \\ \frac{m_C}{m_H} = \frac{12}{9} \end{cases} \Rightarrow m_C = 44 \text{ Kg}, m_H = 33 \text{ Kg}$$

$$S : \quad 2 \quad \frac{2}{86} \times 100 = 2.32$$

$$N_2 \quad 1 \quad \frac{1}{86} \times 100 = 1.17$$

$$O_2 \quad 6 \quad \frac{6}{86} \times 100 = 7$$

$$H : \quad 33 \quad \frac{33}{86} \times 100 = 38.39$$

$$C : \quad 44 \quad \frac{44}{86} \times 100 = 51.17$$

## دما – Temperature

دما عبارت است از معیاری از انرژی حرارتی مربوط به حرکات اتفاقی مولکول های یک جسم در حالت تعادل حرارتی.

به عبارت دیگر دما احساس بشر است در مورد سرعت حرکت ذرات یک جسم و هر چقدر سرعت حرکت ذرات بیشتر باشد احساس دمای بیشتری را خواهیم کرد.

**نکته ۱:** دما با گرما متفاوت است ، گرما از جنس انرژی است و توانایی انجام کار را دارد در حالیکه دما اینگونه نیست.

**نکته ۲:** انواع دما:  $\left. \begin{array}{l} \text{نسبی } (^{\circ}C, ^{\circ}F) \text{ نسبت به یک سیال خاص} \\ \text{مطلق } (^{\circ}R, K) \text{ نسبت به جنبش ذرات} \end{array} \right\}$

**نکته ۳:** (مهم):

$$\Delta^{\circ}C = 1.8\Delta^{\circ}F$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta^{\circ}C}{1.8\Delta^{\circ}F} = 1 \Leftrightarrow \Delta K = 1.8\Delta^{\circ}R \quad \frac{\Delta K}{1.8\Delta^{\circ}R} = 1$$

$$\left\{ \begin{array}{l} ^{\circ}F = 1.8^{\circ}C + 32 \\ K = 273 + ^{\circ}C \\ ^{\circ}R = 460 + ^{\circ}F \end{array} \right.$$

## فشار – pressure

فشار نوعی تنش است.

انواع تنش عبارتند از:

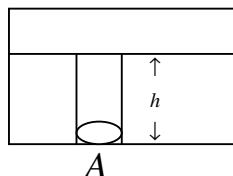
۱- برشی

۲- کششی

۳- فشاری

فشار در سیالات :

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



واحد های فشار :

$$\begin{aligned} \text{فشار اتمسفر استاندارد} &= 76 \text{ cmHg} = 760 \text{ mmHg} = 29.92 \text{ inHg} \\ &= 33.91 \text{ ft } H_2O \\ &= 1 \text{ atm} \\ &= 1.013 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} (\text{Pa}) \\ &= 14.7 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} (\text{psi}) \end{aligned}$$

$$P = \rho \cdot g \cdot h \Rightarrow \frac{\frac{\text{lb}_m}{\text{in}^3} \times \frac{\text{in}}{\text{sec}^2} \times \text{in}}{\frac{\text{lb}_m \cdot \text{in}}{\text{sec}^2} \cdot \text{lbf}} = 14.7 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$$

سوال : 2atm چند psi است ؟

$$2 \text{ atm} \times \frac{14.7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} = (2 \times 14.7) \text{ psi} = 29.4 \text{ psi}$$

**نکته ۱:** فشار ۱ اتمسفر استاندارد عبارت است از فشار هوا در سطح دریا و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد که اعداد آن در فوق داده شده است ، ولی وقتی که صحبت از فشار هوا در حالت کلی می کنیم منظور فشار محیطی است که در آن قرار گرفته که باید توسط دستگاه ها اندازه گیری شود.

**نکته ۲:** چون دستگاه اندازه گیری فشار هوا بارومتر نام دارد لذا اگر بگوییم فشار بارومتر منظورمان همان فشار هوا است.

**نکته ۳:** اگر در مسئله ای فشار هوا لازم باشد ولی داده نشده باشد منظور این است که آن را فشار هوای استاندارد یعنی یک اتمسفر ، یا هر کدام از اعداد دیگری که داده شده در نظر می گیریم.

مثال: اگر فشار هوا در یک لوله مرتفع 40mmHg باشد معادل  $inH_2O$  و Kpa آنرا بدست آورید.

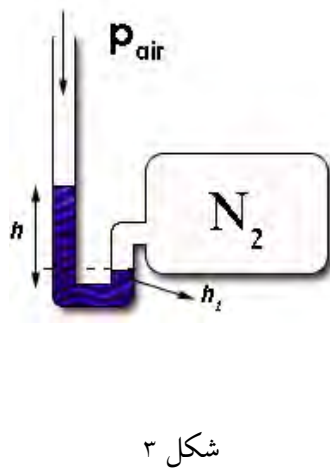
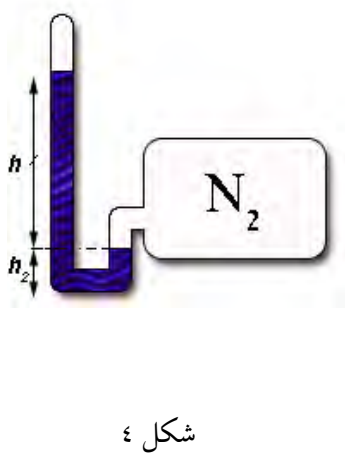
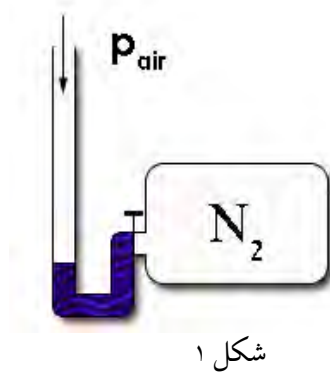
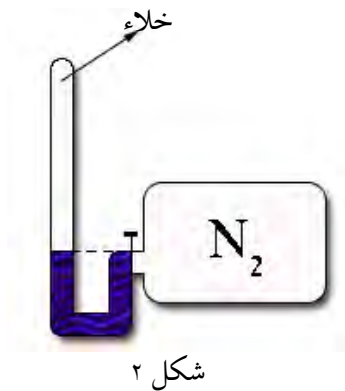
$$\frac{40mmHg}{760mmHg} \left| \frac{33.91ftH_2O}{1ft} \right| \frac{12in}{760} = \frac{40 \times 33.91 \times 12}{760} = 21.42inH_2O$$

$$\frac{40mmHg}{760mmHg} \left| \frac{1.013 \times 10^5 Pa}{100pa} \right| \frac{1Kpa}{10^3 \times 760} = \frac{40 \times 1.013 \times 10^5}{10^3 \times 760} = 5.33Kpa$$

## فشار نسبی (relative)(gage)(Prel) و فشار مطلق (abs)(absolute) :

Pabs: نسبت به خلاء سنجیده می شود.

Prel: نسبت به فشار هوا سنجیده می شود.



در شکل ۳ داریم :

$$P_{N_2}.A + \rho gh_1.A = P_{air}.A + \rho gh.A + \rho gh_1.A$$

$$\Rightarrow P_{N_2} = P_{air} + P_{rel\ N_2} \quad (1)$$

در شکل ۴ داریم :

$$P_{N_2}.h + \rho gh_2.A = \rho gh_2.A + \rho gh'.A$$

$$\Rightarrow P_{N_2} = P_{abs\ N_2} \quad (2)$$

**ارتباط بین فشار مطلق و فشار نسبی :**

$$(1) \text{ و } (2) \Rightarrow P_{abs} = P_{air} + P_{rel}$$

**نکته ۱:** در محاسبات همواره باید فشار مطلق را در نظر بگیریم.

**نکته ۲:** در صورتیکه خلاف آن گفته نشده باشد فشار را همواره مطلق می گوئیم.

**نکته ۳:** مواردی مثل عبارت زیر ما را به این مسئله هدایت می کند که فشار نسبی است:

- در سیستم مهندسی عبارت  $P_{sig}$  نشان دهنده فشار نسبی و  $P_{sia}$  نشان دهنده فشار مطلق است.
- عبارت (بالا تر از فشار جو)، (پایین تر از فشار جو) ، (تحت مکش) ، (فشار خلاء) ، (نسبت به فشار جو) ، همگی نشان دهنده فشار نسبی است.
- از بین عبارات فوق چنانچه (تحت مکش) ، (پایین تر از فشار جو) ، (فشار خلاء) به کار روند نشان دهنده فشار نسبی **منفی** است.

مثال: هوا در يك مجرای تحت مكش معادل با 4cm آب جریان دارد. فشار هوا 730mmHg می باشد فشار مطلق هوای داخل لوله را بر حسب inHg بدست آورید ؟

$$P_{rel} = -4cm_{H_2O}$$

$$P_{air} = 730mmHg$$

$$P_{abs} = ?inHg$$

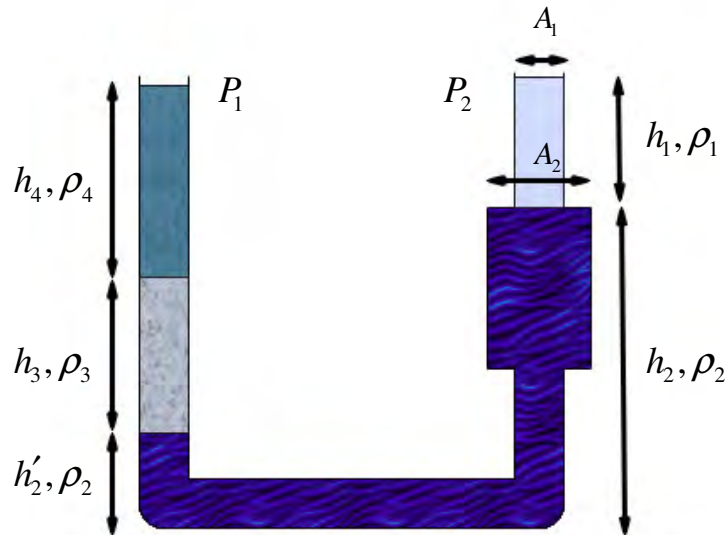
$$P_{abs} = P_{air} + P_{rel}$$

$$P_{abs} = \frac{730mmHg}{10mm} \left| \frac{1cm}{10mm} + \frac{-4cm_{H_2O}}{10mm} \right| \frac{1in}{2.54cm} \left| \frac{1ft}{12in} \right| \frac{29.92inHg}{33.91ft_{H_2O}}$$

$$\Rightarrow P_{abs} = 28.62inHg$$



## برقراری تعادل در لوله های حاوی سیالات



با توجه به شکل فوق داریم :

$$\rho_1 \cdot A_1 + \rho_4 \cdot g \cdot h_4 \cdot A_1 + \rho_3 \cdot g \cdot h_3 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot g \cdot h'_2 \cdot A_1 =$$

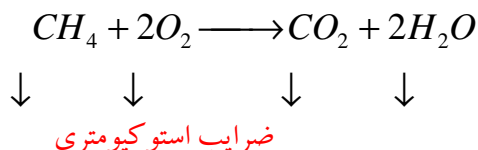
$$P_2 \cdot A_1 + \rho_1 \cdot g \cdot h_1 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot g \cdot h_2 \cdot A_2 + \rho_2 \cdot g \cdot h'_2 \cdot A_1$$

**تذکره ۱:** مثال اریفیس از کتاب هیمبل بلاو در این زمینه مطالعه شود.

**تذکره ۲:** خواص فیزیکی و شیمیایی محلول ها و ترکیبات را باید از کتاب هایی به نام هندبوک استخراج نمود.

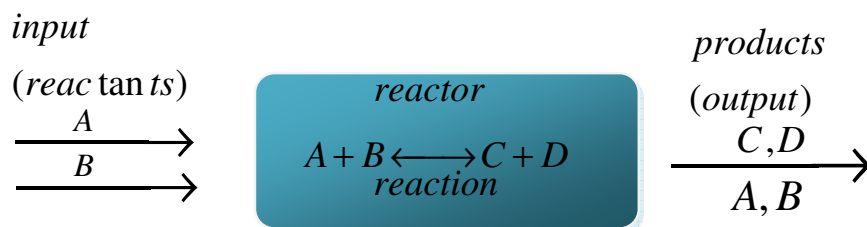
## محاسبات استوکیومتری

همانگونه که می دانیم در نوشتن معادلات شیمیایی باید جهت ارضای قانون بقای ماده یک سری ضرایب را بکاربرد که این ضرایب را ضرایب استوکیومتری می نامیم.



انجام محاسبات گوناگون در حل برخی مسائل با توجه به ضرایب استوکیومتری را محاسبات استوکیومتری می نامند.

**نکته:** چنانچه صحبت خاصی به میان نیاید همواره فرض بر این است که مواد اولیه ( واکنش دهنده ها ) به نسبت استوکیومتری با هم ترکیب شده اند و واکنش هم صددرصد انجام شده و در خروجی ها فقط محصول وجود دارد. اما این یک حالت ایده آل است و عملاً در صنعت اینگونه نیست و یکی از مواد به عنوان محدودکننده و ما بقی اضافه می باشند.



**عامل محدودکننده:** واکنش دهنده ای که زودتر از سایر واکنش دهنده ها مصرف شده و باعث اتمام واکنش می شود.

**عامل اضافه:** واکنش دهنده ای که بیشتر از نسبت استوکیومتری وارد شده و مقداری از آن بدون شرکت در واکنش باقی می ماند.

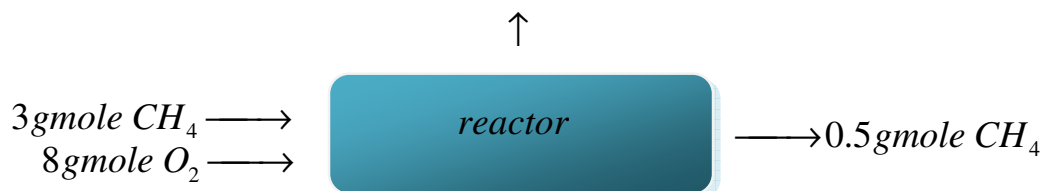
دلیل استفاده از عامل اضافه انجام بهتر واکنش و بالا بردن راندمان آن است.

درصد اضافه به صورت زیر محاسبه می شود :

$$\%Exess = \frac{\text{مقدار اضافه}}{\text{مقداری که برای واکنش کامل با کل محدود کننده لازم است}} \times 100$$

محصولات واکنش

مثال : به شکل زیر توجه کنید :



$$\%Exess = \frac{8-6}{6} \times 100 \cong 33.33\%$$

مقدار اضافه را غالباً از تفاضل مقدار ورودی و مقدار مورد نیاز ( لازم ) برای ترکیب با عامل محدود کننده بدست می آورند.

**تذکر ۱:** مقادیر می توانند بر حسب جرم یا مول یا حجم در رابطه ی فوق بکار روند. (مهم)

**تذکر ۲:** حتی اگر فقط قسمتی از عامل محدود کننده وارد واکنش شود ، مقادیر لازم را بر مبنای مصرف کامل عامل محدود کننده محاسبه می کنیم.

## درجه تکمیل واکنش :

درصدی از عامل محدود کننده که در واکنش شرکت می کند را درجه تکمیل واکنش می گوئیم.

مقداری از عامل محدود کننده که در واکنش شرکت کرده است.

$$\text{درجه تکمیل واکنش} = \frac{\text{مقدار عامل محدود کننده در ورودی}}{\text{مقدار عامل محدود کننده که در واکنش شرکت کرده است}} \times 100$$

در مثال قبل می توان درجه تکمیل واکنش را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\text{درجه تکمیل} = \frac{2.5}{3} \times 100 \cong 83.33\%$$

**تذکر:** در صورتیکه همه ی مواد به نسبت استوکیومتری بکار روند درجه تکمیل نسبت به هر کدام از اجزا که حساب شود در پاسخ تفاوتی نخواهد داشت.

سه تعریف دیگر برای سنجش کمی واکنش ها به کار می روند که عبارتند از :

۱- میزان تبدیل (Conversion)

۲- تولید انتخابی (Selectivity)

۳- بازده (Yield)

## ۱- میزان تبدیل :

عبارت است از جزئی از خوراک یا جزئی از یک ماده موجود در خوراک که به محصول تبدیل می شود. (خوراک مورد نظر و محصول مورد نظر باید دقیقاً مشخص شود).

در مثال داریم :

مول هایی از اکسیژن که در واکنش شرکت کرده اند

$$\text{میزان تبدیل اکسیژن در تبدیل به دی اکسید کربن} = \frac{\text{مول های دی اکسید کربن تولیدی}}{\text{مول هایی از اکسیژن که در واکنش شرکت کرده اند}} \times 100$$

مول های دی اکسید کربن تولیدی

$$\text{میزان تبدیل اکسیژن به دی اکسید کربن} = \frac{2 \text{ gmole } O_2}{1 \text{ gmole } CH_4} \times \frac{2.5 \text{ gmole } CH_4}{1 \text{ gmole } CO_2} \times \frac{2.5 \text{ gmole } CH_4}{1 \text{ gmole } CH_4}$$

## ۲- تولید انتخابی

عبارت است از نسبت تعداد مول های یک محصول معین ( معمولاً محصول مطلوب) به تعداد مول های یک محصول دیگر ( معمولاً محصول نا مطلوب) که در یک دسته واکنش ایجاد می شود.

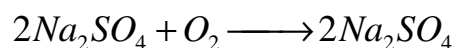
## ۳- بازده

در مورد یک ترکیب شونده و یک محصول عبارت است از جرم یا تعداد مول محصول نهایی تقسیم بر جرم یا تعداد مول ترکیب شونده اولیه ( اگر بیش از یک محصول و ترکیب شونده وجود داشته باشد ترکیب شونده و محصولی که بازده بر اساس آن محاسبه می گردد بایستی کاملاً مشخص باشد).

## تذکر مهم:

باید به خاطر داشت که معادله شیمیایی گویای مکانیزم، سرعت و میزان پیشرفت واکنش نمی باشد. مثلاً یک قطعه ذغال در دمای معمولی تغییری نمی کند ولی در دمای بالا به سرعت می سوزد. معادله شیمیایی فقط مقادیر استوکیومتری لازم برای انجام واکنش و محصول این فعل و انفعال را بدست می دهد.

مثال : خوردگی لوله های دیگ بخار در اثر اکسیژن را می توان با استفاده از سولفیت سدیم کاهش داد ، سولفیت سدیم اکسیژن موجود در ورودی به دیگ بخار را به موجب واکنش زیر حذف می کند:



به لحاظ تئوری چند پوند سولفیت سدیم برای حذف اکسیژن موجود در 8,330,000 پوند آب لازم است . در صورتیکه اکسیژن محلول در آب 10ppm بوده و بخواهیم 35% سولفیت سدیم نیز در

آب داشته باشیم. ( $O_2 : 32$  ,  $Na_2SO_3 : 126$ )

حل :

$$\%Excess = \frac{\text{مقدار مورد نیاز} - \text{مقدار ورودی}}{\text{مقدار مورد نیاز}} = 0.35$$

این مقدار با عدد یک جمع شده و در محاسبات لحاظ می گردد.

چرا؟

زیرا این مقدار عبارت از مقدار ماده ایست که اضافه بر واکنش وارد شده و با مقدار 100% آنچه که مصرف شده جمع می شود.

با طرفین وسطین رابطه فوق به این مفهوم میرسیم :

$$\text{مقدار مورد نیاز} \times 1.35 = \text{مقدار مورد نیاز} + 0.35 \text{ مقدار ورودی}$$

روش اول :

$$m_{Na_2SO_3} = \frac{10 \text{ lbm } O_2}{10^6 \text{ lbm } H_2O} \left| \frac{8,330,000 \text{ lbm } H_2O}{1} \right| \left| \frac{2 \times 126 \text{ lbm } Na_2SO_3}{32 \text{ lbm } O_2} \right| 1.35$$

$$= 885.583 \text{ lbm}$$

روش دوم :

$$m_{Na_2SO_4} = \frac{2 \times 126 \text{ lbm } Na_2SO_4}{32 \text{ lbm } O_2} \left| \frac{10 \text{ lbm } O_2}{10^6 \text{ lbm } H_2O} \right| \left| \frac{8,330,000 \text{ lbm } H_2O}{1} \right| 1.35$$

$$= 885.583 \text{ lbm}$$

مثال : آنالیز یک نوع سنگ آهک به قرار زیر است :

$CaCO_3$	$MgCO_3$	$else(insolubb)$
92.89%	5.4%	1.7%

الف : چند پوند اکسید کلسیم می توان از 5 تن سنگ آهک بدست آورد ؟

ب : چند پوند  $CO_2$  می توان به ازای هر پوند سنگ آهک بدست آورد ؟

ج : چند پوند سنگ آهک برای تولید یک تن آهک لازم است ؟

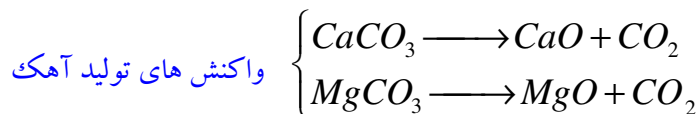
تذکر: در سیستم مهندسی هر تن معادل 2000 پوند است.

$$CaCO_3 = 100$$

$$MgCO_3 = 84$$

$$CaO = 40$$

$$CO_2 = 44$$



حل :

$$\frac{56lbm \ CaO}{100lbm \ CaCO_3} \Big| \frac{92.89lbm \ CaCO_3}{100lbm_{limstone}} \Big| \frac{5 \times 2000lbm_{limstone}}{1} = 5501.8lbm \ CaO$$

الف :

ب : مقدار دی اکسید کربن تولیدی برابر با مجموع دی اکسید کربن تولید شده از 2 واکنش می باشد :

$$CO_2 = \frac{44lbm \ CO_2}{100lbm \ CaCO_3} \Big| \frac{92.89lbm \ CaCO_3}{100lbm_{limstone}} \Big| \frac{1lbm_{limstone}}{1} +$$

$$\frac{44lbm \ CO_2}{84lbm_{MgCO_3}} \Big| \frac{5.4lbm \ MgCO_3}{100lbm_{limstone}} \Big| \frac{1lbm_{stone}}{1} = 0.44lbm$$

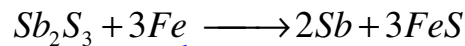
ج :

$$1lbm_{limstone} - 0.44CO_2 = 0.56 \quad \text{آهک}$$

$$\frac{1lbm_{limstone}}{0.56lbm} \Big| \frac{2000lbm}{1} = \frac{2000}{0.56} = 3571lbm$$

سنگ آهک

مثال: فلز آنتیموان در اثر حرارت دادن به گرد نرم سولفور آنتیموان با آهن قراضه تهیه می شود ، واکنش انجام شده به قرار زیر است :



فرض کنید ۶ کیلو گرم سولفور آنتیموان را با ۰٫۲۵ کیلو گرم آهن حرارت داده ۰٫۲ کیلو گرم فلز آنتیموان

بدست آید مطلوب است :

$$Sb_2S_3 : 339.7$$

$$Fe : 55.8$$

$$Sb : 121.8$$

$$FeS : 87.9$$

الف : ترکیب شونده محدود کننده

ب : درصد ترکیب شونده اضافی

ج : درجه تکمیل واکنش

حل :



$$n_{Sb_2S_3} = \frac{m_{Sb_2S_3}}{M_{Sb_2S_3}} = \frac{600 \text{ gr}}{339.7} = \frac{1.76 \text{ gmole}}{1} = 1.76 \text{ gmole} \quad \text{الف :}$$

$$n_{Fe} = \frac{m_{Fe}}{M_{Fe}} = \frac{250 \text{ gr}}{55.8} = \frac{4.48 \text{ gmole}}{3} = 1.49 \text{ gmole}$$

پس آهن عامل محدود کننده است.

ب:

$$\%Exess = \frac{Sb_2S_3 \text{ مقدار ورودی} - Sb_2S_3 \text{ مقدار مورد نیاز}}{Sb_2S_3 \text{ مقدار مورد نیاز}} \times 100$$

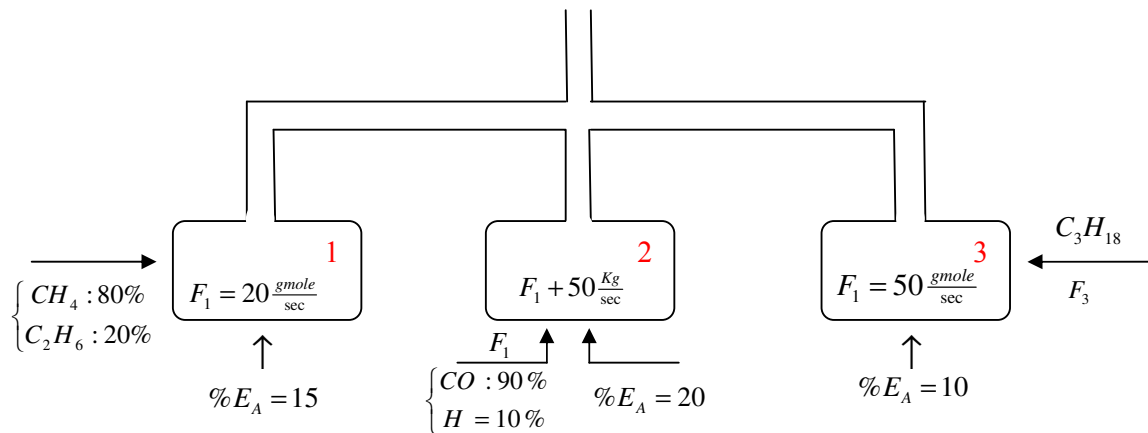
$$\Rightarrow \%Exess = \frac{600 \text{ gr} - \frac{339.7 \text{ gr } Sb_2S_3}{3 \times 55.8} \times \frac{250 \text{ gr } Fe}{3 \times 55.8}}{\frac{339.73}{3 \times 55.8} \times 250} \times 100 = 18\%$$



ج: مقداری از عامل محدود کننده که در واکنش شرکت کرده است.  
 درجه تکمیل واکنش =  $\frac{\text{مقدار عامل محدود کننده در ورودی}}{\text{مقدار عامل محدود کننده که در واکنش شرکت کرده است.}}$

$$\Rightarrow \frac{\frac{3 \times 55.8 \text{ gr Fe}}{2 \times 121.8 \text{ gr Sb}} \times 200 \text{ gr Sb}}{250 \text{ gr}} \times 100 = 54.9\%$$

**تمرین:** در شکل زیر آنالیز گازهای حاصل از احتراق خروجی از دودکش را حساب کنید.



درجه تکمیل واکنش در محفظه ی سوم 80٪ می باشد.



فصل دوم :

# موازنه ماده

### مفهوم موازنه ماده :

مفهوم موازنه ماده چیزی نیست جز به کار بستن قانون بقای جرم.

### قانون بقای جرم :

مجموع کل جرم موجود در جهان مقداری است ثابت.

### سیستم :

حجمی از فضا که مطالعاتمان را روی آن متمرکز می کنیم را سیستم می نامیم.

### محیط :

هر آنچه در جهان به جز سیستم را محیط می نامیم.

### مرز سیستم:

خطوطی فرضی که سیستم را از محیط جدا کرده است .

انواع سیستم

باز : سیستمی که جرم مرز آن را قطع می کند.	{	انواع سیستم
بسته : سیستمی که جرم مرز آن را قطع نمی کند.		

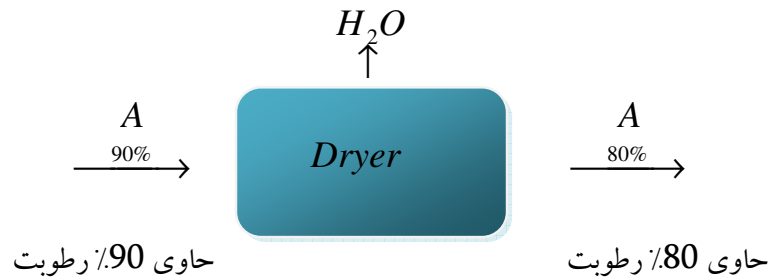
سیستم پایدار: سیستمی که متغیرهای آن با گذشت زمان ثابت بماند.

سیستم نا پایدار : سیستمی که متغیرهای آن با گذشت زمان تغییر کند.

بدون واکنش

{	دسته بندی کلی مطالعات موازنه ماده :

## بررسی سیستم های بدون واکنش به شکل زیر توجه کنید :



موازنه حول سیستم برای ماده A :

$$m_{A \text{ in}} - m_{A \text{ out}} = m_{\text{accumulation}}$$

برای مول هم می توان روابط را نوشت :

$$n_{A \text{ in}} - n_{A \text{ out}} = n_{A \text{ acc}}$$

تذکر : اگر سیستم پایدار باشد  $m_{\text{accumulation}} = 0$  و  $n_{A \text{ acc}} = 0$  خواهد بود.

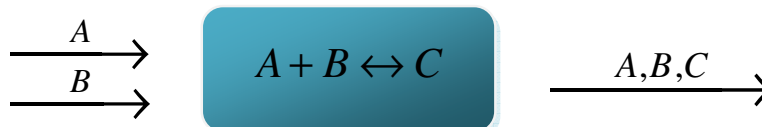
موازنه حول سیستم برای  $H_2O$  :

$$m_{H_2O \text{ in}} - m_{H_2O} = m_{H_2O \text{ acc}}$$

همچنین برای مول آب داریم :

$$n_{H_2O \text{ in}} - n_{H_2O} = n_{H_2O \text{ acc}}$$

## بررسی سیستم های همراه با واکنش



موازنه حول سیستم برای ماده A :

$$m_{A \text{ in}} - m_{A \text{ out}} + m_{A \text{ generation}} - m_{A \text{ consumption}} = m_{A \text{ acc}}$$

تذکر: منظور از  $m_{A \text{ generation}}$  جرم A تولیدی و منظور از  $m_{A \text{ consumption}}$  جرم A مصرفی می باشد.  
 بطور کلی می توان نوشت:

$$in - out + gen - cons = acc$$

برای مواد B و C نیز به همین ترتیب عمل می کنیم.

تذکر: در سیستم پایدار همواره  $acc=0$  است. در این درس تا خلاف آن گفته نشود سیستم را پایدار (steady state) فرض می کنیم.

مثال: چنانچه در شکل زیر  $NaOH$  از طریق دو خط لوله که دو نوع محلول متفاوت را وارد می کنند وارد مخلوط کننده شوند جرم  $NaOH$  و  $H_2O$  خروجی را محاسبه کنید.



حل:

موازنه حول سیستم برای ماده  $NaOH$ :

$$m_{NaOH \text{ in}} - m_{NaOH \text{ out}} + \cancel{m_{NaOH \text{ gen}}} - \cancel{m_{NaOH \text{ cons}}} = 0$$

$$m_{NaOH \text{ out}} = m_{NaOH \text{ in}} = 10 \times 0.8 + 15 \times 0.3 = 12.5 \text{ kg}$$

موازنه حول سیستم برای ماده  $H_2O$ :

$$m_{H_2O \text{ in}} - m_{H_2O \text{ out}} + m_{H_2O \text{ gen}} - m_{H_2O \text{ cons}} = 0$$

$$m_{H_2O \text{ out}} = m_{H_2O \text{ in}} = 10 \times 0.2 + 15 \times 0.7 = 12.5 \text{ kg}$$

## انواع فرآیندهای شیمیایی در صنعت :

**پیوسته:** مواد اولیه دائماً وارد شده و محصولات هم دائماً خارج می شوند. در این نوع از فرایند مواد

ورودی و خروجی به صورت دبی بیان می شوند

**ناپیوسته:** مواد اولیه را وارد می کنیم و صبر می کنیم تا محصول تولید شود. سپس باقیمانده ها را از

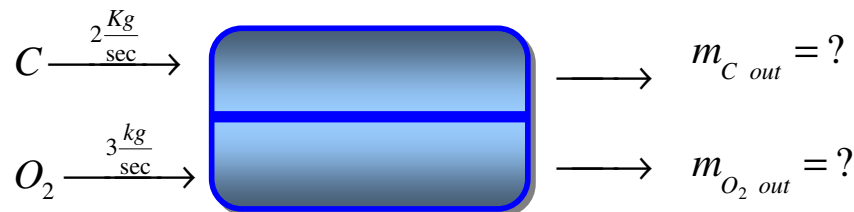
سیستم خارج می کنیم.

**نیمه پیوسته:** مواد ضمن انجام فرآیند وارد می شوند اما از سیستم خارج نمی شوند بنابراین جرم در

سیستم تجمع می کند و محصول وقتی خارج می شود که فرآیند تمام شده باشد.

## به سلسله مثال های زیر توجه کنید :

**مثال ۱:** در شکل زیر جرم کربن و اکسیژن و جرم کل خروجی را پیدا کنید.



**حل :**

موازنه حول سیستم برای ماده C :

$$\dot{m}_{C \text{ in}} - \dot{m}_{C \text{ out}} + \dot{m}_{C \text{ (gen-cons)}} = 0$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{C \text{ out}} = \dot{m}_{C \text{ in}} = 2 \frac{\text{Kg}}{\text{sec}}$$

به همین صورت برای اکسیژن داریم :

$$\dot{m}_{O_2 \text{ out}} = 3 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

موازنه جرم کلی :

$$\dot{m}_{\text{total in}} - \dot{m}_{\text{total out}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_{\text{total out}} = 3 + 2 = 5 \frac{\text{Kg}}{\text{sec}}$$

**مثال ۲:** در شکل مثال (1) مول های خروجی کربن و اکسیژن و نیز تعداد مول کل خروجی را پیدا کنید.

**حل:**

موازنه حول سیستم برای مول های کربن :

$$\dot{n}_{C \text{ in}} - \dot{n}_{C \text{ out}} + \dot{n}_{C \text{ gen}} - \dot{n}_{C \text{ cons}} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{2000}{12} - \dot{n}_{C \text{ out}} = 0 \quad \Rightarrow \dot{n}_{C \text{ out}} = 166.67 \frac{\text{gmole}}{\text{sec}}$$

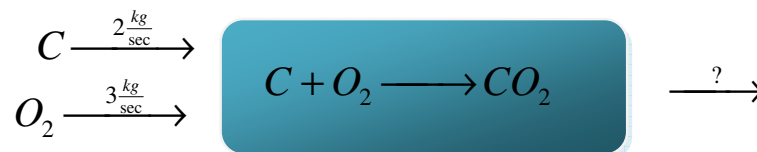
موازنه حول سیستم برای مول های اکسیژن نیز به همین صورت خواهد بود :

$$\dot{n}_{O_2 \text{ out}} = \dot{n}_{O_2 \text{ in}} = \frac{3000}{32} = 93.75 \frac{\text{gmole}}{\text{sec}}$$

کل مول های خروجی به صورت زیر محاسبه می گردد :

$$\dot{n}_{\text{total in}} = \dot{n}_{\text{total out}} = 166.67 + 93.75 = 260.42 \frac{\text{gmole}}{\text{sec}}$$

**مثال ۳:** در شکل زیر جرم خروجی (بر حسب کیلوگرم) را برای اجزاء و نیز برای کل مواد خروجی حساب کنید.



**حل :**

وقتی واکنش شیمیایی انجام می شود ابتدا باید واکنش به لحاظ کمی شناسایی شود.

$$n_C = \frac{2000}{12} = 166.67 \Rightarrow \frac{166.67}{1} = 166.67$$

$$n_{O_2} = \frac{3000}{32} = 93.75 \Rightarrow \frac{93.75}{1} = 93.75$$

پس ماده محدود کننده اکسیژن خواهد بود.

$$C_{cons} = 3000 \text{ gr } O_2 \times \frac{1 \text{ gmole } O_2}{16 \text{ gr } O_2} \left| \frac{1 \text{ gmole } C}{1 \text{ gmole } O_2} \right| \frac{12 \text{ gr } C}{1 \text{ gmole } C} = 1125 \text{ gr}$$

$$CO_{2 \text{ gen}} = 3000 \text{ gr } O_2 \times \frac{1 \text{ gmole } O_2}{16 \text{ gr } O_2} \left| \frac{1 \text{ gmole } CO_2}{1 \text{ gmole } O_2} \right| \frac{44 \text{ gr } C}{1 \text{ gmole } C} = 4125 \text{ gr}$$

موازنه حول سیستم برای ماده کربن :

$$n_{O_2} = \frac{3000}{32} = 93.75 \Rightarrow \frac{93.75}{1} = 93.75$$

موازنه حول سیستم برای ماده اکسیژن :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{O_2 in} - \dot{m}_{O_2 out} + \dot{m}_{O_2 gen} - \dot{m}_{O_2 cons} &= 0 \\ \Rightarrow 3 - \dot{m}_{O_2 out} + 0 - 3 &= 0 \Rightarrow \dot{m}_{O_2 out} = 0 \frac{Kg}{sec} \end{aligned}$$

موازنه حول سیستم برای ماده دی اکسید کربن :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{CO_2 in} - \dot{m}_{CO_2 out} + \dot{m}_{CO_2 gen} - \dot{m}_{CO_2 cons} &= 0 \\ \Rightarrow 0 - \dot{m}_{CO_2 out} + 4.125 - 0 &= 0 \Rightarrow \dot{m}_{CO_2 out} = 4.125 \frac{Kg}{sec} \end{aligned}$$



**مثال ۴:** در مثال (3) تعداد مول های مواد ورودی و خروجی اجزاء و کل را در ورودی و خروجی محاسبه کنید.

**حل:**

	<i>gmole in</i>	<i>gmole out</i>
$C$ :	166.67	$\frac{785}{12} = 72.91$
$O_2$ :	93.75	0
$CO_2$ :	0	$\frac{4125}{44} = 93.75$
<i>total</i> :	260.42	166.67

**مثال ۵:** در مثال (3) تعداد مول های عناصر ورودی و خروجی کل را محاسبه کنید.

	<i>gmole in</i>	<i>gmole out</i>
$C$ :	166.67	$\frac{785}{12} + \frac{4125}{44} = 166.67$
$O$ :	$93.75 \times 2 = 187.5$	$2 \times \frac{4125}{44} = 187.5$
<i>total</i> :	354.17	354.17

**نتایج مثال های فوق عبارتند از:**

- ۱- در مواردی که واکنشی اتفاق نیفتد هم جرم و هم مول های مواد در جزء و کل هم در ورودی و هم در خروجی برابرند.
- ۲- در مواردی که واکنش شیمیایی اتفاق می افتد باز هم جرم کل ورودی با جرم کل خروجی مساوی است ولی مواد در ورودی و خروجی نه مول و نه جرم مساوی ندارند.
- ۳- چنانچه موازنه روی عناصر بسته شود حتی در مواردی که واکنش شیمیایی هم انجام شود تعداد مول عناصر ورودی و خروجی و نیز تعداد کل مول های ورودی با تعداد کل مول های خروجی یکی خواهد بود.

مثال: اگر ۳۰۰ پوند هوا و ۲۴ پوند کربن را در دمای ۶۰۰ درجه فارنهایت در راکتوری قرار دهیم و پس از احتراق کامل هیچ ماده ای در راکتور باقی نماند:

الف: چند پوند اکسیژن و چند پوند کربن خارج شده است؟

ب: چند مول کربن و چند مول اکسیژن وارد شده و چند مول از راکتور خارج شده است؟

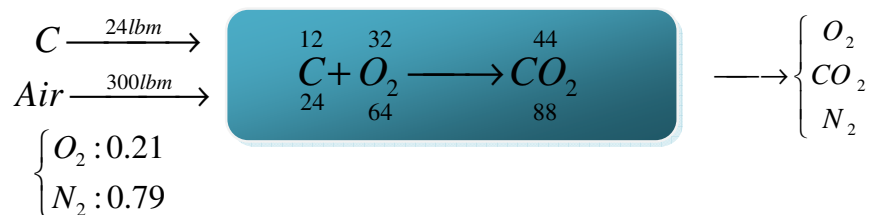
ج: کل مول های ورودی و خروجی چه بوده است؟

$$n_C = \frac{24}{12} = 2 \Rightarrow \frac{2}{1} = 2$$

حل:

$$n_{O_2} = \frac{300}{29} \times 0.21 = 2.17 \Rightarrow \frac{2.17}{1} = 2.17$$

پس کربن عامل محدود کننده است.



چون درجه تکمیل واکنش داده نشده پس فرض بر این است که همه ی کربن ورودی مصرف می گردد.

الف:

موازنه حول سیستم برای ماده کربن:

$$m_{C \text{ in}} - m_{C \text{ out}} + m_{C \text{ gen}} - m_{C \text{ cons}} = 0$$

$$24 - m_{Cout} + 0 - 24 = 0 \Rightarrow m_{C \text{ out}} = 0$$

موازنه حول سیستم برای ماده اکسیژن:

$$m_{O_2 \text{ in}} - m_{O_2 \text{ out}} + m_{O_2 \text{ gen}} - m_{O_2 \text{ cons}} = 0$$

$$\frac{300}{29} \times 0.21 \times 32 - m_{O_2 \text{ out}} + 0 - 64 = 0 \Rightarrow m_{O_2 \text{ out}} = 5.52lbm$$

موازنه حول سیستم برای کل :

$$m_{total} = m_{O_2out} + m_{CO_2out} + m_{N_2out} =$$

$$5.52 + 88 + \frac{300}{29} \times 0.79 \times 28 = 322.35 lbm$$

عدد دقیق ۳۲۴ است (مساوی با جرم ورودی )

علت بدست نیامدن دقیق ۳۲۴ :

۱- خطای ناشی از گرد کردن

۲- عدم لحاظ اعداد جرم مولکولی دقیق

ب :

$$n_{C\ in} = \frac{m_{C\ in}}{M_C} = \frac{24}{12} = 2 lbmole$$

$$n_{O_2in} = \frac{m_{O_2in}}{M_{O_2}} = \frac{\frac{300}{29} \times 0.21 \times 32}{32} = 2.17 lbmole$$

$$n_{C\ out} = \frac{m_{C\ out}}{M_C} = \frac{0}{12} = 0$$

$$n_{O_2out} = \frac{m_{O_2out}}{M_{O_2}} = \frac{5.52}{32} = 0.17 lbmole$$

ج :

$$n_{total\ in} = n_{C\ in} + n_{air\ in} = \frac{24}{12} + \frac{300}{29} = 12.34 lbm$$

$$n_{total\ out} = n_{O_2out} + n_{CO_2out} + n_{N_2out} = \frac{m_{O_2out}}{M_{O_2}} + \frac{m_{CO_2out}}{M_{CO_2}} + \frac{m_{N_2out}}{M_{N_2}}$$

$$\Rightarrow n_{total\ out} = \frac{5.52}{32} + \frac{88}{44} + \frac{\frac{300}{29} \times 0.79 \times 28}{28} = 10.34 lbmole$$

### برنامه ریزی برای تجزیه تحلیل مسائل موازنه مواد:

**نکته ۱:** چنانچه سیستمی ناپیوسته باشد باز هم می توان با رسم جریان های فرضی مسائل موازنه مواد را همانند سیستم های پیوسته حل کرد.

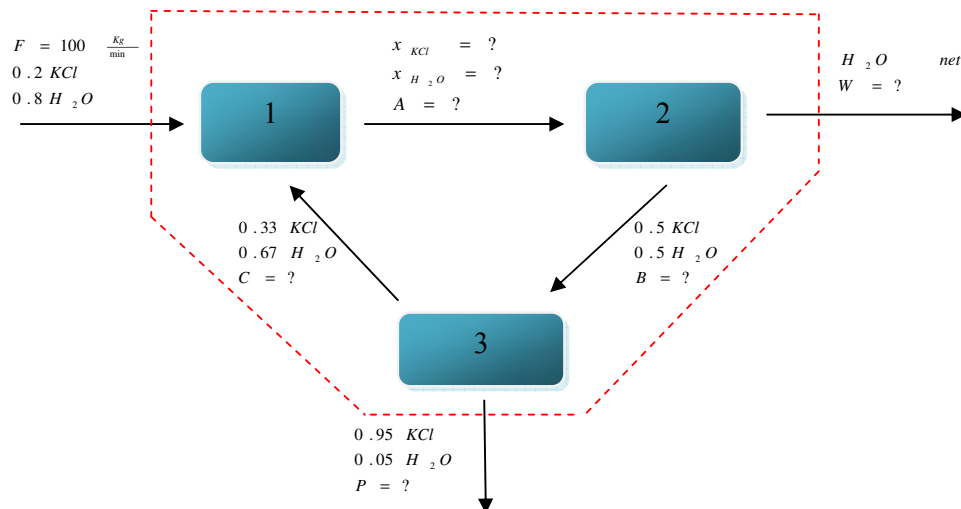
**نکته ۲:** دربرقراری موازنه مواد که به فراخور مسئله حول سیستم یا برای جزیی از سیستم به صورت مولی یا جرمی یا عنصری موازنه نوشته می شود و امکان دارد دستگاه های  $n$  معادله،  $n$  مجهول ظاهر شود که در صورتیکه تعداد مجهولات و معادلات مستقل یکی باشد دستگاه قابل حل است ولی اگر تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معادلات باشد مسئله غیر قابل حل است و بالاخره چنانچه تعداد معادلات بیشتر از تعداد مجهولات باشد از نظر ریاضی دستگاه بی شمار جواب دارد ولی در حل مسائل موازنه مواد ما آن دسته از معادلاتی را که به نظر خودمان دقت بالاتری دارند انتخاب نموده و دستگاه را حل می کنیم و مابقی معادلات اضافه را کنار می گذاریم.

صفحات ۱۳۲ تا ۱۴۰ کتاب دیوید هیمبل بلاو در این زمینه به دقت مطالعه گردد.

**نکته ۳:** در صورتیکه خلاف موضوع گفته نشود فرآیند مورد مطالعه را پایدار (steady state) در نظر می گیریم حتی اگر تحول بصورت ناپیوسته نیز باشد (جریان ورودی و خروجی نداشته باشیم) باز هم می توان فرض نمود که مواد اولیه وارد سیستم شده اند و از طریق دیگر آن نیز خارج شده اند. (منظور این است که روند محاسبات در حالت پایدار چه سیستم باز و چه پیوسته تفاوتی ندارد.)

### سیستم های شامل زیر سیستم

در برخی موارد برای حل مجهولات و به دست آوردن آنها لازم است یک سیستم بزرگتر را به زیر سیستم های کوچکتری تقسیم کنیم و معادلات موازنه ماده را برای آنها بطور مستقل برقرار کنیم. مثال زیر را در نظر بگیرید :



چنانچه بخواهیم فقط برای کل سیستم موازنه برقرار کنیم بدلیل اینکه دارای دو ماده هستیم فقط خواهیم توانست دو معادله مستقل بنویسیم در حالیکه مسئله هفت مجهول دارد. لذا مجبوریم برای بدست آوردن معادلات بیشتر از برقراری موازنه ماده حول زیر سیستم های شماره 1 و 2 و 3 نیز استفاده کنیم و از بین آنها هفت معادله را انتخاب و مسئله را حل کنیم مثلاً می توان دستگاه زیر را برقرار نمود:

$$100 + C = A$$

موازنه جرم حول سیستم 1 :

$$0.2 \times 100 + 0.33 \times C = x_{KCl} \times A$$

موازنه KCl حول سیستم 1 :

$$A + (W + B) = 0$$

موازنه جرم حول سیستم 2 :

$$x_{KCl} \cdot A - (0.5B + 0) = 0$$

موازنه KCl حول سیستم 2 :

$$F - (P + W) = 0$$

موازنه جرم حول کل سیستم :

$$0.8F = W + 0.05P$$

موازنه حول کل سیستم برای آب :

$$x_{KCl} + x_{H_2O} = 1$$

برای بدست آوردن معادله هفتم می توان نوشت :

### مسائل موازنه مواد با حل مستقیم :

به مسائلی گفته می شود که در آنها موازنه های مواد با یکدیگر ممزوج نیستند و بدون نیاز به روش های جبری قابل حل هستند.

بدلیل اهمیت فرآیند احتراق و کاربرد زیاد آن در صنعت ابتدا به ذکر برخی تعاریف در این زمینه می پردازیم :

**گاز دودکش ( stack gas ) :** تمام گازهای حاصل از احتراق با در نظر گرفتن بخار آب موجود در آنها را می گویند.

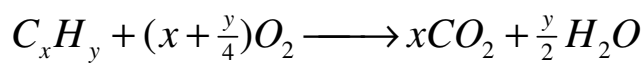
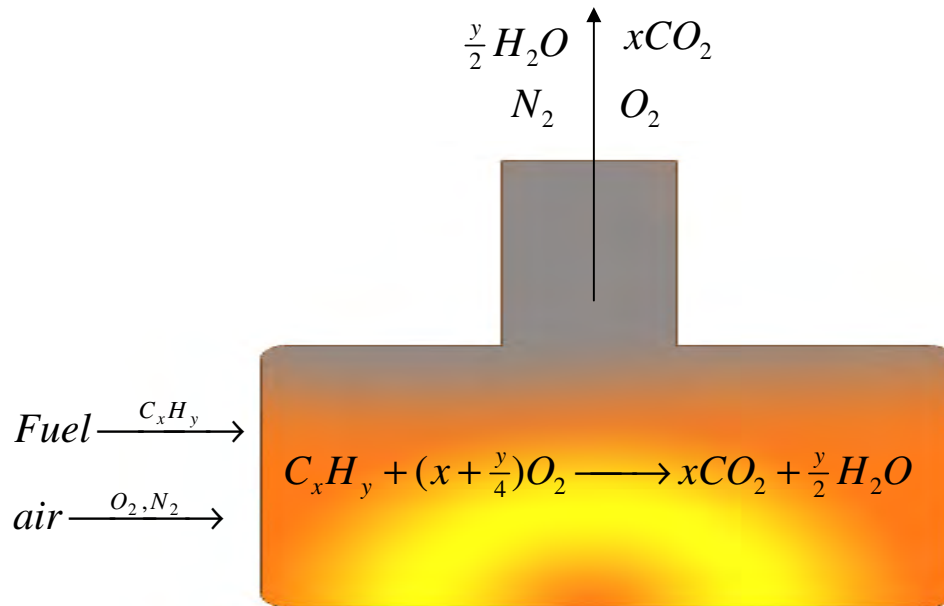
**آنالیز اورسات ( orsat ) :** آنالیز گازهای حاصل از احتراق بدون در نظر گرفتن آب آنها.

**هوای تئوری :** مقداری از هوا که برای احتراق کامل بایستی وارد فرآیند شود ( هوای مورد نیاز هم نامیده می شود )

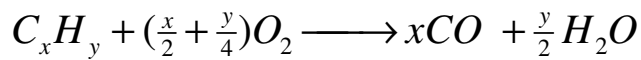
**هوای اضافه ( اکسیژن اضافی ) :** مقدار هوا ( اکسیژن ) مازاد بر آنچه جهت احتراق کامل مورد نیاز است

**نکته :** حتی اگر عمل احتراق به طور ناقص انجام شود مبنای محاسبات هوای اضافه بر حسب کامل خواهد بود.

در شکل زیر واکنش کلی احتراق دیده می شود:

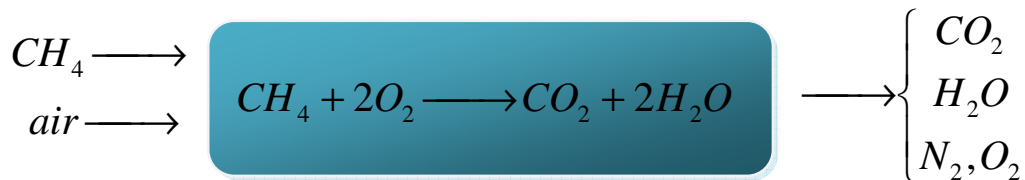


واکنش احتراق کامل :



واکنش احتراق ناقص :

مثال : اگر متان را با ۱۳٪ هوای اضافی بسوزانیم ، آنالیز گازهای حاصل از احتراق را بدست آورید ؟



Base : 1 gmole of  $CH_4$

موازنه ماده حول سیستم برای مول های دی اکسید کربن :

$$n_{CO_2 in} - n_{CO_2 out} + n_{CO_2 gen} - n_{CO_2 cons} = 0$$

$$\Rightarrow 0 - n_{CO_2 out} + n_{CO_2 gen} = 0 \Rightarrow n_{CO_2 out} = n_{CO_2 gen} = 1 \text{ gmole}$$

موازنه ماده حول سیستم برای مول های آب :

$$n_{H_2O in} - n_{H_2O out} + n_{H_2O gen} - n_{H_2O cons} = 0$$

$$\Rightarrow 0 - n_{H_2O out} + n_{H_2O gen} = 0 \Rightarrow n_{H_2O out} = n_{H_2O gen} = 2 \text{ gmole}$$

موازنه ماده حول سیستم برای مول های نیتروژن :

$$n_{N_2 in} - n_{N_2 out} + n_{N_2 gen} - n_{N_2 cons} = 0$$

$$\Rightarrow n_{N_2 out} = n_{N_2 in} = \frac{79}{21} \times n_{N_2 in} = \frac{79}{21} \times (2 \times 2.3) = 17.3 \text{ gmole}$$

شاید این سوال مطرح شود که چگونه مول ورودی نیتروژن محاسبه می گردد :

پاسخ:

با توجه به این که ۱۳٪ هوای اضافی وارد سیستم می شود، مول مورد نیاز اکسیژن را در عدد ۲/۳ ضرب کرده تا مقدار اکسیژن ورودی و به تبع آن مقدار نیتروژن ورودی محاسبه گردد. با توجه به اینکه ضریب استوکیومتری اکسیژن در واکنش ۲ است و نیز درصد نیتروژن به اکسیژن هوا ۷۹ به ۲۱ می باشد پس مول ورودی نیتروژن به طریق فوق محاسبه می گردد. در واقع عدد ۴/۶ مقدار مول ورودی اکسیژن است که وقتی در عدد  $\frac{79}{21}$  ضرب شود مقدار نیتروژن ورودی را به ما می دهد.

موازنه ماده حول سیستم برای مول های اکسیژن :

$$n_{O_2 in} - n_{O_2 out} + n_{O_2 gen} - n_{O_2 cons} = 0$$

$$\Rightarrow 2 \times 2.3 - n_{O_2 out} + 0 - 2 = 0 \Rightarrow n_{O_2 out} = 2 \times 2.3 - 2 = 2.6 \text{ gmole}$$

$$\text{آنالیز} \left\{ \begin{array}{l} \%CO_2 = \frac{1}{1+2+17.3+2.6} \\ \%H_2O = \frac{2}{1+2+17.3+2.6} \\ \%N_2 = \frac{17.3}{1+2+17.3+2.6} \\ \%O_2 = \frac{2.6}{1+2+17.3+2.6} \end{array} \right.$$



مثال: در مخزنی ۱۰۰۰۰ کیلوگرم محلول اشباع  $NaHCO_3$  در ۶۰ درجه فارنهایت وجود دارد می خواهیم ۵۰۰ کیلوگرم  $NaHCO_3$  متبلور را از محلول تهیه کنیم. محلول را تا چه دمایی باید سرد کنیم تا این اتفاق بیفتد؟

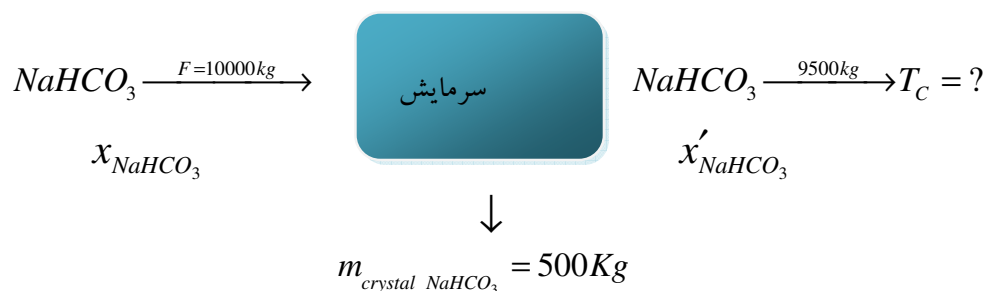
دما °C	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰
حلالیت $NaHCO_3$	۱۶/۴	۱۴/۴۵	۱۱/۷	۱۱/۱	۹/۶	۸/۱۵

حلالیت در جدول فوق بر حسب  $\frac{gr}{100grH_2O}$  می باشد

حل:

$$m_{NaHCO_3} = 10000Kg \text{ at } 60^\circ F$$

$$m_{NaHCO_3} = 500Kg \Rightarrow T_C = ?$$



موازنه حول سیستم برای ماده  $NaHCO_3$ :

$$m_{NaHCO_3 in} - m_{NaHCO_3 out} = 0$$

$$\Rightarrow m_{NaHCO_3 in} = m_{NaHCO_3 out}$$

$$\Rightarrow 10000x_{NaHCO_3} = 500 + (10000 - 500)x'_{NaHCO_3}$$

Base: 100gr of  $H_2O$

$$\text{جرم کل محلول اشباع در } 60 \text{ درجه فارنهایت} = 100 + 16.4 = 116.4 \text{ gr}$$

$$x = \frac{m_{NaHCO_3}}{m_t} = \frac{16.4}{116.4}$$

$$\Rightarrow 10000 \times \frac{16.4}{116.4} = 500 + 9500 \times_{NaHCO_3} \Rightarrow x'_{NaHCO_3} = 0.096$$

Base: 1gr of output's

$$\begin{cases} 0.096 \text{ gr } NaHCO_3 \Rightarrow C = ? \\ (100 - 0.096) \text{ gr } H_2O \end{cases}$$

$$C = \frac{100 \times 0.096}{1 - 0.096} = 10.62 \frac{\text{gr}_{NaHCO_3}}{100 \text{ gr } H_2O}$$

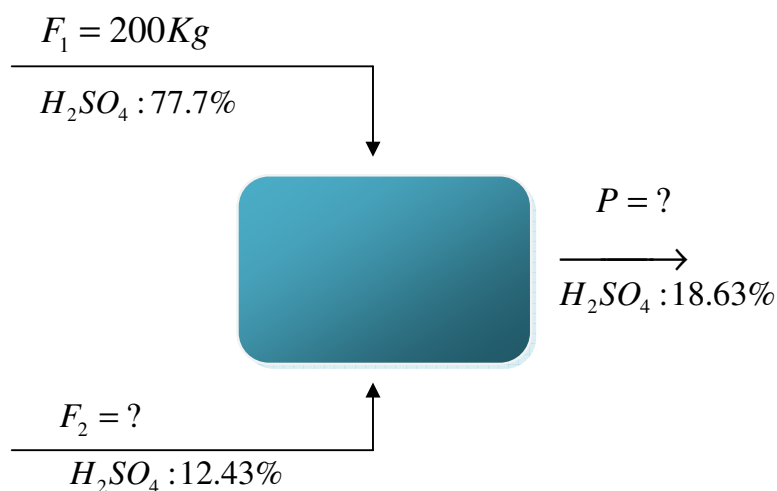
با درونیابی خواهیم داشت :

$$\begin{cases} (11.1, 30) \\ (9.6, 20) \end{cases} \Rightarrow (10.62, ?) \Rightarrow T_c = 26.8^\circ C$$

## موازنه مواد با استفاده از روش های جبری

در صورتیکه مجهولات مسئله وابسته به یکدیگر باشند و معادلات مشترک داشته باشند مسائل مربوطه را مسائل با روش جبری می نامند . چنانچه دستگاه معادلات بدست آمده تمام معادلاتش خطی باشند به راحتی قابل حل است ولی اگر روابط غیر خطی باشند معمولاً می بایست روش های ترسیمی و کامپیوتری به کار رود.

مثال : اگر مقدار ۲۰۰ کیلوگرم اسیدسولفوریک ۷۷/۷٪ به مقدار نامعینی از همان اسید با غلظت ۱۲/۴۳٪ اضافه شود و بخواهیم محلول ۱۸/۶۳٪ تولید کنیم مقدار اسید ۱۲/۴۳٪ و ۱۸/۶۳٪ را مشخص کنید



موازنه جرم کل حول سیستم :

$$m_{in} = m_{out}$$

$$F_1 + F_2 = P \Rightarrow P - F_2 = 200$$

موازنه ماده حول سیستم برای سولفوریک اسید :

$$m_{H_2SO_4 \text{ in}} - m_{H_2SO_4 \text{ out}} = 0$$

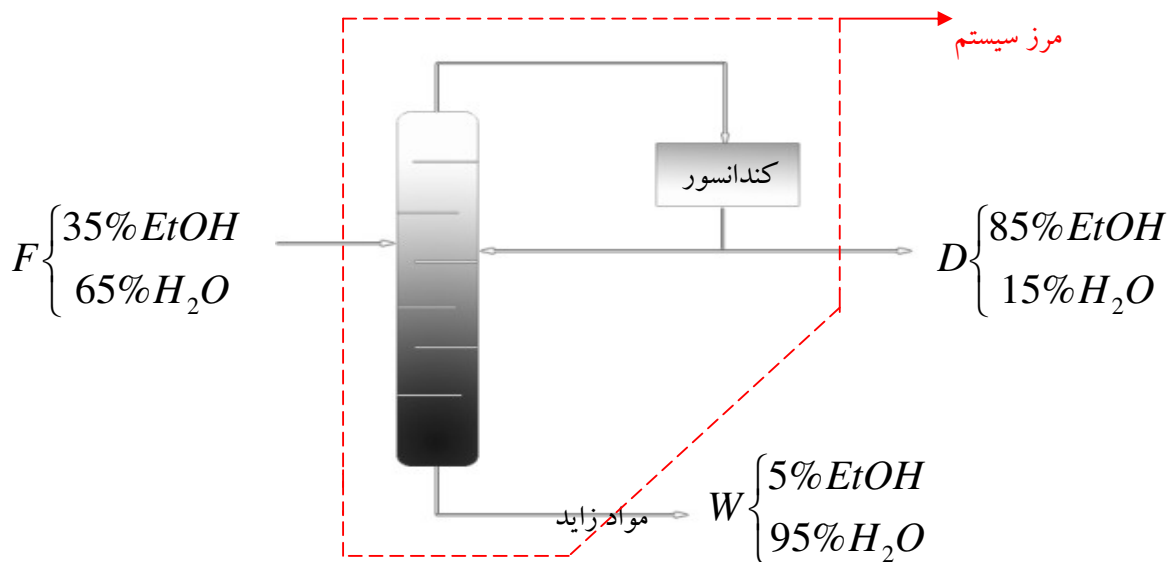
$$(200 \times 0.777 + 0.1243F_2) - 0.1863P = 0$$

$$0.1863P - 0.243F_2 = 200 \times 0.777$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P - F_2 = 200 \\ 0.1863P - 0.1243F_2 = 200 \times 0.777 \end{cases}$$

معادلات فوق باید حل شود

مثال : در شکل زیر یک نمونه از برج تقطیر همراه با اطلاعات لازم داده شده است . مطلوب است جرم محلول مقطر بر حسب کیلوگرم به ازای هر کیلوگرم از خوراک ورودی .



حل :

موازنه جرم کلی حول سیستم :

$$m_{in} = m_{out}$$

$$F = W + D \Rightarrow W + D = 1 \quad (I)$$

موازنه ماده حول سیستم برای اتانول :

$$m_{inEtOH} - m_{outEtOH} = 0$$

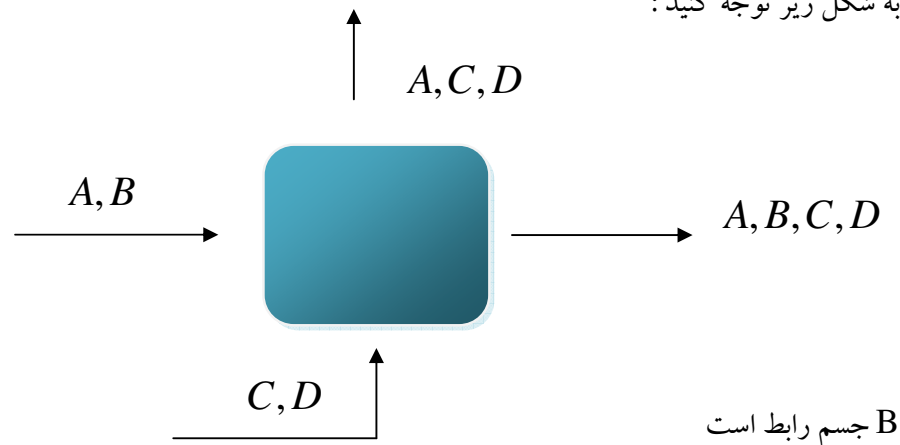
$$0.35F - (0.85D + 0.05W) = 0 \quad (II)$$

$$I, II \Rightarrow \begin{cases} W + D = 1 \\ 0.05W + 0.85D = 0.35 \end{cases} \Rightarrow W = 0.625Kg, D = 0.375Kg$$

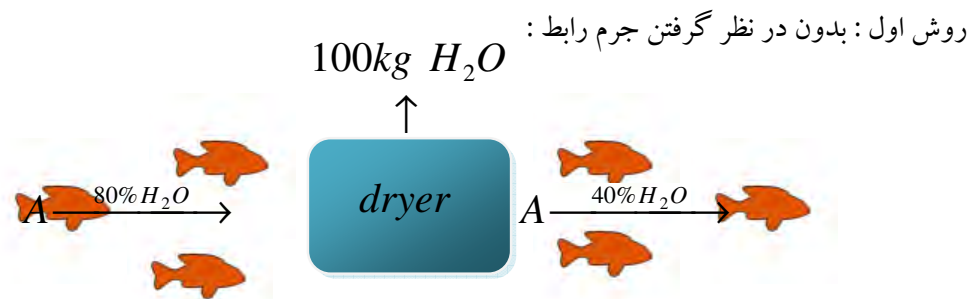
**نکته :** یک جسم (حجم) رابط ، ماده ای است که بدون هیچگونه تغییری و نیز بدون آنکه ماده ی دیگری به آن اضافه و یا کاسته شود از جریانی به جریان دیگر منتقل می شود. به زبان ساده تر یک جسم رابط ماده ای است که از یک جریان وارد می شود و بدون آنکه در سایر جریان ها پخش گردد از یک جریان خارج می شود.

مزیت استفاده از حجم رابط و نوشتن موازنه برای آن این است که می تواند مسائل با روش جبری را ساده تر کرده و یا باعث شود که تبدیل به مسائل با روش مستقیم شوند.

به شکل زیر توجه کنید :



مثال : چنانچه یک توده ماهی صید شده را بخواهیم ، رطوبت و آب زدایی کنیم ابتدا ۸۰٪ آب باشد و ۱۰۰ کیلوگرم از آب آن خارج کنیم و محصول بجامانده ۴۰٪ آب داشته باشد مطلوب است وزن قطعات ماهی ورودی به خشک کن .



موازنه جرم کلی :

$$m_{in} = m_{out}$$

$$F = W + P \Rightarrow F - P = 100 \quad (I)$$

موازنه ماده حول سیستم برای آب:

$$m_{H_2O \text{ in}} - m_{H_2O \text{ out}} = 0$$

$$0.8F - (W + 0.4P) = 0$$

$$0.8F - 0.4P = 100 \quad (II)$$

موازنه ماده حول سیستم برای آب :

$$\begin{cases} F - P = 100 \\ 0.8F - 0.4P = 100 \end{cases} \Rightarrow P = 50Kg \quad F = 150Kg$$

$$\text{وزن ماهی خالص} = 0.2 \times 150 = 30Kg$$

$$\text{or} \quad 0.6 \times 50 = 30Kg$$

روش دوم: با در نظر گرفتن جسم رابط (ماهی ها جسم رابط هستند)  
موازنه جرم کلی:

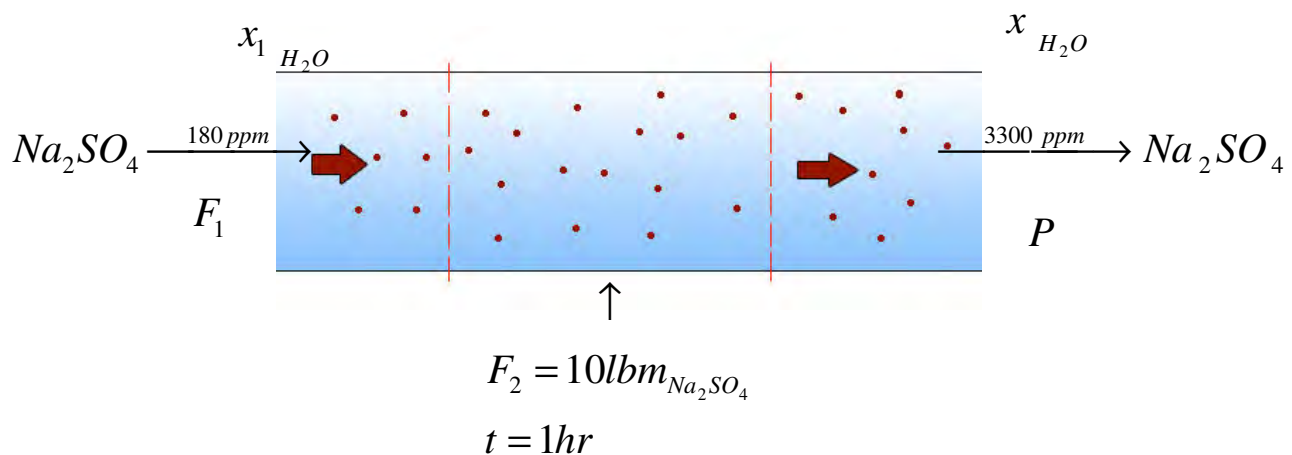
$$F - P = 100$$

موازنه ماده برای ماهی ها حول سیستم:

$$0.2F = 0.6P \Rightarrow F = 3P$$

$$2P = 100 \Rightarrow \begin{cases} P = 50 \\ F = 150 \end{cases} \Rightarrow \text{جرم ماهی} = 0.2 \times 150 = 30Kg$$

مثال: برای اندازه گیری شدت جریان سیال در خطوط لوله و یا دبی رودخانه ها از مواد ردیاب به مقدار ناچیز استفاده می شود. فرض کنید تجزیه آب جاری در یک رودخانه وجود  $Na_2SO_4$   $180 ppm$  را نشان می دهد. اگر  $10$  پوند  $Na_2SO_4$  را به تدریج و بطور یکنواخت در مدت یک ساعت به جریان آب رودخانه بیفزاییم و تجزیه آب در پایین دست رودخانه که عمل اختلاط کامل می شود  $Na_2SO_4$   $3300 ppm$  را نشان دهد دبی آب رودخانه را بر حسب  $\frac{gal}{hr}$  بدست آورید.



Base: 1hr

موازنه جرم کلی :

$$m_{in} = m_{out}$$

$$F_1 + F_2 = P \Rightarrow P - F_1 = 10 \quad (1)$$

موازنه ماده برای آب حول سیستم :

$$m_{H_2O \text{ in}} - m_{H_2O \text{ out}} = 0$$

$$F_1 \cdot x_{H_2O} - P \cdot x_{H_2O} = 0$$

$$F_1 \left(1 - \frac{180}{10^6}\right) = P \left(1 - \frac{3300}{10^6}\right) \Rightarrow P = \frac{1 - \frac{180}{10^6}}{1 - \frac{3300}{10^6}} \times F_1 \quad (2)$$

$$\begin{cases} (1) \\ (2) \end{cases} \Rightarrow F_1 = 3194.56 \text{ lbm}$$

چون مبنای محاسبات ۱ ساعت است :

$$\Rightarrow \dot{m} = \frac{F_1}{1 \text{ hr}} = 3194.5 \frac{\text{lbm}}{\text{hr}}$$

برای داشتن دبی حجمی داریم :

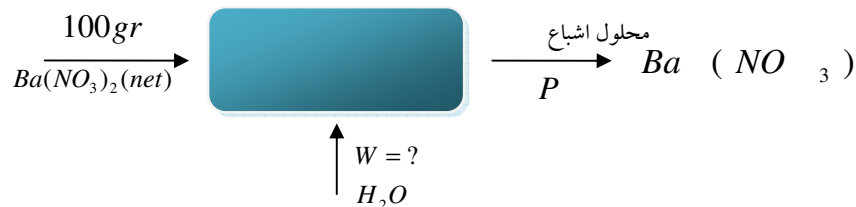
$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{3196.5 \text{ lbm}}{\text{hr}} \left| \frac{\text{ft}^3}{62.4 \text{ lbm}} \right| \frac{7.48 \text{ gal}}{1 \text{ ft}^3} = 382.9 \frac{\text{gal}}{\text{hr}}$$

مثال : حلالیت نیترات باریم در ۱۰۰ درجه سانتیگراد برابر  $34 \frac{\text{gr}}{100 \text{ grH}_2\text{O}}$  و در صفر درجه برابر  $5 \frac{\text{gr}}{100 \text{ grH}_2\text{O}}$  می باشد.

الف) اگر بخواهیم ۱۰۰ گرم نیترات باریم خالص را به صورت یک محلول اشباع در ۱۰۰ درجه سانتیگراد در آوریم چه مقدار آب مورد نیاز خواهد بود ؟

ب) اگر محلول مذکور را تا صفر درجه سرد کنیم چه مقدار نیترات باریم متبلور از محلول خارج می شود ؟

الف)





بدست آوردن غلظت خروجی بر حسب جزء جرمی (X):

$$x = \frac{m_{Solute}}{m_{Solution}} = \frac{34gr}{100 + 34gr} = 0.25$$

موازنه حول سیستم برای آب:

$$W = P \times (1 - 0.25) = P \times 0.75 \Rightarrow P = \frac{W}{0.75} = 1.33W$$

موازنه جرم حول سیستم:

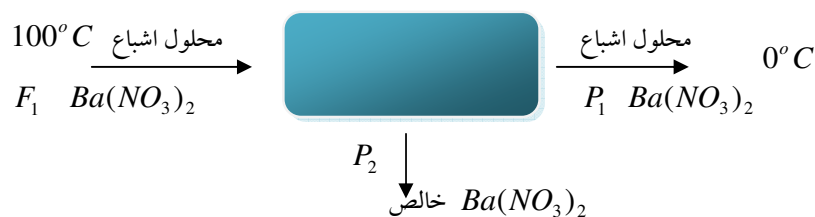
$$100 + W = P \Rightarrow 100 + W = 1.33W \Rightarrow W = \frac{100}{0.33} = 303.03Kg$$

جواب دقیق بدون گرد کردن اعداد به صورت زیر خواهد بود:

$$W = P(1 - \frac{34}{134}) \Rightarrow P = \frac{W}{(1 - \frac{34}{134})}$$

$$100 + W = P \Rightarrow 100 + W = \frac{W}{1 - \frac{34}{134}} \Rightarrow 100 = W(\frac{1}{1 - \frac{34}{134}} - 1) \Rightarrow W = \frac{100}{(\frac{1}{1 - \frac{34}{134}} - 1)} = 294.1Kg$$

(ب)



P مرحله ی قبل برابر F در این مرحله است.

از قسمت قبل داریم:

$$F_1 = \frac{W}{1 - \frac{34}{134}} = \frac{294.1}{1 - \frac{34}{134}} = 394.9Kg$$

در این سوال آب حجم رابط بوده و با نوشتن موازنه حول سیستم برای حجم رابط داریم:

$$F_1 \times (1 - \frac{34}{134}) = P_1(1 - \frac{5}{105})$$

$$P_1 = \frac{394.09 \times (1 - \frac{34}{134})}{(1 - \frac{5}{105})} = 308.8Kg$$

موازنه جرم حول سیستم:

$$F_1 = P_2 + P_1 \Rightarrow P_2 = F_1 - P_1 = 394.09 - 108.8 = 85.29Kg$$

### جریان برگشتی (Recycle):

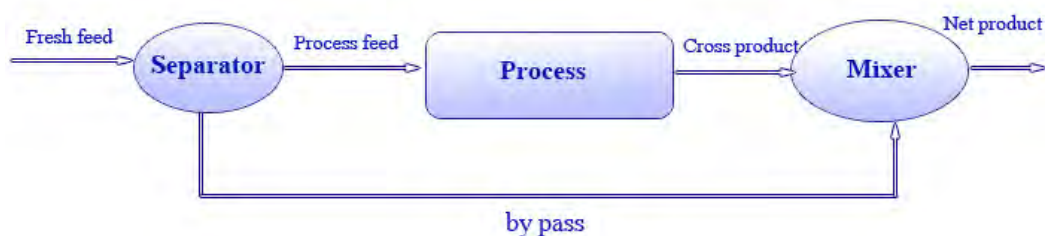


جریان های برگشتی امروزه در بسیاری از موارد از جمله برگشت دادن مواد اولیه ای که بدون شرکت در واکنش از راکتور خارج می شوند به قبل از راکتور و یا انجام امور کنترلی همچون کنترل دما، فشار، غلظت و ... مورد استفاده قرار می گیرد.

در برخورد با مسائل شامل جریان برگشتی می بایست دقت نمود که بنا به شرایط مسئله هر کجا که لازم بود موازنه ها را برقرار کنیم و دیگر اینکه اگر فرآیند واکنش شیمیایی اتفاق بیفتد باید به اطلاعات لازم به خصوص درجه تکمیل واکنش توجه کرد.

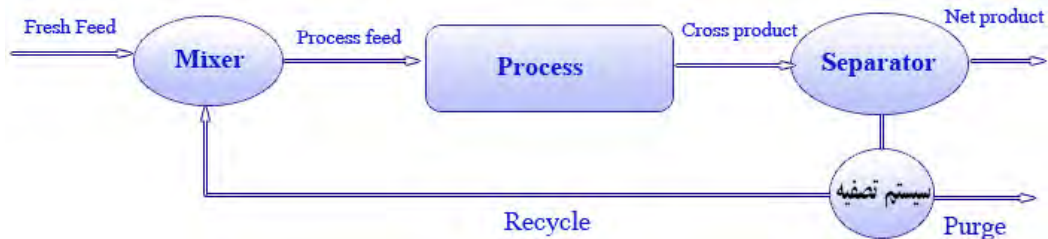
برای یافتن ماده محدود کننده باید خوراک فرآیند بررسی شود و برای اینکه بینیم چقدر از مواد وارد واکنش شده اند باید محصول نهایی بررسی شود.

### جریان کنار گذر (by pass):



در برخی موارد، شرایط ایجاب می کند که مقداری از مواد شرکت کننده در فرآیند بدون اینکه وارد فرآیند شوند از کنار آن عبور کرده و با محصول میانی ترکیب شوند تا محصول نهایی را تولید کنند. این جریان را جریان کنار گذر می نامند.

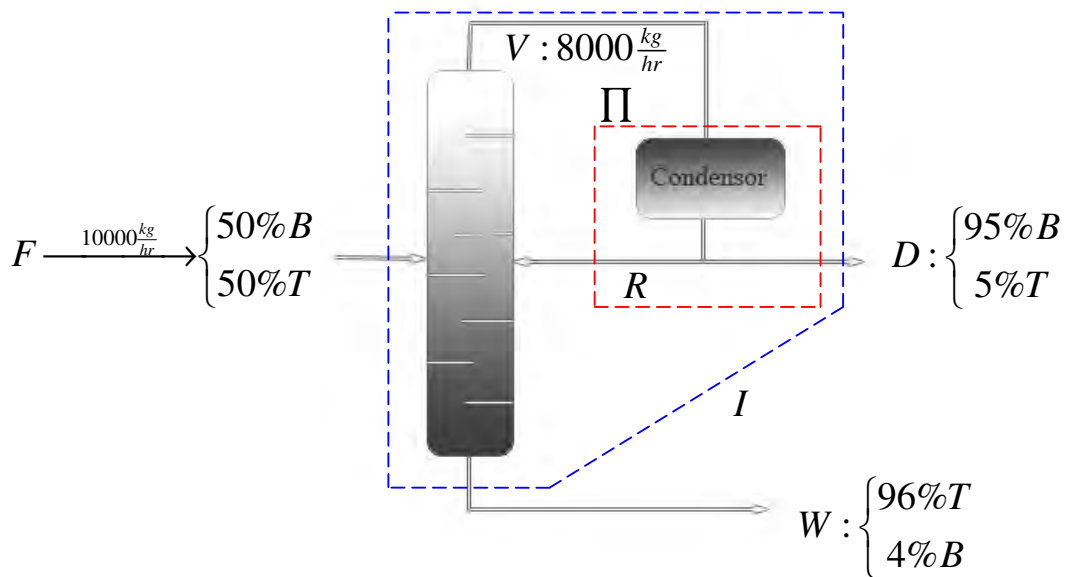
## جریان زدایشی (purge):



در استفاده از جریان های برگشتی چنانچه این جریان را قبل از استفاده در مخلوط کننده مورد عمل تصفیه قرار دهیم و مواد زائد را از آن بگیریم جریان ماد زاید را جریان زدایش می نامند.

**نکته:** در صورتیکه مسئله اشاره ای نکرده باشد غلظت جریان های زدایشی و بازگشتی را یکسان در نظر می گیریم.

مثال : در یک برج تقطیر  $10000 \frac{kg}{hr}$  از مخلوطی متشکل از ۵۰٪ بنزن و ۵۰٪ تولوئن را تفکیک می شود. محصول فوقانی برج پس از عبور از کندانسور محتوی ۹۵٪ بنزن و مواد خروجی از قسمت تحتانی برج دارای ۹۶٪ تولوئن می باشد. شدت جریان بخار ورودی به کندانسور از قسمت فوقانی برج  $8000 \frac{kg}{hr}$  است. جزئی از این محصول را به صورت جریان برگشتی به برجبرمی گردانیم و باقیمانده آن جهت مصارف دیگر خارج می شود. با فرض آنکه جریان فوقانی برج  $V$ ، محصول خروجی  $D$  و جریان برگشتی  $R$  دارای ترکیب مشابه باشند مطلوب است محاسبه ی نسبت مقدار جریان برگشتی به محصول خروجی.



$$\frac{R}{D} = ?$$

Base : 1hr

$$F = D + W \Rightarrow D = 10000 - W \quad (I) \quad \text{موازنه کلی حول سیستم کلی}$$

$$10000 = D + W$$

(I) موازنه B حول سیستم

$$x_{B_F} F = x_{B_D} D + x_{B_W} W$$

$$0.5(10000) = 0.95D + 0.4W \quad (2)$$



$$(1), (2) \Rightarrow \begin{cases} D = 5050 \text{ Kg} \\ w = 4950 \text{ Kg} \end{cases}$$

موازنه کلی حول سیستم (II)

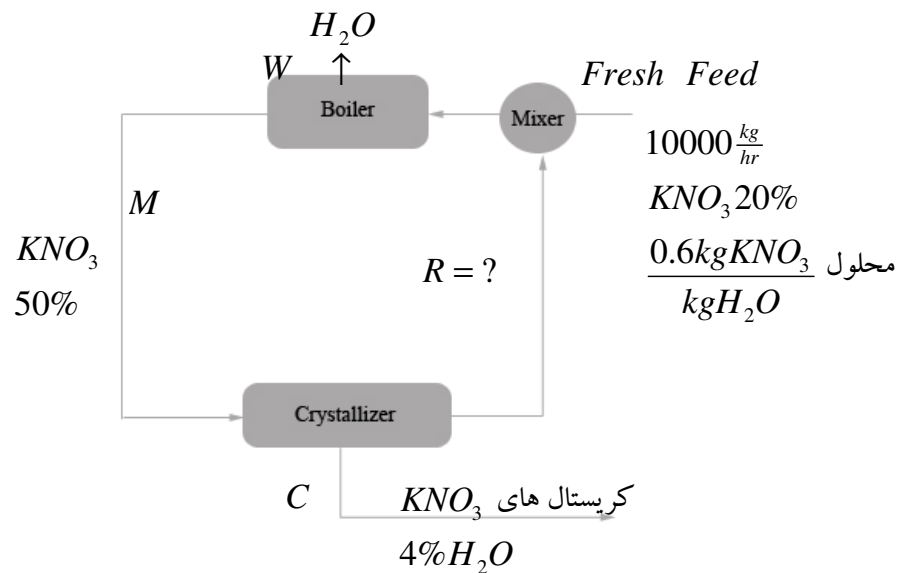
$$V = R + D$$

$$8000 = R + 5050 \Rightarrow R = 2950 \text{ Kg}$$

$$\Rightarrow \frac{R}{D} = \frac{2950}{5050} = 0.584$$

مثال: نتایج مربوط به یک تبخیر کننده در شکل زیر نشان داده شده است. مطلوب است شدت جریان

برگشتی بر حسب  $\text{Kg / hr}$



base :  $1 \text{ kg H}_2\text{O}$

موازنه حول کل سیستم برای  $\text{KNO}_3$ :

$$m_{\text{KNO}_3 \text{ in}} - m_{\text{KNO}_3 \text{ out}} = 0$$

$$10000 \times 0.2 - 0.96 \times C = 0 \Rightarrow C = 2083.3 \text{ Kg}$$

موازنه جرم کلی حول متبلور کننده:

$$m_{\text{in}} = m_{\text{out}}$$

$$M + C + R$$

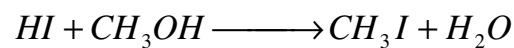
$$M - R = 2083.3$$

موازنه حول سیستم متبلورکننده برای  $KNO_3$  :

$$0.5M = 0.96C + \frac{0.6}{1.6}R$$

$$\begin{cases} M - R = 2083.3 \\ 0.5M - \frac{0.6}{1.6}R = 0.96 + 2083.3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M = 9454.9Kg \\ R = 7371.68Kg \end{cases}$$

مثال : در یک روش تولید یودومتیل  $2000 \text{ kg / day}$  اسید یودوهیدریک را به متانول اضافی اثر می دهیم و واکنش زیر اتفاق می افتد:



اگر محصول محتوی  $81.6\%$  درصد وزنی  $CH_3I$  به همراه متانول ترکیب نشده باشد و پساب متشکل از  $82.6\%$  درصد وزنی اسید یودوهیدریک و  $17.4\%$  آب فرض شود و درجه تکمیل واکنش در راکتور  $40\%$  باشد مطلوب است :

$$HI = 128$$

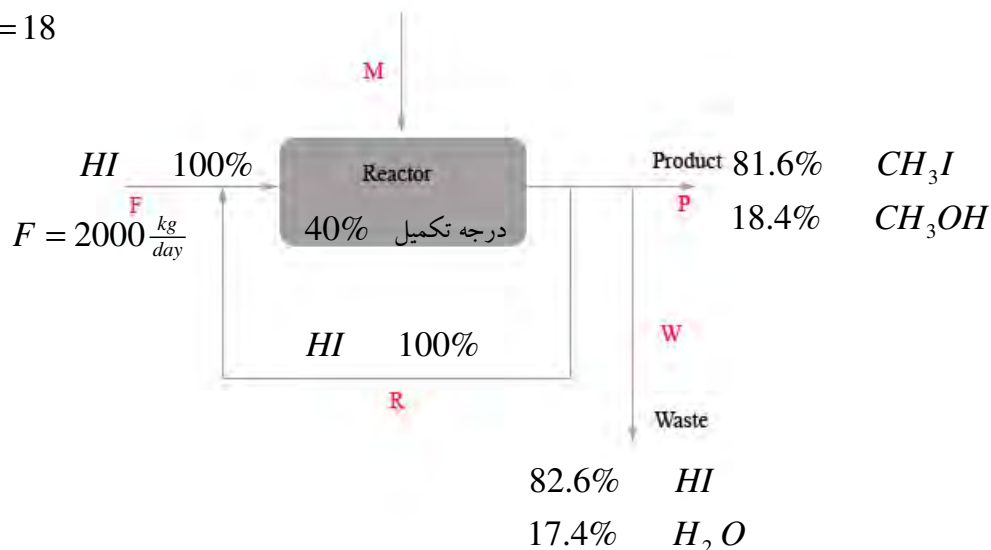
$$CH_3OH = 30$$

$$CH_3I = 142$$

$$H_2O = 18$$

الف : وزن متانول اضافه شده در روز

ب: مقدار  $HI$  در جریان برگشتی



Base : 1day

موازنه حول سیستم برای HI

$$m_{HI \text{ in}} - m_{HI \text{ out}} + m_{HI \text{ gen}} - m_{HI \text{ cons}} = 0$$

$$(1) \quad 2000 - 0.826W + 0 - (2000 + R)0.4 = 0$$

موازنه ماده حول کل سیستم برای  $CH_3OH$ :

$$m_{CH_3OH \text{ in}} - m_{CH_3OH \text{ out}} + m_{CH_3OH \text{ gen}} - m_{CH_3OH \text{ cons}} = 0$$

$$(2) \quad M - 0.184P + 0 - \frac{30 \times (2000 + R) \times 0.4}{128} = 0$$

موازنه ماده حول کل سیستم برای  $CH_3I$ :

$$m_{CH_3I \text{ in}} - m_{CH_3I \text{ out}} + m_{CH_3I \text{ gen}} - m_{CH_3I \text{ cons}} = 0$$

$$(3) \quad 0 - 0.816P + \frac{142 \times (2000 + R) \times 0.4}{128} - 0 = 0$$

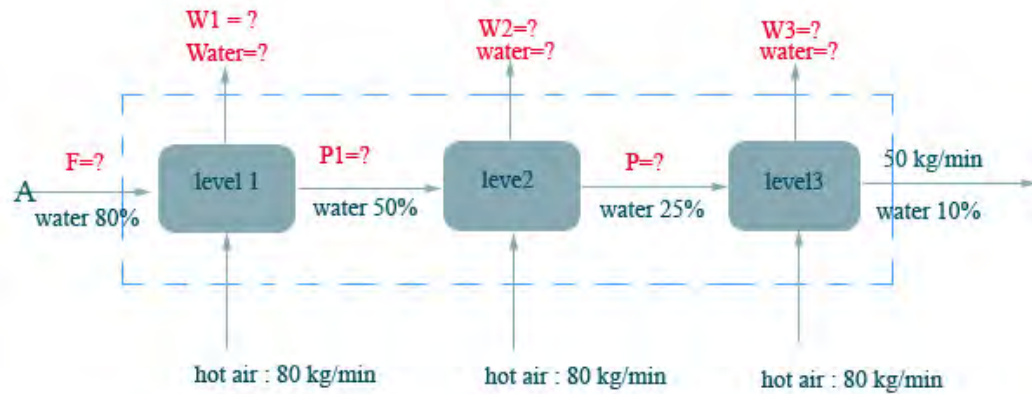
موازنه ماده حول کل سیستم برای آب:

$$m_{H_2O \text{ in}} - m_{H_2O \text{ out}} + m_{H_2O \text{ gen}} - m_{H_2O \text{ cons}} = 0$$

$$(4) \quad 0 - 0.174W + \frac{18 \times (2000 + R) \times 0.4}{128} - 0 = 0$$

با حل دستگاه معادلات فوق مجهولات بدست خواهد آمد.

مثال : در شکل زیر ماده مرطوب A در ۳ مرحله توسط هوای گرم که خودش شامل ۵٪ رطوبت می باشد خشک می گردد. با فرض اینکه کلیه درصد های داده شده جرمی باشند مقادیر مجهول روی شکل را بدست آورید.



Base : 1 min

موازنه ماده برای A حول کل سیستم :

$$m_{A \text{ in}} - m_{A \text{ out}} = 0$$

$$0.2F = 0.9 \times 50$$

$$F = \frac{0.9 \times 50}{0.2} = 225$$

موازنه جرم کل حول مرحله 1 :

$$m_{in} = m_{out}$$

$$F + 80 = W_1 + P$$

موازنه حول مرحله 1 برای ماده A :

$$m_{A \text{ in}} = m_{A \text{ out}}$$

$$0.2F = 0.6P \Rightarrow P1 = \frac{0.6 \times 225}{0.5} = 90 \text{ Kg}$$

$$\Rightarrow 225 + 80 - 90 = W1 = 215 \text{ Kg}$$





موازنه حول مرحله ۱ برای آب :

$$m_{H_2O \text{ in}} = m_{H_2O \text{ out}}$$

$$0.05 \times 80 + 0.8 \times 225 = 0.5 \times 90 + x_w \times 215 \quad \Rightarrow \quad x_w \cong 0.65$$

برای مراحل بعد نیز به همین صورت عمل می کنیم.



فصل سوم

# گاز، بخار، مایع و جامد

## گاز ، بخار ، مایع و جامد

در بسیاری از طراحی ها نیاز است که خواص سیستم به خصوص ارتباط  $P, T, V$  که به ترتیب نشان دهنده ی حجم ، دما و فشار سیستم هستند ، مشخص گردد تا بتوان دستگاه ها ، ظروف ، پمپ ها ، کمپرسورها و ... را طراحی کرد.

واضح است که تهیه ی ارقام و اطلاعات تجربی دقیق و قابل اطمینان برای همه ی ترکیب های موجود در طبیعت میسر نمی باشد در نتیجه در مواقعی که اطلاعات آزمایشگاهی وجود ندارد باید خواص مورد نظر را بر اساس پاره ای از اصول مورد قبول مثل قانون گازهای کامل و یا روابط تجربی تخمین زد.

## گازها :

گاز ایده آل : گازی که بتوان از برهم کنش ذرات آن صرف نظر کرد.

معادله حالت گاز ایده آل :

$$PV = nRT$$

$P$ : فشار مطلق

$V$ : حجم

$n$ : تعداد مول

$R$ : ثابت عمومی گازها

$T$ : دمای مطلق

نکته ۱: در رابطه ی فوق دما و فشار حتما باید مطلق باشد.

نکته ۲: واحد دما ، فشار ، مول و حجم می بایست با واحد  $R$  همخوانی داشته باشد.

نکته ۳: واحد  $R$  :

$$R = \frac{PV}{nT}$$

$$SI : \frac{(pa)(m^3)}{(gmole)(k)}$$

$$R = 8.314$$

قانون آووگادرو: هر گرم مول از گاز ایده آل در شرایط STP دارای ، 22.4 lit حجم است.

$$PV = nRT \Rightarrow R = \frac{PV}{nT} = \frac{(1.013 \times 10^5 \text{ pa})(22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(1 \text{ gmole})(273 \text{ K})}$$

محاسبه ی R در سیستم مهندسی :

$$R = \frac{8.314(\text{pa})(\text{m}^3)}{(\text{gmole})(\text{K})} \left| \frac{14.7 \text{ psia}}{1.013 \times 10^6 \text{ pa}} \right| \left| \frac{35.31 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3} \right| \left| \frac{454 \text{ gmole}}{1 \text{ lbmole}} \right| \left| \frac{1 \text{ k}}{1.8 R} \right|$$

$$= 10.73 \frac{(\text{psia})(\text{ft}^3)}{(\text{lbmole})(R)}$$

نکته ۴: همانگونه که در نکته ۲ گفته شد واحد کلیه پارامترها در رابطه ی  $PV=nRT$  می بایست با واحد R همخوانی داشته باشد. برای انجام این کار می توان یکی از دو روش زیر را انتخاب کرد:

۱- تغییر واحد داده های مسئله مطابق R موجود.

۲- تغییر واحد R مطابق داده های مسئله.

- به عنوان مثال چنانچه در مسئله واحد حجم میلی متر مکعب ، واحد فشار ،  $\text{ft}_{H_2O}$  ، واحد مول  $\text{lbmole}$  بوده و دما بر حسب را بر حسب کلوین از ما بخواهند ، خواهیم داشت :

$$R = \frac{8.314(\text{Pa})(\text{m}^3)}{(\text{gmole})(\text{K})} \left| \frac{33.91 \text{ ft}_{H_2O}}{1.013 \times 10^5 \text{ Pa}} \right| \left| \frac{1000 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3} \right| \left| \frac{454 \text{ gmole}}{1 \text{ lbmole}} \right|$$

$$= 1261.5261 \frac{(\text{ft}_{H_2O})(\text{mm}^3)}{(\text{lbmole})(\text{K})}$$

مثال : حجمی که توسط ۸۸lb ، دی اکسید کربن در فشار  $\text{ft}_{H_2O}$  ۳۲٫۲ و دمای هادرجه ی سانتیگراد اشغال می شود را محاسبه کنید.

$$R = \frac{8.314 \text{ Pa.m}^3}{\text{gmole.K}} \left| \frac{454 \text{ gmole } CO_2}{1 \text{ lbmole}} \right| \left| \frac{33.91 \text{ ft}_{H_2O}}{1.013 \times 10^5 \text{ Pa}} \right| = 1.26 \frac{\text{ft}_{H_2O} . \text{m}^3}{\text{lbmole.K}}$$

$$V = \frac{1.26 \text{ ft}_{H_2O} . \text{m}^3}{\text{lbmole.K}} \left| \frac{1 \text{ lbmole } CO_2}{44 \text{ lbmole}} \right| \left| \frac{88 \text{ lb } CO_2}{32.2 \text{ ft}_{H_2O}} \right| \left| \frac{288 \text{ K}}{32.2 \text{ ft}_{H_2O}} \right| = 22.539 \text{ m}^3$$

مثال : مقدار 10 پوند گاز دی اکسید کربن در یک مخزن آتش نشانی به حجم 20 فوت مکعب و دمای 30 درجه ی سانتیگراد موجود است ، با فرض آنکه قانون گاز کامل صادق باشد تعیین کنید که اگر برای اطمینان از پر بودن مخزن امتحان به عمل آوریم فشار سنج نسبی چه فشاری را باید نشان دهد؟

$$10 lb_m CO_2 = m$$

$$V = 20 ft^3$$

$$T = 30^\circ C$$

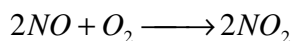
$$R = 10.73 \frac{(psia)(ft^3)}{(lbmole)(R)}$$

$$P = \frac{\frac{10}{44} lbmole}{(lbmole)(R)} \left| \frac{10.73 (psia)(ft^3)}{(lbmole)(R)} \right| \left| \frac{(30 + 273)}{(30 + 273)} \right| \left| \frac{1.8R}{1K} \right| \left| \frac{20 ft^3}{20 ft^3} \right| = 66.50 Psia$$

$$P_{abs} = P_{rel} + P_{air} \Rightarrow P_{rel} = P_{abs} - p_{air} = 66.50 - 14.7 = 51.80 Psig$$

**تذکر:** در مثال فوق چون فشار هوا داده نشده یعنی فشار هوا استاندارد در نظر گرفته شود.

مثال : فرض کنید نمونه از مخلوط مونوکسید نیتروژن در یک ظرف به حجم  $100 cm^3$  و دمای  $30^\circ C$  وجود دارد. واکنش زیر در ظرف به وقوع می پیوندد:



اگر جرم کل موجود در ظرف 0.291 گرم (مخلوط  $NO, NO_2$ ) بوده و فشار ظرف 170 Kpa باشد محاسبه کنید چند درصد مخلوط  $NO$  و چند درصد  $NO_2$  می باشد.

$$V = 100 cm^3$$

$$T = 30^\circ C$$

$$m = 0.291 gr$$

$$P = 170 Kpa$$

$$M_{w:NO} = 30$$

$$M_{w:NO_2} = 46$$

$$PV = nRT$$

$$\Rightarrow n = \frac{PV}{RT} = \frac{(gmole)(K)}{8.31(Pa)(m^3)} \left| \frac{170 \times 10^3 Pa}{(30 + 273)K} \right| \left| \frac{100 cm^3}{100^3 cm^3} \right| \left| \frac{1 m^3}{100^3 cm^3} \right|$$

$$= 0.0068 gmole$$

## جرم ویژه و چگالی :

جرم واحد حجم هر گاز را گویند که بستگی به دما و فشار دارد و اگر در مسئله ای صحبتی از دما و فشار نشد منظور دما و فشار استاندارد است.

چگالی همان تعریف فصل یک را دارد.

**نکته ۱:** چنانچه به گفته شود چگالی یک گاز را محاسبه کنید و در یک پرانتز یک گاز خاص را مساوی با یکدیگر قرار منظور این است که چگالی گاز را نسبت به آن گاز خاص بسنجید.

به عنوان مثال :

$$Sp.grCH_4 = \frac{\rho_{CH_4}}{\rho_{CH_2}} \quad (CH_2 = 1) \text{ چگالی } CH_4 \text{ را محاسبه کنید}$$

مثال : چگالی ازت را در ۸۰ درجه فارنهایت و ۷۴۵ mmHg در مقایسه با گازهای زیر محاسبه کنید.

الف- هوا در شرایط STP

ب- هوا در ۸۰ درجه فارنهایت و ۷۴۵ mmHg

الف :

$$PV = nRT$$

$$PV = \frac{m}{M} RT$$

$$\frac{P.M}{RT} = \frac{m}{V} = \rho \Rightarrow \rho = \frac{P.M}{R.T}$$

$$Sp.gr_{N_2} = \frac{\rho_{N_2 at 80^\circ F, 745 mmHg}}{\rho_{air at STP}} = \frac{\frac{P_{N_2}.M_{N_2}}{R.T_{N_2}}}{\frac{P_{air}.M_{air}}{R.T_{air}}} = \frac{P_{N_2}.M_{N_2}.T_{air}}{P_{air}.M_{air}.T_{N_2}}$$

$$= \frac{745 \times 28 \times (32 \times 460)}{760 \times 29 \times (80 + 460)} = 0.862$$

ب:

$$Sp.gr_{N_2} = \frac{P_{N_2}.M_{N_2}.T_{air}}{P_{air}.M_{air}.T_{N_2}} = \frac{M_{N_2}}{M_{air}} = \frac{28}{29}$$

تذکر: چنانچه دما و فشار با دما و فشار گاز مبنا یکی بود، چگالی گاز برابر نسبت جرم مولکولی ها خواهد بود

## قانون دالتون



اگر A و B و C... گازهای ایده آل باشند

$$PV_t = n_t.R.T \quad (1)$$

$$n_t = n_A + n_B + \dots$$

برای تک تک گازها هم می توان نوشت :

$$P_A.V_t = n_A.R.T$$

$$P_B.V_t = n_B.R.T$$

⋮

$$(P_A + P_B + \dots)V_t = n_t.R.T \quad (2)$$

$$(1), (2) \Rightarrow P_t = P_A + P_B + \dots = \sum_{i=1}^n P_i \quad \text{قانون دالتون :}$$

جمع فشارهای جزئی = فشار کل در مخلوط های ایده آل

محاسبه فشار جزئی :

$$(3) \quad P_t.V_t = n_t.R.T$$

$$(4) \quad P_i.V_t = n_i.R.T$$

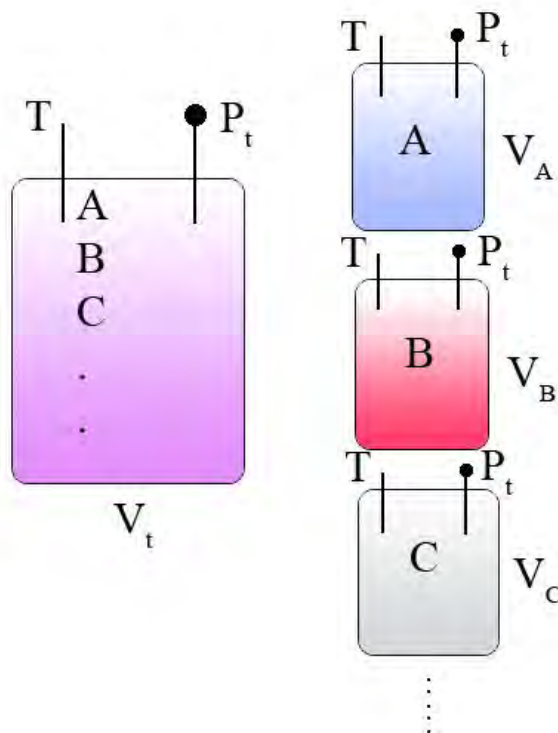
$$\frac{(4)}{(3)} \Rightarrow \frac{P_i}{P_t} = \frac{n_i}{n_t} = y_i$$

$$\Rightarrow P_i = P_t.y_i$$

$$P_i = P_t.y_i$$

## قانون آمalgات

با توجه به شکل زیر داریم:



$$P_t V_A = n_A RT$$

$$P_t V_B = n_B RT$$

⋮

---


$$P_t (V_A + V_B + \dots) = n_t RT \quad (1)$$

$$P_t V_t = n_t RT \quad (2)$$

$$(1), (2) \Rightarrow V_t = V_A + V_B + \dots$$

می توان ثابت کرد:

$$V_i = V_t \cdot y_i$$

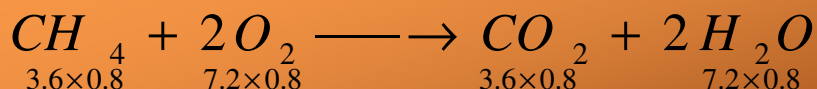
محاسبه حجم جزئی



مثال : چنانچه گاز متان را با ۲۰٪ هوای اضافه در یک محفظه احتراق در بسته ابتدا مخلوط کنیم و سپس بوسیله جرقه ی الکتریکی عمل احتراق انجام شود بگونه ای که ۱۰٪ متان ناقص بسوزد و درجه پیشرفت واکنش احتراق کامل نیز ۸۰٪ باشد و بعد از اتمام احتراق فشارسنج ، فشارمحفظة را ۳ اتمسفر نشان دهد با فرض اینکه حجم ظرف ۳ متر مکعب و مقدار متان تزریقی به آن ۶۴ گرم باشد :

الف : دمای محفظه را بعد از اتمام احتراق محاسبه کنید.

ب : فشار و حجم جزئی مواد باقیمانده در محفظه را بدست آورید.



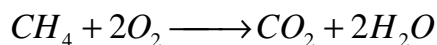
$$64 \text{ gr } CH_4$$

$$\Rightarrow n_{CH_4} = \frac{m_{CH_4}}{M_{CH_4}} = \frac{64}{16} = 4 \text{ gmole}$$

الف :

$$P_t V_t = n_t R T$$

$$\Rightarrow T = \frac{P_t \cdot V_t}{n_t R}$$



باتوجه به نسبت ضرایب استوکیومتری در واکنش فوقو با توجه به اینکه اکسیژن ورودی بر اساس احتراق کامل محاسبه می گردد :

$$\text{اکسیژن مورد نیاز} = 8 \text{ gmole}$$

$$\text{اکسیژن ورودی} = 8 \times 1.2 = 9.6 \text{ gmole}$$

$$\text{نیترژن مورد نیاز} = 9.6 \times \frac{79}{21} = 36.11 \text{ gmole}$$

موازنه حول سیستم برای  $CO_2$  :

$$n_{CO_2 in} - n_{CO_2 out} + n_{CO_2 gen} - n_{CO_2 cons} = 0$$

$$0 - n_{CO_2 out} + 3.6 \times 0.8 - 0 = 0$$

---


$$n_{CO_2 out} = 2.88 gmole$$

موازنه حول سستم برای  $H_2O$  :

$$n_{H_2O in} - n_{H_2O out} + n_{H_2O gen} - n_{H_2O cons} = 0$$

$$n_{H_2O out} = n_{H_2O gen} = 7.2 \times 0.8 + 0.8 = 6.56 gmole$$

موازنه حول سیستم برای ماده  $CO$  :

$$n_{CO in} - n_{CO out} + n_{CO gen} - n_{CO cons} = 0$$

$$\Rightarrow n_{CO out} = 0.4 gmole$$

موازنه حول سیستم برای ماده  $O_2$  :

$$n_{O_2 in} - n_{O_2 out} + n_{O_2 gen} - n_{O_2 cons} = 0$$

$$9.6 - n_{O_2 out} + 0 - (7.2 \times 0.8 + 0.6) = 0$$

$$\Rightarrow n_{O_2 out} = 3.24 gmole$$

موازنه حول سیستم برای ماده  $N_2$  :

$$n_{N_2 in} - n_{N_2 out} + n_{N_2 gen} - n_{N_2 cons} = 0$$

$$\Rightarrow n_{N_2 in} = n_{N_2 out} = 36.11 gmole$$

موازنه برای  $CH_4$  :

$$n_{CH_4 in} - n_{CH_4 out} + n_{CH_4 gen} - n_{CH_4 cons} = 0$$

$$4 - n_{CH_4 out} + 0 - (3.6 \times 0.8 + 0.4) = 0$$

$$n_{CH_4 out} = 0.72 gmole$$



جزء	$N(gmole)$	$y$
$CO_2$	7.88	0.057
$CO$	0.4	0.008
$H_2O$	6.56	0.131
$CH_4$	0.72	0.014
$O_2$	3.24	0.064
$N_2$	36.11	0.72
جمع کل	49.91	0.99

$$T = \frac{3atm}{1} \times \frac{1.013 \times 10^5 pa}{1} \times \frac{3m^3}{1} \times \frac{1}{49.91 gmole} \times \frac{gmole. K}{8.314 Pa.m^3}$$

$$= \frac{3 \times 1.013 \times 10^5 \times 3}{49.91 \times 8.314} = 2197.12K = 1924.12^\circ C$$

ب:

$$CO_2 \begin{cases} P_{CO_2} = P_t \cdot y_{CO_2} = 3atm \times 0.057 \\ V_{CO_2} = V_t \times y_{CO_2} = 3m^3 \times 0.057 \end{cases}$$

## گازهای حقیقی

**تعریف:** گازی که نتوان از برهمکنش ذرات آن صرف نظر کرد.

**توجه:** ایده آل بودن یک گاز یک امر کاملاً نسبی است و بستگی به دما، فشار و نوع فرآیند دارد. بطوریکه یک گاز را امکان دارد در یک شرایط ایده آل و در شرایط دیگر حقیقی فرض کنیم و یا یک گاز دیگر در همان شرایط دما و فشار ایده آل فرض گردد. درحالیکه سایر گازها را نتوان ایده آل فرض کرد.

**نکته:** افزایش فشار در دمای ثابت و یا کاهش دما در فشار ثابت هر دو باعث می شوند که از گاز ایده آل فاصله بگیریم و به سمت گازهای حقیقی نزدیک شویم. در این صورت خطای رابطه ی  $PV=nRT$  افزایش می یابد و دیگر نمی توان از آن استفاده کرد.

در مورد گازهای حقیقی معادله ی حالت ساده و جامعی وجود ندارد و در طول تاریخ (از قرن 17 تاکنون) دانشمندان برای برخی گازهای خاص در محدوده های دما و فشار مشخص آزمایشاتی انجام داده اند و یک سری معادلات تجربی بدست آورده اند که این معادلات فقط برای همان گازها و فقط همان محدوده ی دما و فشار قابل استفاده است. از جمله معادلات تجربی اولیه ای که ارائه گردیده ، معادله ی حالت واندروالس است.

## معادله واندروالس

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$

a و b ثابت هایی هستند که برای هر گاز از طریق آزمایش بدست می آید.

P: فشار مطلق

n : تعداد مول

T: دمای مطلق

V: حجم

R: ثابت گازها

واحد b :

$$[nb] = [V] \Rightarrow [b] = \frac{[V]}{[n]}$$

$$SI : \frac{m^3}{gmole}$$

واحد a :

$$\left[\frac{n^2 a}{V^2}\right] = [P] \Rightarrow [a] = \frac{[P][V]^2}{[n]^2}$$

$$SI : \frac{Pa.(m^3)^2}{(gmole)^2}$$

پیدا کردن مجهولات از معادله واندروالس

$$T = \frac{(P + \frac{n^2 a}{V^2})(V - nb)}{nR} \quad T \text{ مجهول :}$$

$$P = \frac{nRT}{V - nb} - \frac{n^2 a}{V^2} \quad P \text{ مجهول :}$$

$$V^3 + \left(\frac{nRT}{P}\right)V^2 + \left(\frac{n^2 a}{P}\right)V - \frac{n^3 ab}{P} = 0 \quad V \text{ مجهول :}$$

با حل معادله درجه ۳ مجهول بدست خواهد آمد.

تمرین - اگر n مجهول باشد معادله درجه ۳ مربوطه را پیدا کنید.

تذکر: مثال ۱۲-۳ کتاب در این زمینه مطالعه شود.

مثال: مخزنی به حجم  $5\text{ ft}^3$  محتوی  $50\text{ lb}$  پروپان زیر آفتاب داغ قرار دارد. فشارسنج فشار  $665\text{ psig}$  را نشان می دهد. دمای پروپان داخل مخزن چیست؟ (با استفاده از معادله واندروالس)

$$T = \frac{(P + \frac{n^2 a}{V^2})(V - nb)}{nR}$$

$$P = 665 + 14.7 = 679\text{ psia}$$

$$n = \frac{50}{44} = 1.14\text{ lbmole}$$

$$V = 5\text{ ft}^3$$

$$R = 10.73 \frac{(\text{Psia})(\text{ft}^3)}{(\text{lbmole})(R)}$$

$$a = 9.24 \times 10^6 \times 3.776 \times 10^{-3} = 34.83 \times 10^3 \text{ Psia} \left( \frac{\text{ft}^3}{\text{lbmole}} \right)^2$$

$$b = 90.7 \times 1.6 \times 10^{-2} = 1.4512 \times 10^{-2} \frac{\text{ft}^3}{\text{lbmole}} = 1.45 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbmole}}$$

$$T = \frac{(679.7 + \frac{10.4^2 \times 34.83 \times 10^3}{52})(5 - 1.14 \times 1.45)}{1.14 \times 10.73} = 681.4\text{ R} = 221.4^\circ\text{ F}$$

معادله حالت تراکم پذیری برای گاز حقیقی

$$PV = ZnRT$$

$$Z = f(T_r, P_r)$$

$Z$ : ضریب تراکم پذیری

$T_r$ : دمای نقصانی (کاهیده)

$P_r$ : فشار نقصانی (کاهیده)

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

$$V_r = \frac{V}{V_c}$$

$T, P, V$  حجم، فشار و دما هستند.

$T_c$ : دمای بحرانی

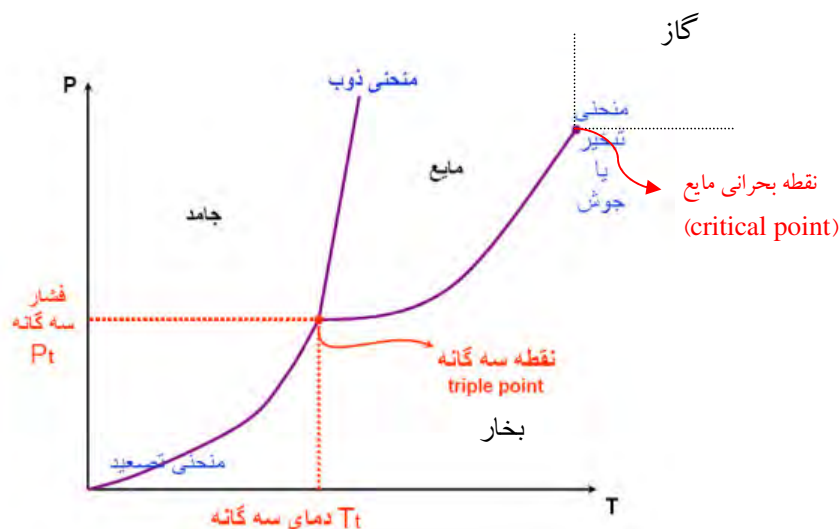
$P_c$ : فشار بحرانی

$V_c$ : حجم بحرانی

با داشتن  $T_r$  و  $P_r$  (و احياناً  $V_r$ )، با استفاده از گرافهای صفحات 298 تا 300 میتوان مقدار  $Z$  را بدست آورد و برای محاسبه  $T_c$  و  $P_c$  نیز خصوصیات بحرانی مواد می توان از ضمیمه D کتاب استفاده نمود.

## نمودار دما- فشار برای مواد خالص

نمودار فشار بر حسب دما برای تمام مواد تقریباً از شکل زیر پیروی می کند. (البته نمودار هر ماده با ماده دیگر تفاوت‌های جزئی دارد.)



### نقطه بحرانی :

حداکثر دما و فشاری که در آن حالت تعادل بین فازهای مایع و بخار وجود داشته باشد.

### برخی تعاریف از حالت بحرانی :

- حالت بحرانی ، واسطه ای از حالت گاز - مایع و عبارت از شرایط فیزیکی خاصی است که در تحت آنها جرم ویژه و سایر مشخصات مایع و بخار بصورت کاملاً یکسان در می آید.
- این نقطه در مورد یک جسم خالص بالاترین دمایی است که در آن مایع و بخار می توانند به حالت تعادل با یکدیگر وجود داشته باشند.
- نقطه بحرانی عبارت از یک نقطه حدی است که ناپدید شدن یک حالت را مشخص می کند.

**تذکر ۱-** فقط برای گازهای هیدروژن و هلیم داریم :

$$T'_c = T_c + 8^\circ K$$

$$P'_c = P_c + 8 atm$$

$T_c, P_c$  مقادیری هستند که از ضمیمه D کتاب خوانده می شوند.

$T'_c, P'_c$  مقادیری هستند که باید در محاسبات به کار برده شوند.

**تذکر ۲-** با فرض اینکه گاز در نقطه بحرانی ایده آل باشد داریم:

$$\hat{V}_c = \frac{RT_c}{P_c} \quad \text{حجم بحرانی مولی} \Rightarrow V_c = n\hat{V}_c \quad \text{حجم بحرانی}$$



مثال - چنانچه مقداری گاز آمونیاک در مخزنی که فشارسنج فشار آن را ۲۹۲ psig نشان داده و دمای آن ۱۲۵ درجه فارنهایت و حجم مخزن نیز ۱۲۰ فوت مکعب بوده با استفاده از معادله ضریب تراکم پذیری جرم آمونیاک موجود در مخزن را محاسبه کنید.

$$P = 292 \text{ psig}$$

$$T = 125^{\circ} F$$

$$V = 120 \text{ ft}^3$$

$$PV = ZnRT$$

$$Z(T_r, P_r)$$

$$T_r = \left(\frac{T}{T_c}\right), \quad P_r = \left(\frac{P}{P_c}\right)$$

$$m_{NH_3} = ?$$

$$NH_3 \begin{cases} T_c = 405.5 K \\ P_c = 111.3 atm \end{cases} \text{ از ضمیمه D آخر کتاب}$$

$$T_c = (405 - 273) \times 1.8 + 32 + 460 = 730.5^{\circ} R$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{125 + 460}{730.5} = 0.8$$

$$P_r = \frac{p}{p_c} = \frac{292 + 14.7}{111.3 \times \frac{14.7 \text{ psi}}{1 atm}} = 0.19$$

از گراف ۳-۹:  $Z=0.85$

$$n = \frac{PV}{ZRT} = \frac{(292 + 14.7) \times 120}{0.85 \times 10.73 \times (115 + 460)} = 6.9 \text{ lbmole}$$

$$m = nM = 6.9 \times 17 = 117.26 \text{ lbm}$$

مثال - فرض کنید ۳٫۵ کیلوگرم اکسیژن مایع در مخزنی به حجم ۰٫۰۲۸۴ متر مکعب و در دمای ۲۵-  
درجه سانتیگراد تبخیر شود . فشار داخل مخزن چه مقدار خواهد بود.(از معادله ضریب تراکم پذیری  
استفاده شود)، چنانچه حد مجاز فشار مخزن ۱۰۰ آتمسفر باشد آیا مخزن با خطر انفجار مواجه است یا  
خیر؟

$$m_{O_2} = 3.5kg$$

$$V = 0.0284m^3$$

$$T = -25^{\circ}C$$

$$P = ?$$

$$PV = ZnRT$$

$$P = \frac{ZnRT}{V}$$

$$V_r = \frac{V}{V_c}$$

$$\text{از ضمیمه D برای اکسیژن} \begin{cases} T_c = 154.4K \\ P_c = 497atm \\ V_c = 74 \frac{cm^3}{gmole} \end{cases}$$

$$T_r = \frac{(-25 + 273)}{154.4} = 1.6$$

$$V_c = \frac{RT_c}{P_c} = \frac{8.314 \frac{pa.m^3}{gmole.K} \times 154.4K}{49.7atm \times \frac{1.013 \times 10^5}{1atm}} = 2.55 \times 10^{-4}$$

$$\Rightarrow V_r = \frac{V}{V_c} = \frac{0.0284m^3}{\frac{3500/32gmole}{2.55 \times 10^{-4}}} = 1.018$$

$$Z = 0.93 \quad \text{از گراف ۳-۷ (c):}$$

$$P = \frac{ZnRT}{V} = \frac{0.93 \times \frac{3500}{32} \times 8.314 \times (-25 + 273)}{0.0284m^3} = 738495.8Pa$$

$$738495.8Pa \times \frac{1atm}{1.013 \times 10^5 Pa} = 72.9atm$$

پس خطر انفجار وجود ندارد.

## مخلوط گازهای حقیقی

در مورد گازهای حقیقی از آنجایی که نمی توان از برهمکنش ذرات آنها صرف نظر کرد روابط مورد نظر برای مخلوط آنها نیز با گازهای ایده آل متفاوت است. در این راستا چهار روش انجام محاسبات در مخلوط گازهای حقیقی معرفی می شود.

### الف) معادلات حالت

به عنوان مثال برای معادله واندروالس :

$$P_A = \frac{n_A RT}{V - n_A b_A} - \frac{n_A^2 a_A}{V^2}$$

$$P_B = \frac{n_B RT}{V - n_B b_B} - \frac{n_B^2 a_B}{V^2}$$

⋮  
⋮

با جمع تمام معادلات فوق خواهیم داشت:

$$P_t = \sum_{i=1}^n P_i = RT \left( \frac{n_A}{V - n_A b_B} + \dots \right) - \frac{1}{V^2} (n_A^2 a_A + \dots)$$

### ب) متوسط ثابت ها در معادلات حالت

به عنوان مثال برای معادله واندروالس داریم :

$$b_{mix} = b_A y_A + b_B y_B + \dots$$

$$a_{mix}^{\frac{1}{2}} = a_A^{\frac{1}{2}} y_A + a_B^{\frac{1}{2}} y_B + \dots$$

و برای مخلوط داریم :

$$\left( P + \frac{n_t^2 a_{mix}}{V^2} \right) (V - n_t b_{mix}) = n_t RT$$

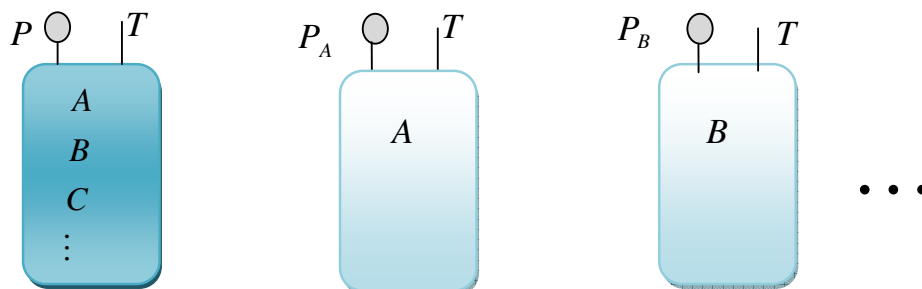
### ج) متوسط ضریب تراکم پذیری

در اینجا ضریب تراکم پذیری برای هر جزء از مخلوط بطور جداگانه از گراف ها پیدا می شود و سپس با استفاده از رابطه ی زیر ضریب تراکم پذیری متوسط مخلوط گاز محاسبه و در رابطه ی  $PV = ZnRT$  قرار داده می شود .

$$Z_m = Z_A y_A + Z_B y_B + \dots$$

از آنجایی که  $Z$  تابعی از فشار و دمای نقصانی است لازم است فشاری که جهت تعیین  $P_r$  بکار می رود انتخاب شود.

ج-۱) (کاربرد قانون دالتون): برای هر سازنده Z را در  $T_r$  و فشار جزئی نقصانی محاسبه می کنیم.

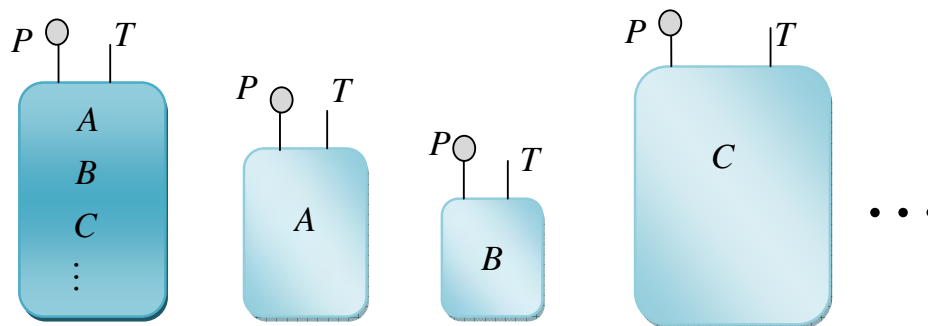


جزء	مشخصات بحرانی	$P_r$	$T_r$	Z	
A	$T_{c_A}, P_{c_A}$	$\frac{P_A}{P_{c_A}}$	$\frac{T}{T_{c_A}}$	$Z_A$	$y_A \cdot Z_A$
B	$T_{c_B}, P_{c_B}$	$\frac{P_B}{P_{c_B}}$	$\frac{T}{T_{c_B}}$	$Z_B$	$y_B \cdot Z_B$
C	$T_{c_C}, P_{c_C}$	$\frac{P_C}{P_{c_C}}$	$\frac{T}{T_{c_C}}$	$Z_C$	$y_C \cdot Z_C$
					$Z_m$

بطور کلی:

$$P_{ri} = \frac{P_i}{P_{ci}} = \frac{P_t \cdot y_i}{P_{ci}}$$

ج-۲) (کاربرد قانون آمالگات): برای هر سازنده Z را در  $T_r$  و فشار نقصانی کل انتخاب می کنیم.



جزء	مشخصات بحرانی	$P_r$	$T_r$	Z	
A	$T_{c_A}, P_{c_A}$	$\frac{P}{P_{c_A}}$	$\frac{T}{T_{c_A}}$	$Z_A$	$y_A \cdot Z_A$
B	$T_{c_B}, P_{c_B}$	$\frac{P}{P_{c_B}}$	$\frac{T}{T_{c_B}}$	$Z_B$	$y_B \cdot Z_B$
C	$T_{c_C}, P_{c_C}$	$\frac{P}{P_{c_C}}$	$\frac{T}{T_{c_C}}$	$Z_C$	$y_C \cdot Z_C$
					$Z_m$

به طور کلی می توان نوشت :

$$P_{ri} = \frac{P_t}{P_{ci}}$$

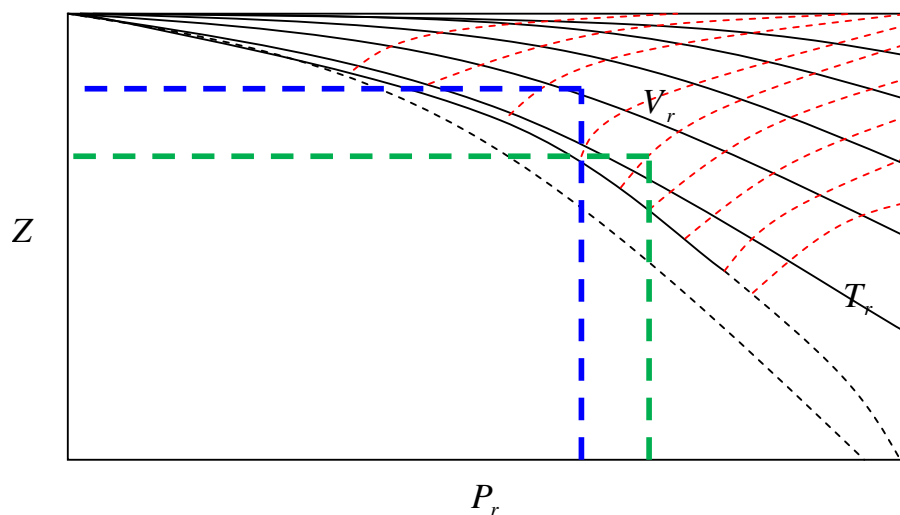
د) مشخصات شبه بحرانی

$$\begin{cases} P'_c = P_{cA} \cdot y_A + P_{cB} \cdot y_B + \dots \\ T'_c = T_{cA} \cdot y_A + T_{cB} \cdot y_B + \dots \end{cases}$$

$$P'_r = \frac{P_t}{P'_c} \quad \text{و} \quad T'_r = \frac{T}{T'_c}$$

سپس با استفاده از گراف مقدار Z خوانده می شود.  
در این حالت فقط یک بار نیاز است که از گراف ها استفاده شود.

در شکل زیر نمونه ای از منحنی های عمومی تراکم پذیری را مشاهده می کنید که به صورت کیفی ترسیم شده است.



- نکته ۱-** در شکل فوق خطوط قرمز رنگ بیانگر  $V_r$  و خطوط سیاه رنگ نشانگر  $T_r$  می باشند.
- نکته ۲-** بر روی محور افقی اعداد مربوط به  $P_r$  و بر روی محور عمودی اعداد مربوط به  $Z$  قید می گردند.
- نکته ۳-** در صورت مشخص بودن  $P_r$  و  $T_r$  به روش ترسیم شده ی آبی رنگ و در صورت مشخص بودن  $P_r$  و  $V_r$  به روش ترسیم شده ی سبز رنگ مقدار  $Z$  از نمودار خوانده می شود.
- نکته ۴-** نمودار فوق شماتیکی از منحنی های ضریب تراکم پذیری در فشارهای پایین می باشد . نمودار های مربوط به فشارهای متوسط و بالا به گونه ای دیگر است اما طریقه ی کار با آنها مشابه روش ذکر شده است. نمونه ای از این نمودار ها در صفحات ۲۹۷ تا ۳۰۱ کتاب موجود می باشد.

مثال : ترکیب نسبی یک مخلوط گاز بصورت زیر است :

$$N_2 : 50 \%$$

$$C_2H_4 : 30 \%$$

$$CH_4 : 20 \%$$

مخلوط در دمای 100 درجه سانتیگراد و فشار 90 آتمسفر قرار دارد. حجم مولی مخلوط را با استفاده

از روشهای زیر محاسبه و مقایسه کنید :

الف) قانون گازهای کامل

ب) معادله واندروالس + قانون دالتون

ج) معادله واندروالس با استفاده از متوسط ثوابت معادله

د) ضریب متوسط تراکم پذیری و قانون دالتون

ه) ضریب متوسط تراکم پذیری و قانون آماگات

و) مقادیر شبه بحرانی

ماده	$a[atm(\frac{cm^3}{gmole})^2]$	$b(\frac{cm^3}{gmole})$	$T_c(K)$	$P_c(atm)$
$CH_4$	$2.25 \times 10^6$	42.8	191	45.8
$C_2H_6$	$4.48 \times 10^6$	57.2	283	50.9
$N_2$	$1.35 \times 10^6$	38.6	126	33.5

حل :

چون گفته شده حجم مولی را بدست آوری پس  $n=1$  خواهد بود.

$$R = 82.06 \frac{(cm^3)(atm)}{(gmole)(K)}$$

الف) قانون گازهای کامل :

$$PV = nRT \xrightarrow{n=1} P\hat{V} = RT \Rightarrow \hat{V} = \frac{RT}{P}$$

$$\hat{V} = \frac{82.06(cm^3)(atm)}{(gmole)(K)} \bigg| \frac{373K}{90atm} = 340 \frac{cm^3}{gmole}$$

ب) معادله واندروالس + قانون دالتون:

$$P_t = \left( \frac{n_{CH_4} RT}{V - n_{CH_4} b_{CH_4}} + \frac{n_{C_2H_6} RT}{V - n_{C_2H_6} b_{C_2H_6}} + \frac{n_{N_2} RT}{V - n_{N_2} b_{N_2}} \right) - \left( \frac{n_{CH_4}^2 a_{CH_4}}{V^2} + \frac{n_{C_2H_6}^2 a_{C_2H_6}}{V^2} + \frac{n_{N_2}^2 a_{N_2}}{V^2} \right)$$

$$90 = \left( \frac{0.2 \times 82.06 \times 373}{\hat{V} - 0.2 \times 42.8} + \frac{0.3 \times 82.06 \times 373}{\hat{V} - 0.3 \times 57.2} + \frac{0.5 \times 82.06 \times 373}{\hat{V} - 0.5 \times 37.6} \right) -$$

$$\left( \frac{0.2^2 \times 0.25 \times 10^6 + 0.3^2 \times 4.48 \times 10^6 + 0.5^2 \times 1.35 \times 10^6}{\hat{V}^2} \right)$$

با ساده سازی نهایتاً معادله به فرم زیر خواهد شد که به روش سعی و خطا قابل حل است.

$$P \hat{V} = A \hat{V}^3 + B \hat{V}^2 + C \hat{V} + D = 0 \Rightarrow \hat{V} = 332 \frac{cm^3}{gmole}$$

ج) معادله واندروالس با استفاده از متوسط ثوابت معادله

$$\bar{a} = y_{CH_4} a_{CH_4}^{\frac{1}{2}} + y_{C_2H_6} a_{C_2H_6}^{\frac{1}{2}} + y_{N_2} a_{N_2}^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow \bar{a} = 0.2(2.25 \times 10^6)^{\frac{1}{2}} + 0.3(4.48 \times 10^6)^{\frac{1}{2}} + 0.5(1.35 \times 10^6)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 2.3 \times 10^6$$

$$\bar{b} = y_{CH_4} b_{CH_4} + y_{C_2H_6} b_{C_2H_6} + y_{N_2} b_{N_2}$$

$$\Rightarrow \bar{b} = 0.2(42.8) + 0.3(57.2) + 0.5(37.6) = 45$$

$$\left( P + \frac{1^2 \times \bar{a}}{\hat{V}^2} \right) (\hat{V} - 1 \times \bar{b}) = RT$$

$$\Rightarrow \left( 90 + \frac{2.3 \times 10^6}{\hat{V}^2} \right) (\hat{V} - 45) = 82.06 + 373 \Rightarrow \hat{V} = 316 \frac{cm^3}{gmole}$$



د) ضریب متوسط تراکم پذیری و قانون دالتون

ماده	$T_c (K)$	$P_c$	$T_r = \frac{T}{T_c}$	$P_r = \frac{P_i \cdot y}{P_c}$	$Z$	$y_i \cdot Z_i$
$CH_4$	191	45.8	$\frac{373}{191} = 1.95$	$\frac{90 \times 0.2}{45.8} = 0.39$	0.99	$0.2 \times 0.99$
$C_2H_6$	283	50.9	$\frac{373}{283} = 1.32$	$\frac{90 \times 0.3}{50.9} = 0.53$	0.93	$0.3 \times 0.93$
$N_2$	126	33.5	$\frac{373}{126} = 2.96$	$\frac{90 \times 0.5}{33.5} = 1.34$	1	$0.5 \times 1$

$$Z_m = 0.977, n = 1$$

$$\Rightarrow P\hat{V} = Z_m RT \Rightarrow \hat{V} = \frac{Z_m \cdot RT}{P} = \frac{0.9777 \times 82.06 \times 373}{90} = 332 \frac{cm^3}{gmole}$$

ه) ضریب متوسط تراکم پذیری و قانون آماگات

ماده	$T_c (K)$	$P_c$	$T_r = \frac{T}{T_c}$	$P_r = \frac{P_i \cdot y}{P_c}$	$Z$	$y_i \cdot Z_i$
$CH_4$	191	45.8	$\frac{373}{191} = 1.95$	$\frac{90}{45.8} = 0.1.97$	0.97	0.194
$C_2H_6$	283	50.9	$\frac{373}{283} = 1.32$	$\frac{90}{50.9} = 1.78$	0.75	0.225
$N_2$	126	33.5	$\frac{373}{126} = 2.96$	$\frac{90}{33.5} = 2.68$	1.01	0.505

$$Z_m = 0.924, n = 1$$

$$P\hat{V} = Z_m RT \Rightarrow \hat{V} = \frac{Z_m RT}{P} = \frac{0.924 \times 82.06 \times 373}{90} = 313 \frac{cm^3}{gmole}$$

و) مقادیر شبه بحرانی

$$P'_c = y_{CH_4} P_{c_{CH_4}} + y_{C_2H_6} P_{c_{C_2H_6}} + y_{N_2} P_{c_{N_2}}$$

$$= 0.2 \times 45.8 + 0.3 \times 50.9 + 0.5 \times 33.5 = 41.2 atm$$

$$T'_c = y_{CH_4} T_{c_{CH_4}} + y_{C_2H_6} T_{c_{C_2H_6}} + y_{N_2} T_{c_{N_2}}$$

$$= 0.2 \times 191 + 0.3 \times 283 + 0.5 \times 126 = 186 K$$

$$\left. \begin{aligned} P'_r &= \frac{P}{P'_c} = \frac{90}{41.2} = 2.18 \\ T'_r &= \frac{T}{T'_c} = \frac{373}{186} = 20 \end{aligned} \right\} \Rightarrow Z_m = 0.97$$

$$\Rightarrow P\hat{V} = Z_m RT \Rightarrow \hat{V} = 328 \frac{\text{cm}^3}{\text{gmole}}$$

## فشاربخار (مهم)

**تعریف بخار:** به گازی که دمای آن پایین تر از دمای بحرانی باشد بخار گفته می شود زیرا قابلیت میعان دارد. توضیح اینکه، اگر گاز خالص را در یک دمای ثابت پایین تر از دمای بحرانی آن بطور مداوم متراکم کنیم در نهایت به فشاری خواهد رسید که گاز شروع به میعان خواهد کرد و تراکم بیشتر فشار گاز را افزایش نخواهد داد و تنها سبب میعان بیشتر گاز می شود.

**گاز:** در مواردی کلمه گاز اطلاق می شود که در بالای دمای بحرانی باشد.

**فشار بخار:** فشاری که در اثر تبخیر مولکول های یک ماده ی خالص ایجاد می شود فشاربخار آن ماده نامیده می شود (فشار بخار تابع دما و جنس ماده است)

- تبخیر و میعان در فشار و دمای ثابت تحولاتی تعادلی هستند و فشار حالت تعادل را فشار بخار می گویند.

- چنانچه یک جسم را در یک سیستم بسته قرار دهیم در اثر تبخیر ذرات آن جسم فشار سیستم افزایش می یابد تا در یک نقطه به حالت تعادل برسند این فشار را فشاربخار گویند.

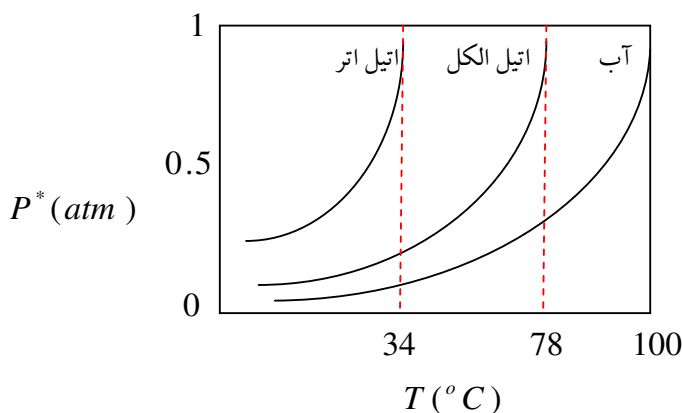
هرچقدر پیوند ذرات ماده ضعیف تر جنبش ذرات بیشتر و فراریت ماده نیز بیشتر باشد، فشاربخار آن نیز بیشتر است. با افزایش دما بدلیل افزایش جنب و جوش ذرات فشار بخار نیز افزایش می یابد.

- با استفاده از معادله آنتوان در ضمیمه G می توان فشار بخار هر ماده را در دمای دلخواه بدست آورد.

**نقطه جوش:** دمایی که در آن فشار بخار جسم با فشار محیط اطرافش برابر می شود.

**نقطه جوش نرمال:** نقطه جوش در فشار یک اتمسفر را نقطه ی جوش نرمال می نامند.

شکل زیر را در مورد مقایسه ی فشار بخار ماده آب ، اتیل الکل و اتیل اتر در نظر بگیرید:



همانگونه که مشاهده می شود هرچقدر ماده فرارتر باشد فشاربخار آن نیز بیشتر است و ضمناً از این گراف می توان نتیجه گرفت که نقطه جوش اتیل الکل و اتیل اتر در سطح دریا به ترتیب 78 و 34 درجه سانتیگراد می باشد .

با استفاده از این گراف ها می توان نقطه جوش مواد را در فشارهای مختلف پیش بینی کرد.

**تذکر:** از تغییر فشاربخار در اثر تغییر فشار صرف نظر می کنیم.

**پیدا کردن فشار بخار:** یکی از راه های پیدا کردن فشار بخار استفاده از گراف ها و راه دوم استفاده از معادله های تجربی مانند معادله آنتوان می باشد که در ضمیمه G کتاب هیمل بلاو ضرایب آن موجود می باشد.

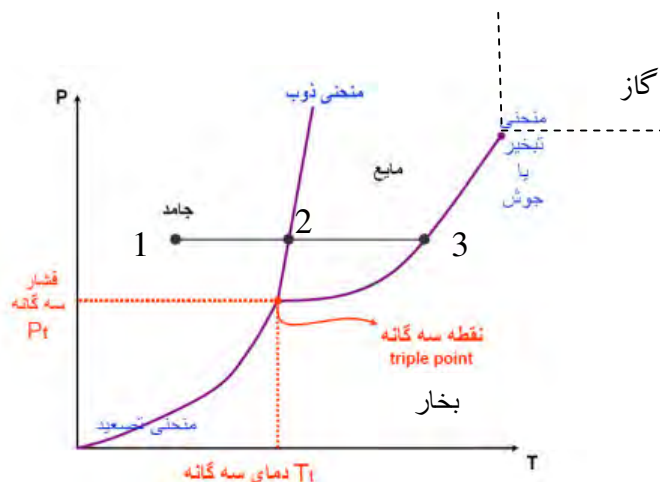
**نقطه ی حباب (Bubble Point):**

هنگامی که اولین حباب بخار در اثر اولین جوشش به وجود می آید دما نقطه ی حباب می نامند.

**نقطه ی شبنم (Dew point):**

در عمل میعان دمایی که در آن دما اولین قطره مایع بوجود می آید را نقطه شبنم می گویند.

## نکاتی پیرامون نمودار دما - فشار برای مواد خالص



**نکته ۱ -** از نقطه ۱ تا ۲ که گرما می دهیم صرف بالا رفتن دمای جسم می شود که چون آن را با افزایش دمای دما سنج حس می کنیم گرمای محسوس نامیده می شود.

**نکته ۲ -** در نقطه ۲ اولین قطره ی مایع بوجود می آید و از آن پس گرمایی که داده می شود صرف ذوب شدن می گردد نه افزایش دما. تا اینکه تمام ماده ذوب می شود. چون اثر این گرما را با دماسنج مشاهده نمی کنیم آن را گرمای نهان می نامند.

**نکته ۳ -** در طول عملیات ذوب دما ثابت است و همچنین دمای فاز مایع و جامد با هم برابر اند ، لذا نوعی تعادل ترمودینامیکی بین این دو فاز برقرار است.

**نکته ۴ -** دمای ذوب هر جسم ( مثل دمای جوش ) به فشار آن بستگی دارد ( همانگونه که در شکل واضح است ) و با تغییر فشار دمای ذوب هم تغییر می کند.

**نکته ۵ -** اگر روی منحنی ها قرار بگیریم دارای سیستم دوفازی هستیم ( به جز در لحظات آغاز و پایان تغییرات ) و هر دوفاز نیز در تعادل هستند یعنی دما و فشار برابر دارند.

**نکته ۶ -** اگر در نواحی بین منحنی ها قرار بگیریم فقط دارای یک فاز هستیم.

**نکته ۷ -** در نقطه ی سه گانه هر سه فاز جامد ، مایع و بخار با هم در تعادلند.

**نکته ۸ -** وقتی آخرین ذره جامد به مایع تبدیل شد وارد ناحیه مایع می شویم و از آن پس افزایش گرما باعث افزایش دما می شود. ( گرمای محسوس )

**نکته ۹ -** هنگامی که به منحنی تبخیر برخورد می کنیم ( نقطه ۳ ) اولین حباب بخار به وجود می آید دمای آن را دمای جوش می نامند.

**نکته ۱۰ -** در نقطه ۳ نیز افزایش دما متوقف می شود و گرمای داده شده صرف عمل تبخیر می شود.

( گرمای نهان )

**نکته ۱۱ -** در نقطه ۳ فاز مایع و بخار وجود دارد که باز هم با یکدیگر در حال تعادلند یعنی دما و فشار یکسان دارند.

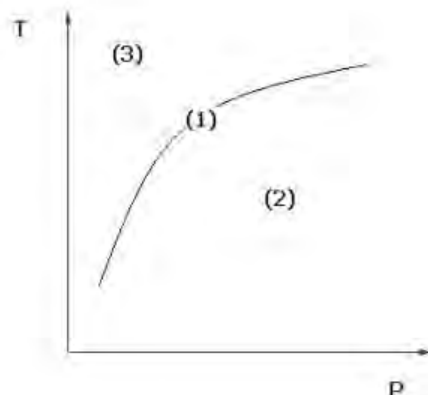
**نکته ۱۲ -** وقتی آخرین قطره مایع نیز تبخیر شد وارد ناحیه بخار می شود و از آن پس افزایش گرما باز هم افزایش دما را در پی خواهد داشت.

### حالت اشباع

نقاط موجود بر روی هر کدام از سه منحنی فوق را نقاط حالت اشباع می نامند.

چنانچه منحنی تبخیر را انتخاب کنیم:

( اکثر فرآیندهای مهندسی شیمی مربوط به این منحنی است ، ضمناً اگر جای محورهای  $T$  و  $P$  را عوض کنیم منحنی زیر حاصل خواهد شد )



با توجه به منحنی فوق سه حالت وجود دارد :

(۱) **حالت اشباع** : نقاطی که روی منحنی قرار دارند

(۲) **مایع مادون اشباع** : نقاطی که زیر منحنی اشباع قرار دارند. به این حالت مایع متراکم ، مایع مادون سرد و حالت sub cold نیز گفته می شود.

(۳) **بخار مافوق گرم** : نقاطی که بالای منحنی اشباع قرار می گیرند . به این حالت بخار مافوق اشباع ، مافوق گرم و بخار super heat نیز گفته می شود.

## کیفیت (x)

در حالت اشباع از آنجایی که در سیستم هم فاز مایع و هم فاز بخار وجود دارد مقدار  $x$  بیانگر درصدی از سیستم است که تبخیر شده است.

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$$

در رابطه قبل  $m_g$  جرم بخار و  $m_f$  جرم مایع می باشد.

ارتباط  $x$  با حجم مخصوص مایع و بخار اشباع :

$$\left. \begin{aligned} V_g &= m_g \cdot v_g \\ V_f &= m_f \cdot v_f \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_t = V_f + V_g = m_f \cdot v_f + m_g \cdot v_g$$

$$V_t = \frac{V_t}{m_t} = \frac{m_g v_g}{m_g + m_f} + \frac{m_f v_f}{m_g + m_f}$$

$$\Rightarrow V_t = x \cdot v_g + (1 - x) \cdot v_f$$

همچنین می توان نوشت :

$$h = xh_g + (1 - x)h_f$$

مثال : چنانچه در یک سیستم دوفازی از آب که در آن مایع و بخار به تعادل رسیده اند و دماسنج دمای 78 درجه ی فارنهایت را نشان می دهد مقدار 100 پوند آب از قبل در آن ریخته باشیم و حجم ظرف نیز 10000 فوت مکعب باشد آنتالپی کل ظرف را بدست آورید.

$$T = 78^\circ F$$

$$h_f = 46.03 \frac{Btu}{lb}$$

$$h_g = 1094.9 \frac{Btu}{lb}$$

$$v_f = 0.0160 \frac{ft^3}{lb}$$

$$v_g = 674.4 \frac{ft^3}{lb}$$

$$m_t = 100 lb$$

$$V_t = 10000 ft^3$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{10000}{100} = 100 \frac{ft^3}{lb}$$

$$v = (1 - x).v_f + x.v_g \Rightarrow 100 \frac{ft^3}{lb} = (1 - x)0.01607 + x.676.6 \frac{ft^3}{lb}$$

$$\Rightarrow x = 2.2 \times 10^{-4}$$

$$h = xh_g + (1 - x)h_g$$

$$h = 2.2 \times 10^{-4} (1094.9 \frac{Btu}{lb}) + (1 - 2.2 \times 10^{-4}) (46.09 \frac{Btu}{lb}) = 46.26 \frac{Btu}{lb}$$

عدد بدست آمده آنتالپی به ازای یک پوند را نشان می دهد. برای محاسبه ی آنتالپی کل داریم :

$$H_{total} = 100 \times 46.26 = 4626 \text{ Btu}$$

## جداول بخار اشباع (مهم)

جداول ترمو دینامیکی بر سه نوعند :

الف ) جدول اشباع

ب ) جدول مایع مادون اشباع

ج ) جدول بخار مافوق اشباع

دو جدول آخر یعنی جداول بخار مافوق اشباع و مایع مادون سرد در درس ترمودینامیک بررسی خواهند شد. در این مبحث فقط جدول اشباع آب را بررسی می کنیم.

## شماتیکی از جدول بخار اشباع ( ضمیمه C کتاب )

T	P	V <sub>f</sub>	V <sub>fg</sub>	V <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>
دما	فشار	حجم مخصوص مایع اشباع	مقدار انبساط در اثر تبخیر	حجم مخصوص بخار اشباع	آنتالپی مایع اشباع	گرمای نهان تبخیر	آنتالپی بخار اشباع

تذکر :

$$V_{fg} = V_g - V_f$$

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

**نکته ۱ -** چون دما و فشار جز خواص شدتی هستند و طبق قوانین ترمودینامیک چنانچه دو خاصیت شدتی جسم ثابت باشند سایر خواص نیز ثابت می شوند می توان در جدول بخار روبروی هر دما و فشار معین ، سایر خواص شدتی را نیز لیست کرد.

**نکته ۲ -** اگر دما و فشاری که از جدول اشباع می خواهیم بخوانیم در آن وجود نداشت می بایست دورنیابی کنیم.

**نکته ۳ -** اگر روی منحنی اشباع قرار نداشته باشیم ( مادون اشباع و یا مافوق اشباع ) به یک سری جدول دیگر نیاز است که در درس ترمودینامیک بررسی می شوند.

**نکته ۴ -** در صورت برخورد با مایع مادون اشباع می توان بطور تقریبی از خواص مایع اشباع در همان دما استفاده کرد.

مثال : چنانچه 5 پوند آب در یک ظرف سر بسته قرار دهیم و آنقدر حرارت دهیم که فقط 10٪ آن بصورت مایع باقی بماند و ضامنأحالت تعادل بین مایع و بخار در دمای 60 درجه فارنهایت حاصل شده باشد آنتالپی کل ظرف را بدست آورید.

$$H_{total} = H_{liquid} + H_{vapor} = m_f h_f + m_g h_g =$$

$$= 0.5 \times 27.07 + 4.5 \times 1087.2 = 4906.41 \text{ Btu}$$

مثال : آنتالپی مخصوص آب مایع اشباع در 61 درجه فارنهایت را با استفاده از اطلاعات جدول بخار اشباع آب بدس آورید .

با استفاده از درونیایی خطی :

$$X = 60 \rightarrow Y_{11} = 28.07$$

$$X_2 = 62 \rightarrow Y_2 = 30.06$$

دما  $X = h_f$  و  $Y = h_g$

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1)$$

$$\Rightarrow Y - 28.07 = \frac{30.06 - 28.07}{62 - 60} (X - 60)$$

$$\Rightarrow Y = 0.995 X - 31.63 \xrightarrow{X=61} Y = 29.335 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}$$

**تذکر :** عملیات درونیایی را می توان به کمک ماشین حساب به سادگی و با خطای کمتری انجام داد.



## تشخیص حالت اشباع ( یا مادون اشباع و یا مافوق اشباع )

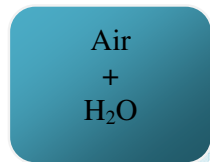
برای تشخیص این موضوع می توان بطور کلی گفت هر عاملی که به بلند شدن بخار در سیستم کمک کند حالت سیستم را به سمت مافوق گرم و در جهت خلاف آن به سمت مادون سرد پیش می برد. به عنوان مثال اگر در مسئله ای دما و فشار داده شود و دما را در جدول اشباع پیدا کنیم چنانچه فشار مسئله از فشار روبروی آن دما کمتر باشد نشان دهنده ی حالت مافوق اشباع است و یا اگر فشار مسئله را در جدول اشباع پیدا کنیم و دمای مسئله از دمای اشباع بیشتر باشد باز هم نشان دهنده ی حالت مافوق اشباع است. در خلاف این صورت ها حالت مادون اشباع داریم.

بنابراین یکی از داده ها را روی جدول اشباع فیکس می کنیم و داده ی دیگر را به عنوان متغیر با عدد درون جدول مقایسه می کنیم اگر داده های متغیر جزء خواصی از سیستم باشد که  $f$  یا  $g$  دارد مثل  $(h \text{ و } v)$  چنانچه داده ی مسئله از تغییر  $f$  در جدول کمتر باشد دارای حالت مادون سرد هستیم . اگر بزرگ تر از داده  $g$  باشد دارای حالت مافوق گرم هستیم و اگر بین این دو باشد دارای مخلوط بخار و مایع هستیم.

### ارتباط مول ، فشار ، حجم هوا و بخار آب

اگر هوا و بخار آب را بصورت مخلوط با یکدیگر داشته باشیم و بتوانیم آنها را مخلوط با یک گاز ایده آل فرض کنیم در این صورت هوا را هوای مرطوب نامیده و ارتباط زیر بین پارامتر آن برقرار خواهد بود :

$$\frac{P_{air}}{P_{H_2O}} = \frac{n_{air}}{n_{H_2O}} \Rightarrow \frac{V_{air}}{V_{H_2O}} = \frac{n_{air}}{n_{H_2O}}$$



$$\frac{P_{air}}{P_{H_2O}} = \frac{y_{air} \cdot P_t}{y_{H_2O} \cdot P_t} \quad (1) \quad \Rightarrow \quad \frac{P_{air}}{P_{H_2O}} = \frac{\frac{n_{air}}{n_t} \cdot P_t}{P_t} \quad (2)$$

$$(1), (2) \Rightarrow \frac{P_{air}}{P_{H_2O}} = \frac{P_{air}}{P_t - P_{air}} = \frac{V_{air}}{V_f - V_{air}}$$

مثال : در 400K و 2.45Kpa حجم ویژه ی یک بخار مرطوب برابر 0.505 مترمکعب بر کیلوگرم می باشد کیفیت بخار چیست ؟

$$^{\circ}F = 1.8^{\circ}C + 32 = 1.8(100 - 273) + 32 = 260.6^{\circ}F$$

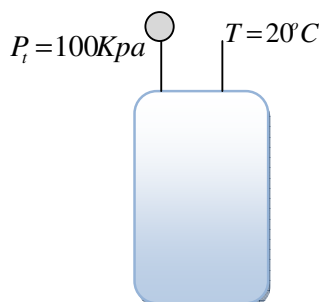
$$0.505 \frac{m^3}{Kg} \left| \frac{0.454 Kg}{1lbm} \right| \left| \frac{35.3 ft^3}{1m^3} \right| = 8.09 \frac{ft^3}{lbm}$$

$T$	$v_f$	$v_g$
260	0.01708	11.771
260.6	0.017086	11.66384
265	0.01713	10.875

با درونیابی خطی ←

$$V = xv_g + (1-x)v_f \rightarrow 8.09 = x(11.26384) + (1-x)(0.017086) \\ \Rightarrow x = 0.69$$

مثال : حداقل حجم هوای خشک بر حسب متر مکعب در 20 درجه ی سانتیگراد و 100 کیلوپاسکال را برای 6 کیلوگرم الکل لازم است را بدست آورید در صورتیکه فشار ثابت و برابر 100 کیلوپاسکال بوده و فشار بخار الکل در 20 درجه سانتیگراد نیز 5.93 کیلوپاسکال باشد .جرم مولکولی الکل را 64 فرض کنید.



$$P_t = P_{air} + P_{alch} \Rightarrow P_{air} = 100 - P_{alch} = 100 - 5.93 = 94.07 \text{ Kpa}$$

$$\frac{P_{air}}{P_{alch}} = \frac{n_{air}}{n_{alch}} \Rightarrow n_{air} = \frac{\frac{6}{49} \times 94.07}{5.93} = 2.07 \text{ Kmole}$$

$$P_{air} \cdot V_{air} = n_{air} RT \Rightarrow V_{air} = \frac{2.07 \times 10^3 \times 8.314 \times 293}{94.07 \times 10^3} = 53.06 \text{ m}^3$$

**تعادل گاز – مایع در سیستم های چندتایی (V.L.E)**

**قانون راولت**

$$P_i = P_i^* \cdot x_i$$

$$P_i = P_t \cdot y_i \text{ : از قانون دالتون داشتیم}$$

از قانون دالتون و راولت می توان نتیجه گرفت :

$$P_i^* x_i = P_t \cdot y_i$$

مثال : فشار بخار تولوئن و اورترزایلن در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد داده شده است. اگر فشار جو ۰.۵ اتمسفر باشد ترکیب محلولی را که در ۹۰ درجه می جوشد حساب کنید. ترکیب بخار تولید شده را نیز بدست آورید .

$$P_t^* = 400 \text{ mmHg}$$

$$P_o^* = 150 \text{ mmHg}$$

$$P_{total} = P_t + P_o = x_t \cdot P_t^* + x_o \cdot P_o^* = x_t P_t^* + (1 - x_t) \cdot P_o^*$$

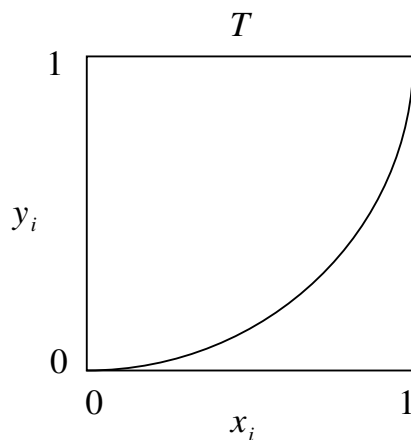
$$\Rightarrow \frac{760}{2} = 400 \cdot x_t + (1 - x_t) \cdot 150 \Rightarrow \begin{cases} x_t = 0.92 \\ x_o = 0.08 \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_t = y_t \cdot P_{total} \\ P_t = x_t \cdot P_t^* \end{cases} \Rightarrow y_t \cdot P_{total} = x_t \cdot P_t^* \Rightarrow y_t = \frac{0.92 \times 400}{\frac{760}{2}} = 0.968$$

$$\Rightarrow y_o = 1 - y_t = 0.032$$

**تذکر:** چنانچه غلظت ماده i کم باشد خطای قانون راولت بالا می رود و در این صورت می توان از قانون هنری استفاده کرد.

**نکته:** با استفاده از نتیجه تلفیق قوانین راولت و دالتون می توان گراف هایی همچون گراف زیر رسم نمود.



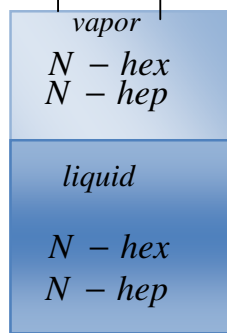
**نکته:** ثابت تعادل در سیستم های تعادلی بخار مایع به شکل زیر برای هر ماده تعریف می شود که شاخص میزان فراریت هر ماده است.

$$K_i = \frac{y_i}{x_i}$$

**نکته:** قانون راولت در مواردی که پیوند بین اجزا با یکدیگر تفاوت فاحشی داشته باشد و یا اینکه یک ماده خیلی رقیق باشد دارای خطای زیادی است.

مثال: می خواهیم مخلوطی از نرمال هپتان را در فاز مایع تبخیر کنیم ترکیب نسبی حاصل از بخار را در حالت تعادل تعیین کنید. در صورتیکه فشار کل 1atm و ثابت و دمای حالت تعادل 121 درجه سانتیگراد فرض شود

$$P = 1 \text{ atm} \quad T = 121^\circ \text{ C}$$



از تلفیق قانون راولت و دالتون داریم:

$$\begin{cases} x_{hex} \cdot P_{hex}^* = y_{hex} \cdot P_t \\ x_{hep} \cdot P_{hep}^* = y_{hep} \cdot P_t \\ x_{hex} + x_{hep} = 1 \\ y_{hex} + y_{hep} = 1 \end{cases}$$

با استفاده از ضمیمه G کتاب ضرایب معادله آنتوان بدست خواهد آمد که با جایگذاری در رابطه ی آنتوان ( $\ln P^* = A - \frac{B}{T + C}$ ) دستگاه معادلات فوق قابل حل خواهد بود.

## قانون هنری

$$P_i = H_i \cdot x_i$$

$H_i$  ثابت هنری است که در صورت مسئله داده می شود.

از تساوی قانون هنری و دالتون می توان نتیجه گرفت:

$$H_i \cdot x_i = P_t \cdot y_i$$

**تذکر:** محلول های رقیق ایده آل محلول هایی هستند که حلال از رابطه ی راولت و حل شونده از رابطه ی هنری تبعیت می کند.

## اشباع جزئی

چنانچه به دلیل کمبود وقت دو فاز مایع و بخار را نتوانیم به اندازه ای با هم تماس دهیم که حالت اشباع حاصل شود به اشباع کامل نخواهیم رسید و آن را اشباع جزئی می نامیم.

در حالت اشباع داریم  $P_A = P_A^*$  اما در حالت واقعی بدلیل نبود زمان کافی خواهیم داشت:  $P_A < P_A^*$  در این حالت اشباع جزئی رخ داده است.

## طریقه بیان اشباع جزئی

$$1- \text{اشباع نسبی: } \frac{P_A}{P_A^*}$$

$$2- \text{اشباع مولی: } \frac{P_A}{P_t - P_A}$$

$$3- \text{اشباع مطلق: } \frac{\frac{P_A}{P_t - P_A}}{\frac{P_A^*}{P_t - P_A^*}} \text{ که بیانگر نسبت اشباع مولی به اشباع مولی در حالت تعادل می باشد.}$$

**نکته:** چنانچه گازی که می خواهیم پذیرای ذرات تبخیر شده باشد هوا و ماده ای که می خواهیم تبخیر کنیم آب باشد ، در تمام عبارات فوق از کلمه رطوبت استفاده می کنیم.



فصل چهارم :

# موازنه انرژی

## تعریف انرژی

استعداد تأثیر گذاری یک سیستم بر روی محیط خودش را انرژی آن سیستم می گویند.

## انواع اصلی انرژی عبارتند از :

- گرما (Q)
- کار (W)
- انرژی داخلی (درونی) (U)
- انرژی پتانسیل (  $E_p$  )
- انرژی جنبشی (  $E_k$  )

## کار ( W )

کار از دیدگاه مکانیکی حاصلضرب نیرو در جابجایی است. (  $W=F.d$  ) یا (  $dw=F.dl$  ) ولی از دیدگاه ترمودینامیکی کار شامل انرژی در حال انتقال به یکی سیستم یا از یک سیستم است بر اثر هر فرآیندی بطوریکه بتوان اثر خارجی آن را با مکانیزم های اصطکاک فرضی بطور کامل بر اثر بلند کردن یک جرم در یک میدان گرانشی بیان کرد.

$$W = F.l$$

$$dW = F.dl$$

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow F = P.A$$

$$V = A.l$$

$$dV = A.dl$$

$$dW = P.A \times \frac{dV}{A} \Rightarrow dW = p.dV$$

$$\Rightarrow W = \int_{V_1}^{V_2} P.dV$$



## گرما (Q)

گرما شکلی از انرژی در حال حرکت است که در اثر اختلاف دما بوجود می آید.

$$Q = mC \Delta T$$

ظرفیت گرمایی ویژه جسم (C): مقدار گرمای لازم برای تغییر دمای واحد جرم جسم به میزان ۱ درجه

دیمنسون C:

$$[C] = \frac{[Q]}{[m][T]}$$

$$SI : C \quad \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$$

$$Eng : C \quad \frac{Btu}{lb_m \cdot ^\circ F}$$

انواع ظرفیت گرمایی :

$C_P$ : ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت

$C_V$ : ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت

تابعیت C:

C تابعی از دما و فشار است

نکته ۱- در فشار ثابت فقط تابع دما است.

نکته ۲- تا خلاف آن گفته نشده C را  $C_P$  در نظر می گیریم.

لذا داریم:  $C_p = f(T)$  ، که f بوسیله آزمایش بدست می آید.

برای برخی مواد f به صورت زیر بدست می آید:

$$C_p = \alpha + \beta.T + \gamma.T^2$$

و برای برخی دیگر:

$$C_p = a + b.T + c.T^{-2}$$

$a, b, c, \gamma, \beta, \alpha$  : ضرایب ثابتی هستند که برای هر ماده بوسیله آزمایش مشخص می شوند و در ضمیمه E کتاب موجود هستند.

$$Q = m.C.\Delta T$$

$$dQ = d(m.C.T)$$

T : دما

چنانچه m ثابت باشد.

$$dQ = m.C.dT$$

$$\int dQ = \int m.C.dT$$

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C.dT$$

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C.dT$$

چون C تابع دما است باید در انتگرال بماند.

مثال : اگر جسمی با ظرفیت حرارتی  $C = \alpha + \beta T + \gamma T^2$  داده شود و بخواهیم یک کیلو گرم از آن را از  $T_1$  به  $T_2$  برسانیم داریم :

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} (\alpha + \beta.T + \gamma.T^2) dT = m[\alpha(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{\gamma}{3}(T_2^3 - T_1^3)]$$

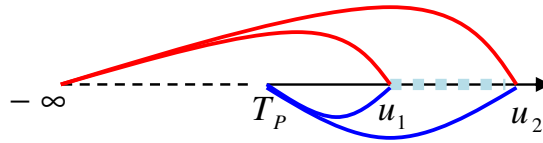
### انرژی داخلی:

مجموع انرژی های پتانسیل و جنبشی ذرات میکروسکوپی هر جسم را انرژی داخلی آن جسم می نامند.

$$C_v = \left(\frac{du}{dT}\right)_v \quad \frac{du}{dT} = C_v \quad du = C_v.dT$$

$$\Rightarrow \Delta u = \int_{T_1}^{T_2} C_v.dT$$

از آنجایی که انرژی داخلی هیچگاه صفر نمی شود بنابراین مبنای صفر آن مشخص نیست و برای حل این مشکل از یک دمای مبنای فرضی استفاده می شود.



## آنتالپی

همان انرژی داخلی با احتساب کار میکروسکوپی گرفته شده یا داده شده

$$h = u + PV$$

$$C_p = \left( \frac{dh}{dT} \right)_p \quad dh = C_p \cdot dT$$

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

دمای مبنا و ... برای h هم صادق است.

مثال :

الف) با استفاده از ضمیمه E آخر کتاب معادله ی ظرفیت حرارتی گاز متان را بنویسید.

ب) اگر دمای گاز متان از 100 درجه ی سانتیگراد به 500 درجه ی سانتیگراد افزایش یابد ، تغییر آنتالپی گاز متان را محاسبه کنید.

الف :

$$C_p = a + b(T) + c(T)^2 + d(T)^3$$

$$C_p = 34.31 + 5.469 \times 10^{-2} T + 0.3661 \times 10^{-5} T^2 - 11 \times 10^{-9} T^3$$

ب :

$$\Delta h = \int_{100}^{500} (34.31 + 5.469 \times 10^{-2} T + 0.3661 \times 10^{-5} T^2 - 11 \times 10^{-9} T^3) dT$$

$$\Rightarrow \Delta h = 20266.52133 \frac{J}{gmole}$$

روشهای به کار رفته در مثال فوق بهترین روش ها برای محاسبه ی ظرفیت حرارتی و آنتالپی هستند. ولی در صورت عدم وجود چنین اطلاعاتی از یک سری روابط تجربی که دقت کمتری دارند می توان بهره برد.

**انرژی پتانسیل**

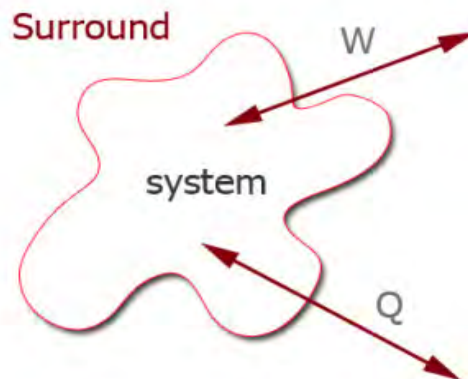
$$E_p = m \cdot g \cdot z$$

**انرژی جنبشی**

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

**تذکر:** W و Q انرژی های در حال حرکت هستند و به عبارتی دیگر چنانچه انرژی بخواهد از یک نقطه به نقطه ی دیگر منتقل شود بوسیله ی این دو خواهد بود. درحالیکه انرژی داخلی ( آنتالپی ) و انرژی های جنبشی و پتانسیل انرژی های قابل ذخیره سازی هستند و چنانچه انرژی بخواهد در سیستمی ذخیره شود می بایست حتماً به یکی از این سه صورت تبدیل گردد.

## قانون اول ترمودینامیک



$\Delta E_{system}$  تغییر انرژی سیستم در اثر فرآیند

$\Delta E_{surround}$  تغییر انرژی محیط در اثر فرآیند

$$\begin{cases} \Delta E_{sys} = -\Delta E_{surr} \\ \Delta E_{sys} = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_k \\ \Delta E_{surr} = \pm Q \pm W \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_k = \pm Q \pm W$$

**قرارداد:** گرمای داده شده به سیستم (+)، گرفته شده از سیستم (-)، کار انجام شده روی سیستم (-)، انجام شده توسط سیستم (+)

## بیان ریاضی قانون اول ترمودینامیک

$$\Delta U + \Delta E_p + \Delta E_k = Q - W$$

فرم دیگری از قانون اول ترمودینامیک که برای سیستم های باز مناسب تر است:

$$W = \int P dV + W_s$$

$$= P \Delta V + W_s$$

$$\int P dV = \int_{P_1 V_1}^{P_2 V_2} d(PV) = P_2 V_2 - P_1 V_1 \quad \text{از طرفی:}$$

$$\Rightarrow Q - [(P_2 V_2 - P_1 V_1) + W_s] = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_k$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad \text{میدانیم که:}$$

پس می توان رابطه فوق را به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$Q - W_s = \underbrace{(U_2 + P_2 V_2)}_{H_2} - \underbrace{(U_1 + P_1 V_1)}_{H_1} + \Delta E_p + \Delta E_k$$

$$\Rightarrow Q - W_s = \Delta H + \Delta E_p + \Delta E_k$$

**تذکر:** نشان دادن متغیر های ترمودینامیکی با حرف بزرگ به منزله بیان برای واحد مول و با حرف کوچک به منزله بیان برای واحد جرم است.

بررسی مثال ۴-۳ کتاب- قسمت ب):

معادله ی ظرفیت حرارتی گاز دی اکسید کربن عبارت است از:

$C_p = 6.393 + 10.1 \times 10^{-3} T - 3.405 \times 10^{-6} T^2$   
 که  $C_p$  بر حسب  $\frac{Cal}{(gmole)(K)}$  و  $T$  بر حسب کلون می باشد. معادله ی فوق را بصورتی در آورید  
 که ظرفیت حرارتی را در تمام فاصله ی دما بر حسب واحد زیر بدست دهد:

$Btu/(lbmole)(^{\circ}F)$  with  $T$  in  $^{\circ}F$  and  $\Delta T$  in  $\Delta^{\circ}F$

$$\left\{ \begin{array}{c} T(K) \\ C_p(\frac{Cal}{gmole.K}) \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{c} T(^{\circ}F) \\ C_p(\frac{Btu}{lbmole.^{\circ}F}) \end{array} \right\}$$

حل:

$$^{\circ}F = 1.8^{\circ}C + 32 = 1.8 \times (K - 273) + 32$$

$$\Rightarrow K = \frac{{}^{\circ}F - 32}{1.8} + 273$$

$$C_p = 6.393 + 10.1 \times 10^{-3} \left( \frac{T^{\circ}F - 32}{1.8} + 273 \right) - 3.405 \times 10^{-6} \left( \frac{T^{\circ}F - 32}{1.8} + 273 \right)^2$$

$$\times \left( \frac{Cal}{gmole.K} \mid \frac{4.18J}{1Cal} \mid \frac{1Btu}{1055J} \mid \frac{454gmole}{1lbmole} \mid \frac{1K}{1.8^{\circ}F} \right)$$

## ارتباط $C_p, C_v$ در گازهای ایده آل

بررسی مثال ۴-۴ کتاب:

نشان دهید که برای گازهای کامل یک اتمی رابطه  $C_p = C_v + \hat{R}$  صادق است.

حل:

قانون اول ترمودینامیک:

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_K$$

اگر بتوان از  $\Delta E_K, \Delta E_p$  صرف نظر کرد:

$$Q - W = \Delta U$$

$$dQ - dW = dU$$

$$\left. \begin{array}{l} C_p dT - PdV = C_v dT \\ PV = RT \Rightarrow PdV = RdT \end{array} \right\} \Rightarrow C_p dT - RdT = C_v dT \Rightarrow C_p - C_v = R$$

## استفاده از ظرفیت حرارتی متوسط در محاسبه $\Delta h$

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = C_{pm} \int_{T_1}^{T_2} dT = C_{pm} (T_2 - T_1) = C_{pm} \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p dT}{T_2 - T_1}$$

در صورتیکه  $C_{pm}$  در جداولی لیست شده باشند با توجه به مورد فوق الذکر می توان بدون انتگرال گیری مسئله را حل کرد.

مثال- مطلوب است تغییر آنتالپی یک کیلومول ازت (نیتروژن) که در فشار ثابت ۱۰۰ kpa از ۱۸ درجه سانتیگراد تا ۱۱۰۰ درجه حرارت داده می شود.

$$\Delta h_{N_2} = \Delta h_{N_2} - \Delta h_{N_2}$$

18 → 1100
1100
18

$$= C_{pm} (1100 - T_0) - C_{pm} (18 - T_0)$$

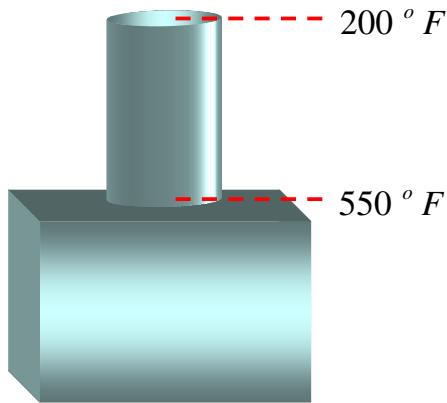
=0
=0

$$= 31.593 (1100 - 0) - 29.12 (18 - 0) = 34228.14 \frac{J}{gmole \cdot K}$$



## محاسبه آنتالپی برای مخلوط ها

بررسی مثال ۷-۴ کتاب



آنالیز گاز:  $CO_2 : 9.2\%$

$CO : 1.5\%$

$N_2 : 82\%$

$O_2 : 7.3\%$

راه حل اول:

Base : 1lbmole of mix

$$\Delta H_{mix} = n_{CO_2} \Delta \hat{H}_{CO_2} + n_{CO} \Delta \hat{H}_{CO} + n_{O_2} \Delta \hat{H}_{O_2} + n_{N_2} \Delta \hat{H}_{N_2}$$

$\frac{0.092}{0.015}$ 
 $\frac{0.073}{0.82}$

$$\Delta \hat{H}_{CO_2} = \int_{550}^{200} C_{PCO_2} .dT = C_{Pm} (200 - T_0) - C_{Pm} (550 - T_0)$$

$$= 9.91(200 - 32) - 9.95(550 - 32)$$

مقادیر  $C_{Pm}$  از جدول صفحه ۴۳۰ کتاب خوانده شده و مقدار ۹.۹۵ از طریق درونیابی بدست آمده است.

به همین ترتیب آنتالپی سایر اجزا محاسبه خواهد شد.

راه حل دوم:

Base : 1lbmole of mix

از  $C_{Pmix}$  استفاده می کنیم:

$$C_{Pmix} = \sum_{i=1}^n y_i C_{Pi} = y_{CO_2} .C_{PCO_2} + y_{CO} C_{PCO} + y_{O_2} C_{PO_2} + y_{N_2} C_{PN_2}$$

از جدول ضمیمه E صفحه 735 داریم :

$$C_{PCO_2} = 8.448 + 5.757 \times 10^{-3}T - 21.59 \times 10^{-7}T^2$$

$$C_{PCO} = 6.865 + 0.8024 \times 10^{-3}T - 0.7367 \times 10^{-7}T^2$$

$$C_{PO_2} = 7.104 + 0.7851 \times 10^{-3}T - 0.5528 \times 10^{-7}T^2$$

$$C_{PN_2} = 6.85 + 0.7624 \times 10^{-3}T - 0.7009 \times 10^{-7}T^2$$

که  $T(^{\circ}F)$ ,  $C_p \left( \frac{Btu}{lbmole \cdot ^{\circ}F} \right)$  می باشد.

$$C_{pmix} = 0.092 \times (8.448 + 5.757 \times 10^{-3}T - 21.59 \times 10^{-7}T^2) + 0.015 \times (6.865 + 0.8024 \times 10^{-3}T - 0.7367 \times 10^{-7}T^2) + \dots + \dots$$

که نهایتاً معادله به فرم  $a + bT + cT^2$  خواهد شد که با جایگذاری مقدار T جواب نهایی حاصل می گردد.

### محاسبه آنتالپی با استفاده از جداول آنتالپی

برخی جداول وجود دارند که آنتالپی گازها (یا سایر مواد) را مستقیماً در هر دما داده اند و دیگر نیازی به استفاده از ظرفیت حرارتی نداریم و یا در برخی از کتب مرجع ترمودینامیکی نمودارهایی وجود دارد که مقادیر آنتالپی را بر حسب دما، فشار، یا حتی خواص حجمی داده اند (در کاربرد این جداول و منحنی ها باید به محدودیت آنها توجه شود)

جداول (۴-الف) و (۴-ب) صفحات ۴۳ و ۴۴

**تذکر:** مثال ۹-۴ کتاب در این زمینه مطالعه شود.

با استفاده از معادله ی کلازیوس – کلاپیرون با داشتن فشار بخار یک ماده در دو دمای متفاوت می توان گرمای نهان تبخیر آن ماده در دماهای نزدیک آن دما بدست آورد.  
با استفاده از معادله ی واتسون می توان با داشتن گرمای نهان تبخیر در یک دمای گرمای نهان تبخیر در دمای دیگر را بدست آورد.

## پیدا کردن آنتالپی از جداول بخار

مثال - آنتالپی آب را در شرایط زیر با استفاده از جداول بخار اشباع بدست آورید.

الف - بخار اشباع در ۸۰ درجه فارنهایت

ب - مایع اشباع در ۱۲۰ درجه فارنهایت

ج - مخلوط مایع و بخار اشباع در ۸۰ درجه فارنهایت

الف) با استفاده از جدول صفحه ۷۱۸ ضمیمه C

$$8. 1095 \Rightarrow \text{بخار اشباع در } 80 \text{ درجه فارنهایت}$$

(ب)

$$87.91 \Rightarrow \text{مایع اشباع در } 120 \text{ درجه فارنهایت}$$

(ج)

$$h = xh_g + (1 - x)h_{fg}$$

مثال - مخلوطی از مایع و بخار آب در ۲۰۰ درجه فارنهایت داریم. جرم مجموع آنها ۱۰ پوند و حجم ظرف ۲۰ فوت مکعب است. آنتالپی مخلوط چقدر است؟

$$h = xh_g + (1 - x)h_f$$

$$\text{at } 200^\circ F \xrightarrow{\text{از جدول بخار}} \begin{cases} h_g = 1145.8 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} \\ h_f = 167.99 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}} \end{cases}$$

اما  $x = ?$

از سایر داده های مسئله برای پیدا کردن X استفاده می کنیم.

$$V = \frac{v}{m} = \frac{200 \text{ ft}^3}{10 \text{ lbm}} = 20 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbm}}$$

$$\text{at } 200^\circ F \xrightarrow{\text{از جدول بخار}} \begin{cases} V_g = 33.67 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbm}} \\ V_f = 0.01663 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbm}} \end{cases}$$

باتوجه به اینکه  $33.67 < 20 < 0.01663$  است پس حالت اشباع داریم:

$$V = xV_g + (1 - x)V_f$$

$$20 = x(33.67) + (1 - x)(0.01663) \Rightarrow x = 0.59$$

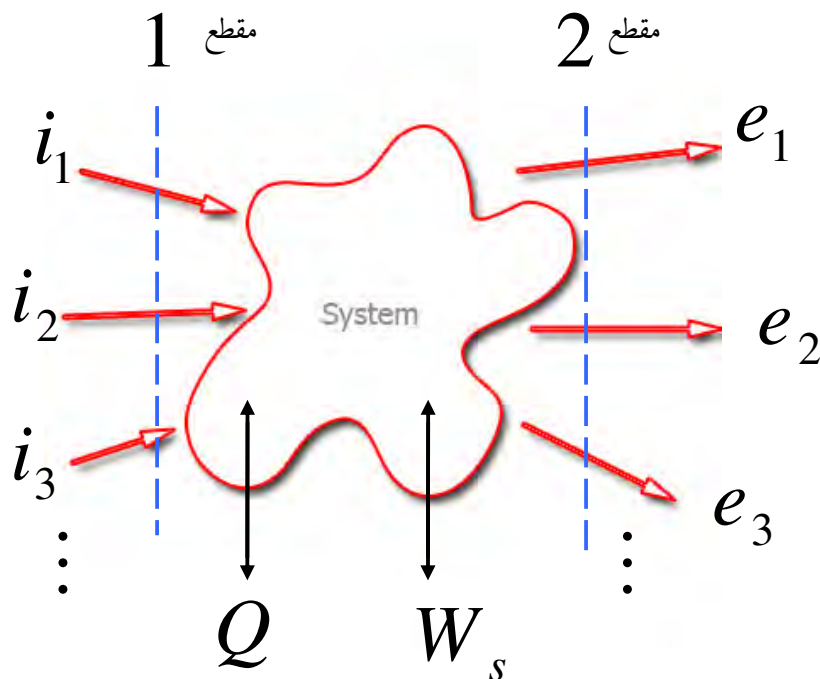
$$h = 0.59 \times 1145.8 + (1 - 0.59)(167.99) = 744.9 \frac{Btu}{lbm}$$

$$H_{total} = mh = 10 \times 744.9 = 7449 \text{ Btu}$$

## موازنه عمومی انرژی (Energy Balance)

قانون اول ترمودینامیک در حقیقت برقراری موازنه انرژی حول سیستم است و می توان حول هر سیستم یا زیرسیستم آنرا برقرار کرد.

برای عمومیت دادن به آن قانون و با توجه به شکل زیر می توان نوشت:  
(فعال سیستم های بدون واکنش شیمیایی را در نظر می گیریم)



$u$  سرعت هر جریان

$Z$  ارتفاع هر جریان

برای مثال  $u_{e1}$  بیانگر سرعت جریان یکم در خروجی است.

$$Q - W_s = \underbrace{(H_2 - H_1)}_{\Delta H} + \underbrace{(E_{K2} - E_{K1})}_{\Delta E_K} + \underbrace{(E_{P2} - E_{P1})}_{\Delta E_P}$$

$$H_2 = H_{e1} + H_{e2} + H_{e3} + \dots = m_{e1}.h_{e1} + m_{e2}.h_{e2} + \dots$$

$$H_1 = H_{i1} + H_{i2} + H_{i3} + \dots = m_{i1}.h_{i1} + m_{i2}.h_{i2} + \dots$$

$$E_{K2} = E_{Ke1} + E_{Ke2} + E_{Ke3} + \dots = \frac{1}{2} m_{e1}.u_{e1}^2 + \frac{1}{2} m_{e2}.u_{e2}^2 + \dots$$

$$E_{K1} = E_{Ki1} + E_{Ki2} + E_{Ki3} + \dots = \frac{1}{2} m_{i1}.u_{i1}^2 + \frac{1}{2} m_{i2}.u_{i2}^2 + \dots$$

$$E_{P2} = E_{Pe1} + E_{Pe2} + E_{Pe3} + \dots = m_{e1}.g.z_{e1} + m_{e2}.g.z_{e2} + \dots$$

$$E_{P1} = E_{Pi1} + E_{Pi2} + E_{Pi3} + \dots = m_{i1}.g.z_{i1} + m_{i2}.g.z_{i2} + \dots$$

شش رابطه ی اخیر را در قانون اول جایگذاری می کنیم :

$$Q - W_s = \left( \sum_{j=1}^n m_{ej}.h_{ej} - \sum_{j=1}^m m_{ij}.h_{ij} \right) + \left( \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n m_{ej}.u_{ej}^2 - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m m_{ij}.u_{ij}^2 \right) + \left( g \sum_{j=1}^n m_{ej}.z_{ej} - g \sum_{j=1}^m m_{ij}.z_{ij} \right)$$

**تذکر ۱:** در رابطه ی فوق  $Q$  و  $W_s$  برآیند کل گرما و کارهای شافتی هستند ( با حفظ قرارداد مربوطه )

**تذکر ۲:** رابطه ی فوق یک رابطه ی کلی است و در موارد خاص می توان آنرا ساده نمود.

**تذکر ۳:** در مواردیکه واکنش اتفاق نیفتد معمولاً  $m_{ej} = m_{ij}$  است. یعنی هرچقدر از هرماده وارد سیستم شده می بایست خارج هم بشود.

بنابراین رابطه ی فوق ساده می شود ( پس  $n=m$  خواهد شد )

## موازنه انرژی همراه با واکنش های شیمیایی

**نکته ۱ -** وقتی که واکنش شیمیایی انجام می شود بسته به گرمازا یا گرماگیر بودن واکنش مقداری انرژی از سیستم جذب یا دفع می شود (داده یا گرفته می شود) که باید آنرا در محاسبات لحاظ کنیم.

**نکته ۲ -** گرمای واکنش در حقیقت یک تغییر آنتالپی است (بین مواد اولیه و محصولات) نه انتقال حرارت

### نکته ۳ - نحوه لحاظ کردن تغییرات انرژی حاصل از واکنش در موازنه انرژی :

برای این منظور به آنتالپی هر سازنده یک کمیت مشخص که گرمای استاندارد تشکیل است (آنتالپی مولی استاندارد تشکیل)  $(\Delta \hat{H}_f^o)$  می افزاییم. به عبارت دیگر :

$$\Delta \hat{H}_A = \Delta \hat{H}_{fA}^o + \int_{T_0}^T C_{pA} dT$$

و برای مخلوط چند جسم :

$$\Delta H_{mix} = \sum_{i=1}^n n_i \cdot \Delta \hat{H}_{fi}^o + \sum_{i=1}^n \int_{T_{ref}}^T n_i C_{pi} dT$$

### تحلیل نکته ۳: (مهم)

چرا در بخش قبل که فرآیند ها بدون واکنش شیمیایی بودند حرفی از  $\Delta \hat{H}_f^o$  نزدیم ؟  
دو فرآیند که یکی با واکنش و دیگری بدون واکنش است را در نظر بگیرید :

### بدون واکنش شیمیایی



$$\Delta H = \Delta H_{out} - \Delta H_{in}$$

$$\Delta H_{in} = (\Delta H_A + \Delta H_B)_{in} =$$

$$(n_A \cdot \hat{H}_{fA}^o + \int_{T_0}^{T_{in}} n_A C_{PA} dT) +$$

$$(n_B \cdot \hat{H}_{fB}^o + \int_{T_0}^{T_{in}} n_B C_{PB} dT) =$$

$$(\Delta H_{fA}^o + \Delta H_{fB}^o) + \int_{T_0}^{T_{in}} (n_A C_{PA} + n_B C_{PB}) dT$$

$$\Delta H_{out} = (\Delta H_A + \Delta H_B)_{out} =$$

$$(\Delta H_{fA}^o + \Delta H_{fB}^o) + \int_{T_0}^{T_{out}} (n_A C_{PA} + n_B C_{PB}) dT$$

$$\Delta H = \int_{T_0}^{T_{out}} (n_A C_{PA} + n_B C_{PB}) dT +$$

$$\int_{T_{in}}^{T_0} (n_A C_{PA} + n_B C_{PB}) dT$$

$$\Rightarrow \Delta H = \int_{T_{in}}^{T_{out}} (n_A C_{PA} + n_B C_{PB}) dT$$

پس جملات مربوط به  $\hat{H}_f^o$  خودبه خود حذف می شود.

### همراه با واکنش شیمیایی



$$\Delta H = \Delta H_{out} - \Delta H_{in}$$

$$\Delta H_{in} = (\Delta H_A + \Delta H_B)_{in} =$$

$$(n_A \cdot \hat{H}_{fA}^o + \int_{T_0}^{T_{in}} n_A C_{PA} dT) +$$

$$(n_B \cdot \hat{H}_{fB}^o + \int_{T_0}^{T_{in}} n_B C_{PB} dT) =$$

$$(\Delta H_{fA}^o + \Delta H_{fB}^o) + \int_{T_0}^{T_{in}} (n_A C_{PA} + n_B C_{PB}) dT$$

$$\Delta H_{out} = (n_D \cdot \hat{H}_{fD}^o) + \int_{T_0}^{T_{out}} n_D C_{PD} dT$$

$$\Rightarrow \Delta H = \overbrace{(n_D \cdot \hat{H}_{fD}^o - n_A \cdot \hat{H}_{fA}^o - n_B \cdot \hat{H}_{fB}^o)}^{\Delta H_r^o} + \int_{T_0}^{T_{out}} n_D C_{PD} dT - \int_{T_0}^{T_{out}} (n_A C_{PA} + n_B C_{PB}) dT$$

مشاهده می شود که در اینجا آنتالپی های تشکیل حذف نمی شوند و  $\Delta H_r^o$  آنتالپی واکنش نامیده می شود.

اگر دمای ورودی و خروجی یکی باشند داریم:

$$\Delta H = (n_D \cdot \hat{H}_{fD}^o - n_A \cdot \hat{H}_{fA}^o - n_B \cdot \hat{H}_{fB}^o) +$$

$$\int_{T_0}^T (n_D C_{PD} - n_A C_{PA} - n_B C_{PB}) dT$$

**تذکر:** اگر دمای ورودی و خروجی مساوی بودند دو انتگرال را می توانیم ادغام کنیم.

همانگونه که دیده می شود اگر واکنش شیمیایی اتفاق نیفتد آنتالپی های استاندارد تشکیل از طرفین ساده می شوند و لذا نیازی به استفاده از آنها نبود ولی در صورتی که واکنش اتفاق بیفتد می بایست آنها را در نظر بگیریم.

**تذکر:** به واحدهای زیر توجه کنید :

$$\Delta H \left\{ \begin{array}{l} \frac{kJ}{\text{mole}} \\ \frac{Btu}{\text{lbmole}} \end{array} \right. \quad \Delta \hat{H} \left\{ \begin{array}{l} \frac{kJ}{\text{gmole}} \\ \frac{Btu}{\text{lbmole}} \end{array} \right. \quad \Delta h \left\{ \begin{array}{l} \frac{kJ}{\text{kg}} \\ \frac{Btu}{\text{lbm}} \end{array} \right.$$

**نکته ۴ -** با توجه به نکته قبل ما نیاز به دانستن گرمای استاندارد تشکیل داریم و در صورت لحاظ نمودن آنها در محاسبات گرمای واکنش خودبه خود در محاسبات لحاظ می شود.

**نکته ۵ -** روش ها ، نکات و استاندارد های مربوط به آنتالپی استاندارد تشکیل از صفحه ۴۸۷ کتاب مطالعه شود.

**نکته ۶ -** از آنجایی که محاسبه گرمای استاندارد مواد ممکن است مشکل و پیچیده باشد گاهی از گرمای استاندارد احتراق استفاده می شود .

در این زمینه توضیحات صفحه ی ۴۹۲ کتاب مطالعه شود.

گرمای استاندارد تشکیل مواد در ضمیمه F کتاب موجودند.

**نکته ۷ -**

### ارزش حرارتی سوخت

مقدار گرمای آزاد شده به ازای احتراق واحد جرم یا مول و یا حجم سوخت را گویند.



انواع ارزش حرارتی :

الف - ارزش حرارتی بالا ( ناخالص ).... ( کاربرد در بمب کالریمتر )

ب - ارزش حرارتی پایین ( خالص ).... ( کاربرد در صنعت )

نکته ۸ -

ارتباط بین گرمای واکنش در فشار ثابت و گرمای واکنش در حجم ثابت :

$$Q_V = \Delta U \quad \text{در حجم ثابت :}$$

$$Q_P = \Delta H \quad \text{در فشار ثابت :}$$

$$= \Delta (U + PV)$$

$$\Rightarrow Q_P - Q_V = \Delta (P.V)$$

$$\Delta (PV) = \Delta nRT \quad \text{برای گازهای ایده آل داریم:}$$

**تذکر:** تا زمانی که گفته نشود واکنش ها را در فشار ثابت در نظر می گیریم.

**نکته ۹-** اگر واکنش بطور کامل انجام نشود می بایست در محاسبات فقط آن مقدار از مواد اولیه که در واکنش شرکت کرده اند لحاظ کنیم.  
این نکته در صورتیکه به موازنه مواد دقت شود خودبخود در محاسبات اثر می کند.



بر قراری قانون اول :

$$Q = \Delta H_{reaction}$$

$$\Delta H_{reaction} = \Delta H_2 - \Delta H_1$$

$$\Delta H_2 = (n'_A \cdot \Delta \hat{H}_{fA}^o + n'_B \cdot \Delta \hat{H}_{fB}^o + n_D \cdot \Delta \hat{H}_{fD}^o) +$$

$$\int_{T_0}^{T_{out}} (n'_A C_{PA} + n'_B C_{PB} + n_D C_{PD}) dT$$

$$\Delta H_1 = (n_A \cdot \Delta \hat{H}_{fA}^o + n_B \cdot \Delta \hat{H}_{fB}^o) +$$

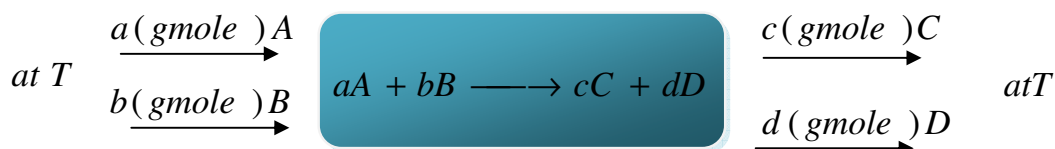
$$\int_{T_0}^{T_{in}} (n_A C_{PA} + n_B C_{PB}) dT$$

وقتی که  $\Delta H_2 - \Delta H_1$  لحاظ شود عبارات داخل پرانتز بطور خود به خود درصدی از مواد را که وارد واکنش شده اند در محاسبات دخیل می کند.

نکته ۱۰-

موازنه انرژی در حالیکه محصولات و ترکیب شونده ها در ۲۵ درجه سانتیگراد ( دمای مبنا ) نباشند:

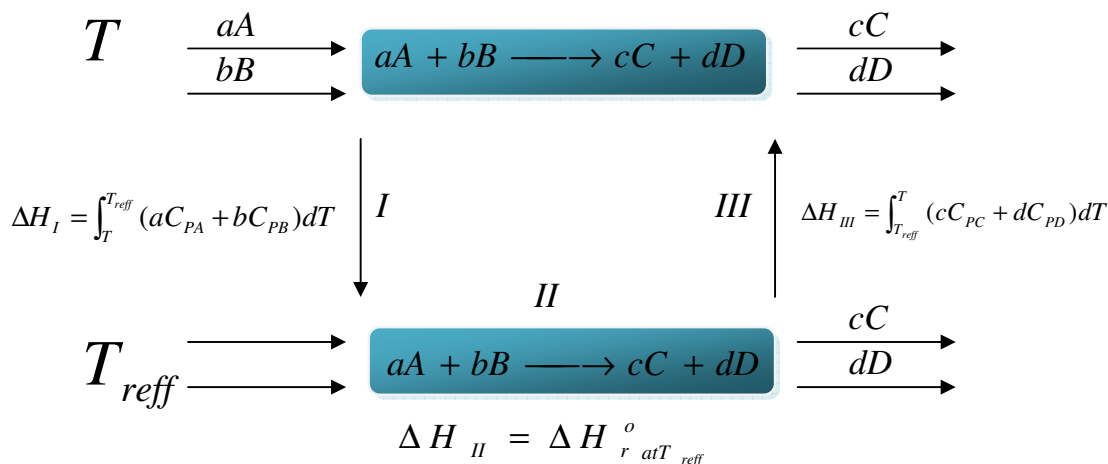
این عنوان در کتاب داده شده ولی برای ما مطلب جدیدی نیست چراکه حالت کلی تر آنرا مورد بررسی قرار دادیم ولی به آن اشاره می کنیم :



مشکلی که در کتاب مطرح کرده این است که گرمای استاندارد تشکیل را در دمای مبنا داریم پس از رابطه ی زیر استفاده شده است :

$$\Delta H_{\text{reaction}} = (c\Delta\hat{H}_{fC}^{\circ} + d\Delta\hat{H}_{fD}^{\circ}) - (a\Delta\hat{H}_{fA}^{\circ} + b\Delta\hat{H}_{fB}^{\circ})$$

چیزی که بدست می آید گرمای واکنش در دمای مبنا خواهد بود ولی واکنش در دمای T انجام گرفته است پس چگونه  $\Delta H_{\text{reaction}}$  در T را بدست آوریم ؟  
به یاد داشته باشید که آنتالپی یک تابع حالت است و می توان با یک سری مسیر های فرضی و ذهنی مسئله را حل کرد . به شکل زیر توجه کنید :



$$\Delta H = \Delta H_I + \Delta H_{II} + \Delta H_{III}$$

$$\begin{cases} \Delta H_I = \int_T^{T_{ref}} (aC_{PA} + bC_{PB}) dT \\ \Delta H_R = \int_{T_{ref}}^T (aC_{PA} + bC_{PB}) dT \end{cases} \Rightarrow \Delta H_I = -\Delta H_R$$

که  $\Delta H_R$  آنتالپی واکنش دهنده ها می باشد.

$$\Delta H_{III} = \Delta H_P$$

که  $\Delta H_P$  آنتالپی محصولات است.

پس می توان نوشت :

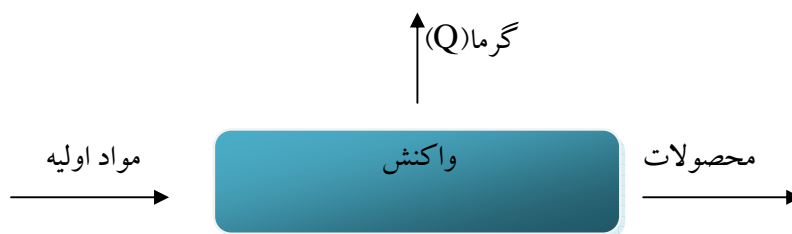
$$\Delta H = \Delta H_P - \Delta H_R + \Delta H_r^o$$

نکته ۱۱ -

محاسبه دمای آدیاباتیک شعله

**تعریف -** حداکثر دمایی که می توان در اثر انجام یک فرآیند (واکنش های گرمازا) به آن دست یافت.

دانستن دمای فوق برای امور خاص به خصوص احتراق و ... لازم است.



$$Q = \Delta H \quad \text{برقراری قانون اول}$$

در قسمت قبل هم داشتیم:

$$\begin{aligned} \Delta H &= \Delta H_P - \Delta H_R + \Delta H_r^o \\ \Rightarrow Q &= \Delta H_P - \Delta H_R + \Delta H_r^o \end{aligned}$$

پس برای واکنش های گرمازا برای رسیدن به حداکثر دما باید سیستم را ایزوله کنیم تا گرما خارج نشود.

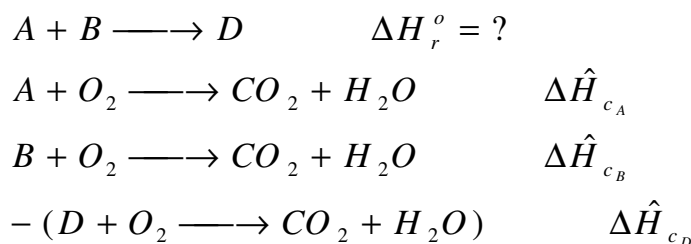
یعنی  $Q=0$  است. ضمناً از احتراق ناقص هم باید صرف نظر شود.

$$\Rightarrow \Delta H_P - \Delta H_R + \Delta H_r^o = 0$$

$$\Rightarrow \Delta H_P = \Delta H_R - \Delta H_r^o$$

یعنی اینکه اگر رابطه ی اخیر برقرار باشد به دمای آدیاباتیک شعله خواهیم رسید.

**نکته ۱۲ -** یکی از کاربردهای مهم گرمای استاندارد احتراق محاسبه ی گرمای استاندارد واکنش ها بوسیله آن است.



---


$$A + B \longrightarrow D \quad \Delta H_r^o = \Delta \hat{H}_{c_A} + \Delta \hat{H}_{c_B} - \Delta \hat{H}_{c_D}$$

### بررسی مثال ۴-۲۶ کتاب

گازگیری از ذغالسنگ عبارت است از تبدیل ذغال جامد به گاز. ارزش حرارتی ذغالسنگ ها متفاوت است ولی هر چه ارزش حرارتی ذغالسنگی بالاتر باشد ، ارزش گازهای تولید شده ( متان ، منوکسید کربن ، هیدروژن و ...) از آن نیز بیشتر است. ذغالسنگ زیر بصورتی که دریافت شده ، دارای ارزش حرارتی 29770 کیلوژول بر کیلوگرم بوده است. با فرض آنکه مقدار مذکور ، ارزش حرارتی ناخالص ذغال باشد ، مطلوب است ارزش حرارتی خالص آن.

Base :1kg of coal

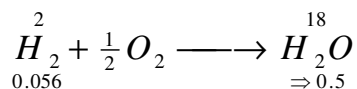
$$\left. \begin{array}{l} C : 71\% \\ H_2 : 5.6\% \\ N_2 : 1.6\% \\ Nets : 2.7\% \\ Ash : 6.1\% \\ O_2 : 13\% \end{array} \right\} \text{آنالیز ذغال}$$

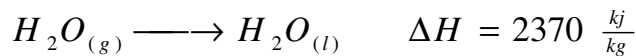
دریک کیلوگرم ذغال مقدار ۰,۰۵۶ کیلوگرم هیدروژن وجود دارد.

**گرمای تبخیر + ارزش حرارتی پایین = ارزش حرارتی بالا**

پس می توان نوشت : گرمای تبخیر - ارزش حرارتی بالا = ارزش حرارتی پایین

ارزش حرارتی بالا = 29770 کیلوژول بر کیلوگرم





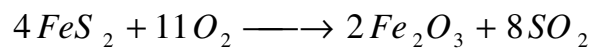
$$0.504 \times 2370 = 1194.48 \text{ مقدار گرمای لازم برای تبخیر آب}$$

$$\Rightarrow$$

$$28575.52 \frac{kJ}{kg} - 1194.48 = 29770 \text{ ارزش حرارتی پایین}$$

بررسی مثال ۴-۳۱: (واکنش های تکمیل نشده)

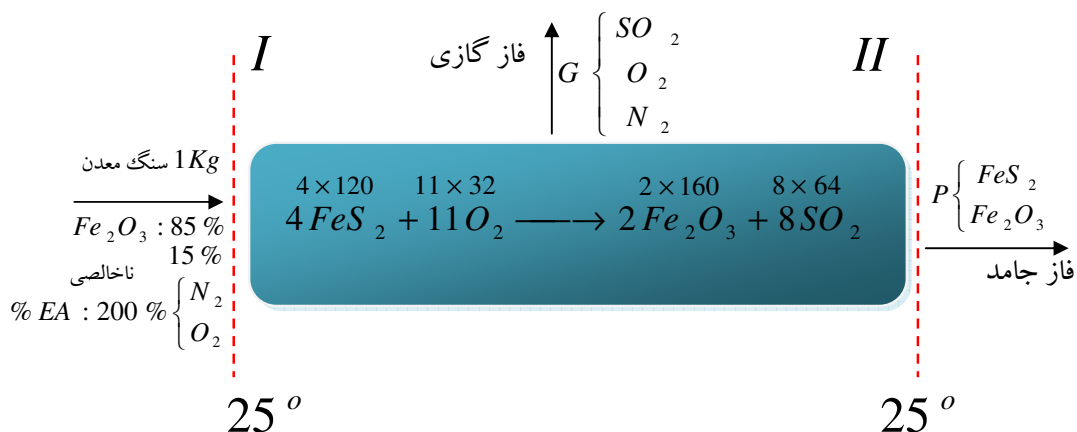
یک نوع کانی پیریت آهن متشکل از ۸۵٪  $FeS_2$  و ۱۵٪ ناخالصی (مواد بی اثر سنگ و غیره) را با ۲۰۰٪ هوای اضافی به مبنای واکنش زیر برشته میکنند تا  $SO_2$  حاصل شود.



تمام ناخالصی ها بانضمام  $FeS_2$  در پس مانددار جامد (خاکستر) باقی می ماند که محتوی ۴٪  $FeS_2$  است. گرمای استاندارد واکنش را به ازای هر کیلوگرم از کانی بدست آورید.

**حل:** واکنش به طور کامل انجام نشده پس نمی توان  $\Delta H_r^\circ$  را با استفاده از ضرایب استوکیومتری بدست آورد و باید مول ها حساب شوند.

سنگ معدن 1Kg : BASE





$$FeS_2 : 120$$

$$O_2 : 32$$

$$Fe_2O_3 : 160$$

$$SO_2 : 64$$

$$\text{جرم اکسیژن ورودی} = \frac{0.85 \times 11 \times 32}{4 \times 120} \times 3$$

$$P \text{ در } FeS_2 \text{ مقدار} = 0.04 P$$

موازنه عنصری برای Fe:

$$m_{Fe \text{ in}} = m_{Fe \text{ out}}$$

$$\frac{0.85 \times 56}{120} = \frac{0.04 P \times 56}{120} + \frac{0.96 P \times 56 \times 2}{160}$$

$$0.4 = 0.02 P + 0.67 P$$

$$P = \frac{0.4}{0.02 + 0.67} = 0.58$$

$$\text{مقدار } FeS_2 \text{ واکنش داده} = 0.85 - (0.58 \times 0.04) = 0.83 \text{ Kg } FeS_2$$

$$\begin{array}{ccccccc} 4 \times 120 & 11 \times 32 & & 2 \times 160 & 8 \times 64 & & \\ 4 FeS_2 & + 11 O_2 & \longrightarrow & 2 Fe_2O_3 & + 8 SO_2 & & \\ Kg : 0.83 & 0.61 & & 0.55 & 0.89 & & \\ gmole : \frac{830}{120} = 6.92 & \frac{610}{32} = 19.06 & & \frac{550}{160} = 3.44 & \frac{890}{64} = 13.91 & & \end{array}$$

محاسبه آنتالپی استاندارد واکنش:

$$\Delta H_r^o = \Delta H_{II} - \Delta H_I$$

$$\Delta H_{II} = \Delta H_{O_2} + \Delta H_{N_2} + \Delta H_{SO_2} + \Delta H_{Fe_2O_3} + \Delta H_{FeS_2} + \Delta H_{Other}$$

از طرفی:

$$\Delta H_{O_2} = n_{O_2} \cdot \Delta \hat{H}_{f_{O_2}}^o + \int_{T_0=25}^{25} n_{O_2} \cdot C_{P_{O_2}} dT = 0$$

به همین ترتیب آنتالپی نتروژن نیز صفر خواهد بود.



$$\Rightarrow \Delta H_{II} = n_{SO_2} \cdot \Delta \hat{H}_{f_{SO_2}}^i + n_{Fe_2O_3} \cdot \Delta \hat{H}_{f_{Fe_2O_3}}^o + n'_{FeS_2} \cdot \Delta \hat{H}_{f_{FeS_2}}^o + \Delta H_{Other}$$

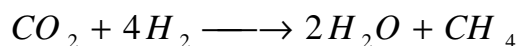
$$\Delta H_I = \Delta H_{FeS_2} + \Delta H_{Other} + \Delta H_{O_2} + \Delta H_{N_2} = n_{FeS_2} \cdot \Delta \hat{H}_{f_{FeS_2}}^o + \Delta H_{Other}$$

$$\Delta \hat{H}_r^o = n_{SO_2} \Delta \hat{H}_{f_{SO_2}}^o + n_{Fe_2O_3} \Delta \hat{H}_{f_{Fe_2O_3}}^o + n'_{FeS_2} \Delta \hat{H}_{f_{FeS_2}}^o - n_{FeS_2} \Delta \hat{H}_{f_{FeS_2}}^o$$

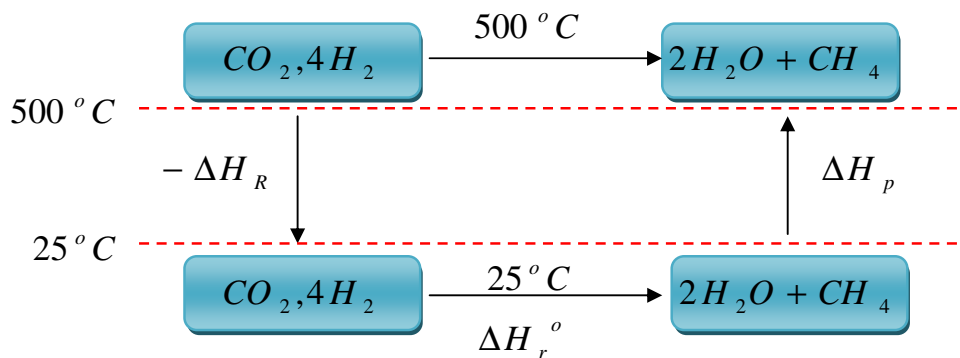
با استخراج آنتالپی های استاندارد تشکیل مواد از ضمیمه ی f کتاب مقدار آنتالپی استاندارد واکنش محاسبه خواهد شد.

بررسی مثال ۴-۳۲ (محاسبه ی گرمای واکنش در دمایی متفاوت با شرایط استاندارد)

مخترعی تصور میکند کاتالیزر جدیدی ابداع کرده که بکمک آن واکنش زیر با میزان تبدیل ۱۰۰٪ انجام می گیرد:



مطلوبست مقدار حرارتی که باید به سیستم داده یا از آن خارج گردد در صورتیکه گازها در دمای ۵۰۰ درجه ی سانتیگراد وارد شده و در همین دما خارج شوند.



راه حل اول :

$$\Delta H_{r_T} = \Delta H_p + \Delta H_r^o - \Delta H_R$$

$$C_{P_{CO_2}} = 36.11 + 4.233 \times 10^{-2}T - 2.887 \times 10^{-5}T^2 + 7.464 \times 10^{-9}T^3$$

$$C_{P_{H_2}} = 28.84 + 0.00765 \times 10^{-2}T - 0.3288 \times 10^{-5}T^2 - 0.869 \times 10^{-9}T^3$$

$$C_{P_{H_2O}} = 33.46 + 0.688 \times 10^{-2}T - 0.7604 \times 10^{-5}T^2 - 3.593 \times 10^{-9}T^3$$

$$C_{P_{CH_4}} = 34.31 + 5.469 \times 10^{-2}T - 0.3661 \times 10^{-5}T^2 - 11 \times 10^{-9}T^3$$



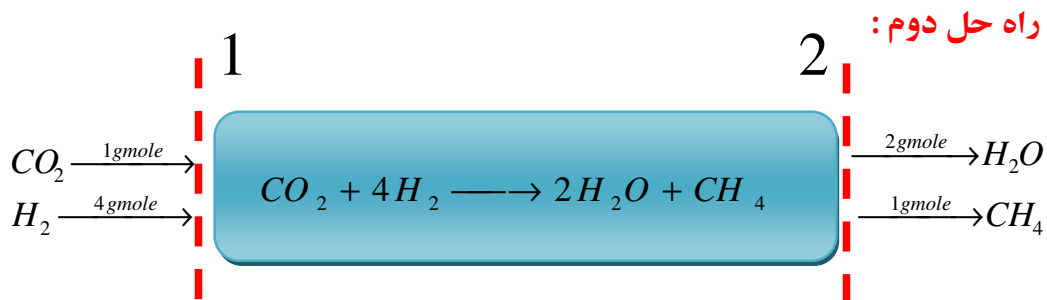
$$\Delta H_f^o \left( \frac{J}{gmole} \right) \begin{cases} CO_2(g) : 39351 \\ H_2(g) = 0 \\ H_2O(g) = 241827 \\ CH_4(g) = 7484 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_r^o &= 2\Delta\hat{H}_{f_{H_2O}}^o + 1 \times \Delta\hat{H}_{f_{CH_4}}^o - 1 \times \Delta\hat{H}_{f_{CO_2}}^o \\ &= 2(-241827) - 74848 - (-393513) = -164989 \frac{J}{gmole} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_P &= \int_{T_o}^T (2C_{P_{H_2O}} + C_{P_{CH_4}}) dT = \\ &= \int_{25}^{500} (101.23 + 6.845 \times 10^{-2}T + 1.89 \times 10^{-5}T^2 - 18.19 \times 10^{-9}T^3) dT \\ &= 57122.29 \frac{J}{gmole_{CO_2}} = 57.12 \frac{kJ}{gmole_{CO_2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_R &= \int_{25}^{500} (C_{P_{CO_2}} + 4C_{P_{H_2}}) dT \\ &= \int_{25}^{500} (151.47 + 4.26 \times 10^{-2}T - 1.57 \times 10^{-5}T^2 + 3.98 \times 10^{-9}T^3) dT \\ &= 71948.25 \frac{J}{gmole_{CO_2}} = 71.95 \frac{kJ}{gmole_{CO_2}} \end{aligned}$$

$$\Delta H_{r_T} = 57.12 - 164.989 - 71.95 = -179.812 \frac{kJ}{gmole}$$



$$\Delta H_{r \text{ at } 500^\circ \text{C}} = ?$$

$$\Delta H = \Delta H_2 - \Delta H_1$$

$$\Delta H_2 = \Delta H_{H_2O} + \Delta H_{CH_4} =$$

$$2\Delta \hat{H}_{f_{H_2O}}^o + \int_{25}^{500} C_{P_{H_2O}} dT + \Delta \hat{H}_{f_{CH_4}}^o + \int_{25}^{500} C_{P_{CH_4}} dT$$

$$\Delta H_1 = \Delta H_{CO_2} + \Delta H_{H_4} =$$

$$2\Delta \hat{H}_{f_{CO_2}}^o + \int_{25}^{500} C_{P_{CO_2}} dT + 4\Delta \hat{H}_{f_{H_2}}^o + \int_{25}^{500} C_{P_{H_2}} dT$$

$$\Rightarrow \Delta H = \underbrace{(2\Delta \hat{H}_{f_{H_2O}}^o + \Delta \hat{H}_{f_{CH_4}}^o - \Delta \hat{H}_{f_{CO_2}}^o - 4\Delta \hat{H}_{f_{H_2}}^o)}_{\Delta H_r^o} +$$

$$\int_{25}^{500} (2C_{P_{H_2O}} + C_{P_{CH_4}} - C_{P_{CO_2}} - 4C_{P_{H_2}}) dT$$

بررسی مثال ۴-۳ (محاسبه ی گرمای واکنش در دمایی متفاوت با شرایط استاندارد)

محاسبات مربوط به مثال قبل را با استفاده از جدول 4.4b و ضمیمه ی D تکرار کنید.

$$\Delta H_{r_{500}} = \Delta H_P + \Delta H_{r^o} + \Delta H_R$$

$$\Delta H_P = 2\Delta H_{H_2O} + \Delta H_{CH_4}$$

$$\Delta H_R = \Delta H_{CO_2} + 4\Delta H_{H_2}$$

از جدول 4.4b :

$$H_{H_2O_{500^\circ C}} = H_{H_2O_{773 K}} = 17795 .11$$

$$H_{H_2O_{25^\circ C}} = H_{H_2O_{298 K}} = 837$$

$$H_{CH_{4500^\circ C}} = H_{CH_{4773 K}} = 24013 .91$$

$$H_{CH_{425^\circ C}} = H_{CH_{4298 K}} = 879$$

$$H_{H_{2500^\circ C}} = H_{H_{2773 K}} = 14640$$

$$H_{H_{225^\circ C}} = H_{H_{2298 K}} = 718$$

$$H_{CO_{2500^\circ C}} = H_{CO_{2773 K}} = 22342$$

$$H_{CO_{225^\circ C}} = H_{CO_{2298 K}} = 912$$

$$\Delta H_P = 2\Delta H_{H_2O} + \Delta H_{CH_4} = 2(H_{H_2O_{500}} - H_{H_2O_{25}}) + (H_{CH_{4500}} - H_{CH_{425}})$$

$$= (2(17795.11 - 837) + (24013.91 - 879)) = 57051.13 \frac{J}{gmole}$$

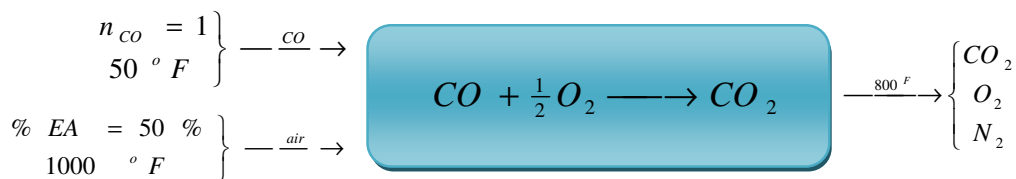
$$\Delta H_R = (H_{CO_{500}} - H_{CO_{25}}) - 4(H_{H_{2500}} - H_{H_{225}}) = 77023.1 \frac{J}{gmole}$$

$$\Delta H_{r_{500^\circ C}} = \Delta H_P + \Delta H_r^o - \Delta H_R =$$

$$57051.13 - 164989 - 77023.1 = -184.95 \frac{J}{gmole_{CO_2}}$$

بررسی مثال ۴-۳۴ ( کاربرد موازنه انرژی در تحولی همراه با واکنش شیمیایی)

منوکسید کربن در ۵۰ درجه سانتیگراد را با ۵۰٪ هوای اضافی در دمای ۱۰۰۰ درجه ی فارنهایت بطور کامل در فشار ۲ اتمسفر می سوزانند. محصولات احتراق در دمای ۸۰۰ درجه فارنهایت از کوره خارج می شوند. مطلوب است حرارت خروجی از محفظه احتراق بر حسب Btu به ازای هر پوند CO ورودی.



BASE : 1 lbmole CO

$$\text{مورد نیاز } O_2 = 0.5 \text{ lbmole}$$

$$\text{ورودی } O_2 = 0.5 \times 1.5 \text{ lbmole}$$

$$\text{ورودی } N_2 = 0.5 \times 1.5 \times \frac{79}{21} = 2.82 \text{ lbmole}$$

$$\text{خروجی } O_2 = O_{2_{input}} - O_{2_{Cons}} = 0.5 \times 1.5 - 0.5 = 0.5(1.5 - 1) \text{ lbmole}$$

$$\text{خروجی } N_2 = N_{2_{input}} = 2.82 \text{ lbmole}$$

$$\Delta H = \Delta H_2 - \Delta H_1$$

$$\begin{aligned} \Delta H_2 &= \Delta H_{CO_2} + \Delta H_{O_2} + \Delta H_{N_2} = \\ \Delta \hat{H}_{f_{CO_2}}^o &+ \int_{77}^{800} C_{P_{CO_2}} dT + 0.25 \Delta \hat{H}_{f_{O_2}}^o + \int_{77}^{800} 0.25 C_{P_{O_2}} dT \\ &+ 2.82 \Delta \hat{H}_{f_{N_2}}^o + \int_{77}^{800} 2.82 C_{P_{N_2}} dT \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Delta H_2 = \Delta \hat{H}_{f_{CO_2}}^o + \int_{77}^{800} (C_{P_{CO_2}} + 0.25 C_{P_{O_2}} + 2.82 C_{P_{N_2}}) dT$$

$$\begin{aligned} \Delta H_1 &= \Delta H_{CO} + \Delta H_{O_2} + \Delta H_{N_2} = \\ \Delta \hat{H}_{f_{CO}}^o &+ \int_{77}^{50} C_{P_{CO_2}} dT + 0.75 \Delta \hat{H}_{f_{O_2}}^o + \int_{77}^{1000} 0.75 C_{P_{O_2}} dT \\ &+ 2.82 \Delta \hat{H}_{f_{N_2}}^o + \int_{77}^{1000} 2.82 C_{P_{N_2}} dT \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \Delta H_2 = \Delta \hat{H}_{f_{CO_2}}^o + \int_{77}^{1000} (C_{P_{CO_2}} + 0.75 C_{P_{O_2}} + 2.82 C_{P_{N_2}}) dT$$

با محاسبه ی تفاضل دو مقدار فوق آنتالپی واکنش محاسبه خواهد شد.

ضمیمه - الف

کار با ماشین حساب مهندسی

مدل fx-5500LA



در این بخش سعی شده تا نحوه انجام برخی از عملیات ریاضی که در دروس مختلف مهندسی شیمی کاربرد بیشتری دارد مورد بررسی قرار گیرد برای دستیابی به اطلاعات جامع تر به دفترچه راهنمای ماشین حساب رجوع کنید.

## 1- درونیابی

(A)

SHIFT > F6 > F6

(B)

وارد کردن داده ها به عنوان مثال :

( 2 و 7 ) و ( 5 و 11 )

7,2 > F1

11 , 5 > F1

(C)

وارد کردن عدد مورد نظر (برای مثال عدد 9) که میخواهیم مقدار مربوط به آن را بدست آوریم:

F6 > F6 > 9 > F5 > EXE

که در اینجا عدد 3.5 حاصل شد.

**تذکر مهم :** حتماً بعد از هر بار انجام درونیابی باید برای دفعات بعد حافظه ی ماشین حساب پاک شود

به شکل زیر :

SHIFT > 4(CLEAR)> F1

SHIFT > 4(CLEAR) > F6

**تذکر :** دستور زیر حافظه ی فرمولی ماشین حساب را پاک می کند

SHIFT > 4(CLEAR) > F4

## 2- حل دستگاه معادلات جبری خطی

به مثال زیر توجه کنید :

مقادیر مجهول را از معادلات جبری زیر پیدا کنید.

$$2x_1 + 2x_2 + 5x_3 + 3x_4 = 15$$

$$x_1 + 5x_2 + 2x_3 = 7$$

$$3x_1 + x_2 + 4x_4 = 11$$

$$x_2 + 4x_3 + 6x_4 = 3$$

با تشکیل ماتریس های ضرایب و ثوابت داریم :

$$\begin{bmatrix} 2 & 2 & 5 & 3 \\ 1 & 5 & 2 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15 \\ 7 \\ 11 \\ 3 \end{bmatrix}$$

اکنون با داشتن ماتریس های ضرایب و ثوابت با استفاده از ماشین حساب و به طریق زیر معادلات را حل می کنیم :

SHIFT > F2 > F2

در این مرحله باید تعداد معادلات را وارد کنیم برای مثال در اینجا با داشتن 4 معادله مقدار 4 را وارد کرده و F1 را می زنیم.

اکنون با کلید F2 به مرحله وارد کردن ضرایب و ثوابت می رسیم:

با وارد کردن درایه های مربوط به ماتریس های فوق مقادیر مجهول به سادگی بدست خواه آمد.

**نکات :**

1- بعد از وارد کردن هر درایه کلید مشخص شده در زیر آن را جهت وارد کردن مقادیر میزنیم.

2- بعد از وارد کردن مقادیر سطر اول با فشردن کلید فلش پایین مقادیر سطر دوم را وارد و به همین ترتیب برای سطرهای بعدی عمل می کنیم.

3- برای مشاهده جواب از کلید PRE (COMP) و سپس F5 استفاده می کنیم.

4- در صورتی که بیش یک بار عملیات فوق را انجام می دهید بعد از هر بار استفاده باید حافظه ی ماشین حساب را به گونه ای که ذکر شد پاک کنید.

با حل دستگاه معادلات فوق مقادیر زیر حاصل خواهد شد :

$$x_1 = 4.4407$$

$$x_2 = -0.1299$$

$$x_3 = 1.6045$$

$$x_4 = -0.5480$$



### 3- فرمول دهی به ماشین حساب

گاه‌ها به روابطی برخورد می‌کنیم که محاسبه‌ی آنها به صورت معمول وقت زیادی را می‌طلبد به خصوص در مواردی که مسائل به طریق سعی و خطا قابل حل هستند و چندین بار متوالی باید مقادیر توسط یک رابطه محاسبه گردد. به منظور تسریع و افزایش دقت در محاسبات معمولاً از فرمول دهی به ماشین حساب استفاده می‌شود که آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم:

(A)

SHIFT > 5(CALC)

با انجام فرمان فوق وارد سیستم فرمول پذیری ماشین حساب خواهیم شد.

برای وارد کردن فرمول به این صورت عمل می‌کنیم:

مثال:

مقدار Y را به ازای X=5 و Z=23 محاسبه کنید.

$$Y = 2X^2 - \sqrt[3]{Z} + 4$$

برای تایپ حروف الفبا از کلید قرمز رنگ (ALPHA) استفاده می‌شود.

بعد از تایپ با کلید F2 فرمول وارد حافظه موقت ماشین حساب می‌شود.

برای انجام محاسبه، بعد از فشردن کلید F4(CAL) تک تک مقادیر را با استفاده از کلید مشخص شده در زیر آن وارد و سپس کلید F6 را می‌زنیم.

**نکته 1-** در صورتی که بعد از تایپ فرمول از کلید F6 (SET) استفاده کنیم فرمول وارد حافظه دائمی ماشین حساب می‌شود و پس از خاموش کردن در حافظه باقی خواهد ماند.

**نکته 2-** به منظور بازخوانی فرمول از حافظه‌ی دائمی به روش زیر عمل می‌کنیم:

SHIFT > 5(CALC) > F1(f)

سپس انتخاب فرمول و استفاده کلید F2(IN) برای وارد کردن فرمول. (بقیه مراحل قبلاً ذکر شد)

**نکته 3-** برای پاک کردن یک و یا چند مورد انتخابی به روش زیر عمل می‌کنیم:

بعد از انتخاب فرمول با فشردن کلید REPLY و قرار دادن نشانگر در رابطه هم می‌توان فرمول را پاک کرد و هم آن را ویرایش نمود. در صورتی که مایلید فرمول پاک شود بعد قرار گرفتن نشانگر بر روی رابطه کلید AC و سپس کلید F6(SET) را فشار دهید.

**نکته 4-** به منظور پاک نمودن تمامی فرمول ها ابتدا کلید SHIFT سپس (CLEAR) 4 و در آخر کلید F4(CALC) را فشار دهید.

با محاسبه رابطه ی فوق مدار  $Y=53.9999$  بدست خواهد آمد.

#### 4- محاسبه ی انتگرال به کمک ماشین حساب

برای محاسبه انتگرال های معین با استفاده از ماشین حساب به طریق زیر عمل می کنیم:  
SHIFT > F3

برای وارد کردن رابطه کلید F1 را زده و فرمول را وارد می کنیم. توجه کنید که برای وارد کردن مجهول از گزینه (F1)X استفاده می شود. سپس با فشردن کلید F2(IN) فرمول به حافظه موقت انتقال می یابد.

اکنون با وارد کردن بازه های انتگرال با استفاده از کلید های F3 و F4 و سپس فشردن کلید F5 مقدار انتگرال بدست خواهد آمد.

#### 5- حل معادله درجه 2

SHIFT > F2 > F1

سپس وارد کردن ضرایب با استفاده از کلید های F1 و F2 و F3.  
اکنون با فشردن کلید F5(x) ریشه های معادله محاسبه خواهد شد.



## ضمیمه - ب

# ضرایب تبدیل واحد در سیستم های مختلف

## واحدهای درجه حرارت

واحد درجه حرارت در دستگاه واحد متریک بین المللی (SI) عبارتست از درجه کلوین که علامت اختصاری آن بصورت (K) می باشد. که این درجه حرارت T[K] به این ترتیب تعیین شده که نقطه سه گانه آب خالص دقیقاً برابر ۲۷۳/۱۶ درجه کلوین می باشد.

$$\text{نقطه سه گانه آب خالص} = 273.16 \text{ K}$$

واحد دیگر درجه حرارت درجه سلزیوس با علامت اختصاری °C می باشد. که این درجه حرارت  $t_c[^\circ\text{C}]$  به این ترتیب درجه بندی شده که صفر درجه سانتیگراد معادل نقطه انجماد آب و صد درجه سانتیگراد معادل نقطه جوش آب می باشد

$$T(\text{K}) = 273.15 + t_c[^\circ\text{C}] \quad \text{بنابراین} \quad 273.15 \text{ K} \triangleq 0^\circ\text{C} = \text{نقطه ذوب آب خالص}$$

$$100^\circ\text{C} \triangleq 373.15 \text{ K} = \text{نقطه جوش آب خالص}$$

یک واحد درجه بندی سانتیگراد = یک واحد درجه بندی کلوین

درجه حرارت رئومور  $t_{Re}[^\circ\text{Ré}]$  بصورت زیر درجه بندی شده که نقطه انجماد آب را برابر صفر درجه رئومور و نقطه جوش آب برابر  $80^\circ\text{Ré}$  می باشد.

$$0^\circ\text{Ré} = \text{نقطه انجماد آب خالص}$$

$$80^\circ\text{Ré} = \text{نقطه جوش آب خالص}$$

واحد درجه حرارت در دستگاه انگلیسی و آمریکائی فارنهایت می باشد که با علامت اختصاری deg F یا °F مشخص شده. که بصورت زیر درجه بندی شده، نقطه انجماد آب برابر با  $32^\circ\text{F}$  و نقطه جوش آب برابر با  $212^\circ\text{F}$  تعیین شده

$$32^\circ\text{F} = \text{نقطه انجماد آب خالص}$$

$$212^\circ\text{F} = \text{نقطه جوش آب خالص}$$

واحد دیگر درجه حرارت در دستگاه انگلیسی و آمریکائی عبارتست از درجه رانکین که با علامت اختصاری °R یا deg R مشخص شده که صفر درجه فارنهایت برابر با  $459.67^\circ\text{R}$  تعیین شده.

بنابراین: یک واحد درجه بندی رانکین = یک واحد درجه بندی فارنهایت  $1^\circ\text{R} = \frac{9}{5}^\circ\text{F}$  و  $1^\circ\text{R} = \frac{5}{9}^\circ\text{C}$

$$t_R = t_F + 459.67$$

$$1^\circ\text{R} = 1^\circ\text{F}$$

$$1^\circ\text{R} = \frac{5}{9}^\circ\text{C}$$

جدول ۱ - ۱۳۲. ضرایب تبدیل واحدهای درجه حرارت

Unit	Symbol	K	°C	°Ré	°F	°R
1 kelvin	= K	1	1	4/5	9/5	9/5
1 degree Celsius	= °C	1	1	4/5	9/5	9/5
1 degree Reaumur	= °Ré	5/4	5/4	1	9/4	9/4
1 degree Fahrenheit	= °F	5/9	5/9	4/9	1	1
1 degree Rankine	= °R	5/9	5/9	4/9	1	1

جدول ۱ - ۱۳۳. بعضی درجه حرارت های ویژه

	K	°C	°Ré	°F	°R
Absolute zero	= 0	-273.15	-218.52	-459.67	0
Freezing point of pure water	= 273.15	0	0	+32	491.67
Triple point of pure water	= 273.15	+0.01	+0.008	+32.0183	491.688
Boiling point of pure water	= 373.15	+100	+80	+212	671.67



## Energy equivalents

The unit of energy in the International System (SI) is the joule, abbreviation J;  $1 \text{ J} = 0.101\,971\,6 \text{ kp}\cdot\text{m} \approx 0.102 \text{ kp}\cdot\text{m} = 0.737\,562 \text{ ft lbf}$ .

The unit of energy in the metric gravitational system is the kilopond meter, abbreviation kp.m;  $1 \text{ kp}\cdot\text{m} = 9.806\,65 \text{ J} = 7.233\,01 \text{ ft lbf}$ .

The Anglo-American unit of energy is the foot pound-force, abbreviation ft lbf;  $1 \text{ ft lbf} = 1.355\,82 \text{ J} = 0.138\,255 \text{ kp}\cdot\text{m}$ .

## جدول ۱-۲۳: ضرایب تبدیل واحدهای انرژی

Unit	Abbreviation	J*	kJ	MJ	erg	Wh
1 joule*	= J*	1	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^7$	$2.777\,78 \cdot 10^{-4}$
1 kilojoule	= kJ	$10^3$	1	$10^{-3}$	$10^{10}$	$2.777\,78 \cdot 10^{-1}$
1 megajoule	= MJ	$10^6$	$10^3$	1	$10^{13}$	$2.777\,78 \cdot 10^2$
1 erg	= erg	$10^{-7}$	$10^{-10}$	$10^{-13}$	1	$2.777\,78 \cdot 10^{-11}$
1 watt hour	= Wh	3 600	$3\,600 \cdot 10^{-3}$	$3\,600 \cdot 10^{-6}$	$3\,600 \cdot 10^7$	1
1 kilowatt hour	= kWh	$3\,600 \cdot 10^3$	3 600	$3\,600 \cdot 10^{-3}$	$3\,600 \cdot 10^{10}$	$10^3$
1 megawatt hour	= MWh	$3\,600 \cdot 10^6$	$3\,600 \cdot 10^3$	3 600	$3\,600 \cdot 10^{13}$	$10^6$
1 kilopond meter	= kp.m	9.806 65	$9.806\,65 \cdot 10^{-3}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-6}$	$9.806\,65 \cdot 10^7$	$2.724\,069 \cdot 10^{-3}$
1 pond centimeter	= p.cm	$9.806\,65 \cdot 10^{-5}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-8}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-11}$	$9.806\,65 \cdot 10^2$	$2.724\,069 \cdot 10^{-5}$
1 calorie	= cal	4.186 8	$4.186\,8 \cdot 10^{-3}$	$4.186\,8 \cdot 10^{-6}$	$4.186\,8 \cdot 10^7$	$1.163 \cdot 10^{-3}$
1 kilocalorie	= kcal	$4.186\,8 \cdot 10^3$	4.186 8	$4.186\,8 \cdot 10^{-3}$	$4.186\,8 \cdot 10^{10}$	1.163
1 metric horsepower second	= KS s	735.499	$735.499 \cdot 10^{-3}$	$735.499 \cdot 10^{-6}$	$735.499 \cdot 10^7$	$2.043\,05 \cdot 10^{-1}$
1 metric horsepower hour	= KS h	$2.647\,796 \cdot 10^6$	$2.647\,796 \cdot 10^3$	2.647 796	$2.647\,796 \cdot 10^{13}$	735.499
1 electronvolt	= eV	$1.602 \cdot 10^{-19}$	$1.602 \cdot 10^{-22}$	$1.602 \cdot 10^{-25}$	$1.602 \cdot 10^{-12}$	$4.450 \cdot 10^{-23}$
1 foot poundal	= ft.pdl	$4.214\,01 \cdot 10^{-2}$	$4.214\,01 \cdot 10^{-5}$	$4.214\,01 \cdot 10^{-8}$	$4.214\,01 \cdot 10^5$	$1.170\,56 \cdot 10^{-5}$
1 foot pound-force	= ft.lbf	1.355 82	$1.355\,82 \cdot 10^{-3}$	$1.355\,82 \cdot 10^{-6}$	$1.355\,82 \cdot 10^7$	$3.766\,16 \cdot 10^{-4}$
1 horsepower hour	= hp.h	$2.684\,52 \cdot 10^6$	$2.684\,52 \cdot 10^3$	2.684 52	$2.684\,52 \cdot 10^{13}$	745.700
1 British thermal unit	= Btu	$1.055\,06 \cdot 10^3$	1.055 06	$1.055\,06 \cdot 10^{-3}$	$1.055\,06 \cdot 10^{10}$	$2.930\,71 \cdot 10^{-1}$
1 thermie	= th	$4.185\,5 \cdot 10^6$	$4.185\,5 \cdot 10^3$	4.185 5	$4.185\,5 \cdot 10^{13}$	$1.162\,64 \cdot 10^3$
Unit	Abbreviation	kWh	MWh	kp.m	p.cm	cal
1 joule*	= J*	$2.777\,78 \cdot 10^{-7}$	$2.777\,78 \cdot 10^{-10}$	$1.019\,72 \cdot 10^{-1}$	$1.019\,72 \cdot 10^4$	$2.388\,46 \cdot 10^{-1}$
1 kilojoule	= kJ	$2.777\,78 \cdot 10^{-4}$	$2.777\,78 \cdot 10^{-7}$	$1.019\,72 \cdot 10^2$	$1.019\,72 \cdot 10^7$	$2.388\,46 \cdot 10^4$
1 megajoule	= MJ	$2.777\,78 \cdot 10^{-1}$	$2.777\,78 \cdot 10^{-4}$	$1.019\,72 \cdot 10^5$	$1.019\,72 \cdot 10^{10}$	$2.388\,46 \cdot 10^7$
1 erg	= erg	$2.777\,78 \cdot 10^{-14}$	$2.777\,78 \cdot 10^{-17}$	$1.019\,72 \cdot 10^{-8}$	$1.019\,72 \cdot 10^{-3}$	$2.388\,46 \cdot 10^{-8}$
1 watt hour	= Wh	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$3.670\,98 \cdot 10^3$	$3.670\,98 \cdot 10^7$	859.845
1 kilowatt hour	= kWh	1	$10^{-3}$	$3.670\,98 \cdot 10^5$	$3.670\,98 \cdot 10^{10}$	$859.845 \cdot 10^3$
1 megawatt hour	= MWh	$10^3$	1	$3.670\,98 \cdot 10^8$	$3.670\,98 \cdot 10^{13}$	$859.845 \cdot 10^6$
1 kilopond meter	= kp.m	$2.724\,069 \cdot 10^{-6}$	$2.724\,069 \cdot 10^{-9}$	1	$10^4$	2.342 28
1 pond centimeter	= p.cm	$2.724\,069 \cdot 10^{-11}$	$2.724\,069 \cdot 10^{-14}$	$10^{-5}$	1	$2.342\,28 \cdot 10^{-5}$
1 calorie	= cal	$1.163 \cdot 10^{-6}$	$1.163 \cdot 10^{-9}$	$426.935 \cdot 10^{-3}$	$426.935 \cdot 10^2$	1
1 kilocalorie	= kcal	$1.163 \cdot 10^{-3}$	$1.163 \cdot 10^{-6}$	426.935	$426.935 \cdot 10^5$	$10^3$
1 metric horsepower second	= KS s	$2.043\,05 \cdot 10^{-4}$	$2.043\,05 \cdot 10^{-7}$	75	$75 \cdot 10^7$	$1.7567 \cdot 10^1$
1 metric horsepower hour	= KS h	$735.499 \cdot 10^{-3}$	$735.499 \cdot 10^{-6}$	270 000	$270\,000 \cdot 10^5$	$632.415 \cdot 10^3$
1 electronvolt	= eV	$4.450 \cdot 10^{-26}$	$4.450 \cdot 10^{-29}$	$1.634 \cdot 10^{-20}$	$1.634 \cdot 10^{-15}$	$3.826 \cdot 10^{-20}$
1 foot poundal	= ft.pdl	$1.170\,56 \cdot 10^{-8}$	$1.170\,56 \cdot 10^{-11}$	$4.297\,10 \cdot 10^{-3}$	$4.297\,10 \cdot 10^2$	$1.006\,50 \cdot 10^{-2}$
1 foot pound-force	= ft.lbf	$3.766\,16 \cdot 10^{-7}$	$3.766\,16 \cdot 10^{-10}$	$1.382\,55 \cdot 10^{-1}$	$1.382\,55 \cdot 10^4$	$3.238\,32 \cdot 10^{-1}$
1 horsepower hour	= hp.h	$745.700 \cdot 10^{-3}$	$745.700 \cdot 10^{-6}$	$2.737\,45 \cdot 10^5$	$2.737\,45 \cdot 10^{10}$	$641.186 \cdot 10^3$
1 British thermal unit	= Btu	$2.930\,71 \cdot 10^{-4}$	$2.930\,71 \cdot 10^{-7}$	$1.075\,862 \cdot 10^2$	$1.075\,862 \cdot 10^7$	$2.519\,96 \cdot 10^2$
1 thermie	= th	1.162 64	$1.162\,64 \cdot 10^{-3}$	$4.268\,02 \cdot 10^5$	$4.268\,02 \cdot 10^{10}$	$999.690 \cdot 10^3$

\*  $1 \text{ J} = 1 \text{ W s} = 1 \text{ Nm}$



### Mass equivalents

The unit of mass in the International System (SI) is the kilogram, abbreviation kg; 1 kg = 2,204 62 lb.  
The Anglo-American unit of mass is the pound, abbreviation lb; 1 lb = 0.453 592 37 kg.

### جدول ۱-۱ ضرایب تبدیل واحدهای جرم

Unit	Abbreviation	kg	dag (dag)	g	dg	cg	mg
1 kilogram	= kg	1	10 <sup>1</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>
1 decagram	= dag (dag)	10 <sup>-2</sup>	1	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
1 gram	= g	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-1</sup>	1	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>
1 decigram	= dg	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	1	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>
1 centigram	= cg	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	1	10 <sup>1</sup>
1 milligram	= mg	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	1
1 microgram	= µg	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>
1 ton (= 1000 kg)	= t	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>
1 pound	= lb	4.535 923 7 · 10 <sup>-1</sup>	4.535 923 7 · 10 <sup>1</sup>	4.535 923 7 · 10 <sup>3</sup>	4.535 923 7 · 10 <sup>4</sup>	4.535 923 7 · 10 <sup>5</sup>	4.535 923 7 · 10 <sup>6</sup>
1 hyl* (techma)	= hyl*	9.806 65	9.806 65 · 10 <sup>1</sup>	9.806 65 · 10 <sup>3</sup>	9.806 65 · 10 <sup>4</sup>	9.806 65 · 10 <sup>5</sup>	9.806 65 · 10 <sup>6</sup>
1 slug**	= slug**	14.593 9	14.593 9 · 10 <sup>1</sup>	14.593 9 · 10 <sup>3</sup>	14.593 9 · 10 <sup>4</sup>	14.593 9 · 10 <sup>5</sup>	14.593 9 · 10 <sup>6</sup>
1 grain	= gr	6.479 89 · 10 <sup>-5</sup>	6.479 89 · 10 <sup>-3</sup>	6.479 89 · 10 <sup>-2</sup>	6.479 89 · 10 <sup>-1</sup>	6.479 89	6.479 89 · 10 <sup>1</sup>
1 dram (avoir)	= dr (avr.)	1.771 85 · 10 <sup>-3</sup>	1.771 85 · 10 <sup>-1</sup>	1.771 85	1.771 85 · 10 <sup>1</sup>	1.771 85 · 10 <sup>2</sup>	1.771 85 · 10 <sup>3</sup>
1 drachm (apoth)	= drachm (apoth)	3.887 93 · 10 <sup>-3</sup>	3.887 93 · 10 <sup>-1</sup>	3.887 93	3.887 93 · 10 <sup>1</sup>	3.887 93 · 10 <sup>2</sup>	3.887 93 · 10 <sup>3</sup>
1 ounce (avoir)	= oz (avr.)	28.349 5 · 10 <sup>-3</sup>	28.349 5 · 10 <sup>-1</sup>	28.349 5	28.349 5 · 10 <sup>1</sup>	28.349 5 · 10 <sup>2</sup>	28.349 5 · 10 <sup>3</sup>
1 ounce (troy; apoth)	= oz (tr; ap)	31.103 5 · 10 <sup>-3</sup>	31.103 5 · 10 <sup>-1</sup>	31.103 5	31.103 5 · 10 <sup>1</sup>	31.103 5 · 10 <sup>2</sup>	31.103 5 · 10 <sup>3</sup>
1 hundredweight	= cwt	5.080 23 · 10 <sup>1</sup>	5.080 23 · 10 <sup>3</sup>	5.080 23 · 10 <sup>4</sup>	5.080 23 · 10 <sup>5</sup>	5.080 23 · 10 <sup>6</sup>	5.080 23 · 10 <sup>7</sup>
1 US short hundredweight	= US sh cwt	4.535 92 · 10 <sup>1</sup>	4.535 92 · 10 <sup>3</sup>	4.535 92 · 10 <sup>4</sup>	4.535 92 · 10 <sup>5</sup>	4.535 92 · 10 <sup>6</sup>	4.535 92 · 10 <sup>7</sup>
1 UK ton	= UK ton	1.016 05 · 10 <sup>3</sup>	1.016 05 · 10 <sup>5</sup>	1.016 05 · 10 <sup>6</sup>	1.016 05 · 10 <sup>7</sup>	1.016 05 · 10 <sup>8</sup>	1.016 05 · 10 <sup>9</sup>
US short ton	= US sh ton	9.071 85 · 10 <sup>2</sup>	9.071 85 · 10 <sup>4</sup>	9.071 85 · 10 <sup>5</sup>	9.071 85 · 10 <sup>6</sup>	9.071 85 · 10 <sup>7</sup>	9.071 85 · 10 <sup>8</sup>

Unit	Abbreviation	µg	t	lb	hyl*	slug**	gr	dr (avr.)
1 kilogram	= kg	10 <sup>6</sup>	10 <sup>-3</sup>	2.204 62	1.019 72 · 10 <sup>-1</sup>	6.852 18 · 10 <sup>-2</sup>	15.432 4 · 10 <sup>3</sup>	5.643 83 · 10 <sup>1</sup>
1 decagram	= dag (dag)	10 <sup>5</sup>	10 <sup>-2</sup>	2.204 62 · 10 <sup>-1</sup>	1.019 72 · 10 <sup>-2</sup>	6.852 18 · 10 <sup>-3</sup>	15.432 4 · 10 <sup>2</sup>	5.643 83
1 gram	= g	10 <sup>4</sup>	10 <sup>-1</sup>	2.204 62 · 10 <sup>-2</sup>	1.019 72 · 10 <sup>-3</sup>	6.852 18 · 10 <sup>-4</sup>	15.432 4	5.643 83 · 10 <sup>-1</sup>
1 decigram	= dg	10 <sup>3</sup>	10 <sup>-2</sup>	2.204 62 · 10 <sup>-3</sup>	1.019 72 · 10 <sup>-4</sup>	6.852 18 · 10 <sup>-5</sup>	15.432 4 · 10 <sup>-1</sup>	5.643 83 · 10 <sup>-2</sup>
1 centigram	= cg	10 <sup>2</sup>	10 <sup>-3</sup>	2.204 62 · 10 <sup>-4</sup>	1.019 72 · 10 <sup>-5</sup>	6.852 18 · 10 <sup>-6</sup>	15.432 4 · 10 <sup>-2</sup>	5.643 83 · 10 <sup>-3</sup>
1 milligram	= mg	10 <sup>1</sup>	10 <sup>-4</sup>	2.204 62 · 10 <sup>-5</sup>	1.019 72 · 10 <sup>-6</sup>	6.852 18 · 10 <sup>-7</sup>	15.432 4 · 10 <sup>-3</sup>	5.643 83 · 10 <sup>-4</sup>
1 microgram	= µg	1	10 <sup>-12</sup>	2.204 62 · 10 <sup>-6</sup>	1.019 72 · 10 <sup>-10</sup>	6.852 18 · 10 <sup>-11</sup>	15.432 4 · 10 <sup>-4</sup>	5.643 83 · 10 <sup>-5</sup>
1 ton (= 1000 kg)	= t	10 <sup>9</sup>	1	2.204 62 · 10 <sup>3</sup>	1.019 72 · 10 <sup>7</sup>	6.852 18 · 10 <sup>6</sup>	15.432 4 · 10 <sup>8</sup>	5.643 83 · 10 <sup>7</sup>





## Length equivalents

The unit of length in the International System (SI) is the meter, abbreviation m; 1 m = 1.09361 yd.

The Anglo-American unit of length is the yard, abbreviation yd; 1 yd = 0.9144 m.

جدول ۱-۱۰۲ ضرایب تبدیل واحدهای طول

Unit	Abbreviation	m	dm	cm	mm	$\mu\text{m}$	km	in.	ft
1 meter	= m	1	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^6$	$10^{-3}$	39.370 1	3.280 84
1 decimeter	= dm	$10^{-1}$	1	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^{-4}$	$39.370 1 \cdot 10^{-1}$	$3.280 84 \cdot 10^{-1}$
1 centimeter	= cm	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	$10^1$	$10^4$	$10^{-5}$	$39.370 1 \cdot 10^{-2}$	$3.280 84 \cdot 10^{-2}$
1 millimeter	= mm	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	$10^3$	$10^{-6}$	$39.370 1 \cdot 10^{-3}$	$3.280 84 \cdot 10^{-3}$
1 micrometer	= $\mu\text{m}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	1	$10^{-9}$	$39.370 1 \cdot 10^{-6}$	$3.280 84 \cdot 10^{-6}$
1 kilometer	= km	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^9$	1	$39.370 1 \cdot 10^3$	$3.280 84 \cdot 10^3$
1 inch	= in.	$2.54 \cdot 10^{-2}$	$2.54 \cdot 10^{-1}$	2.54	$2.54 \cdot 10^1$	$2.54 \cdot 10^4$	$2.54 \cdot 10^{-3}$	1	0.083 333 3
1 foot	= ft	$3.048 \cdot 10^{-1}$	3.048	$3.048 \cdot 10^1$	$3.048 \cdot 10^2$	$3.048 \cdot 10^5$	$3.048 \cdot 10^{-4}$	12	1
1 yard	= yd	$9.144 \cdot 10^{-1}$	9.144	$9.144 \cdot 10^1$	$9.144 \cdot 10^2$	$9.144 \cdot 10^5$	$9.144 \cdot 10^{-4}$	36	3
1 fathom	= fathom	1.828 8	$1.828 8 \cdot 10^1$	$1.828 8 \cdot 10^2$	$1.828 8 \cdot 10^3$	$1.828 8 \cdot 10^6$	$1.828 8 \cdot 10^{-3}$	72	6
1 rod	= rod	5.029 2	$5.029 2 \cdot 10^1$	$5.029 2 \cdot 10^2$	$5.029 2 \cdot 10^3$	$5.029 2 \cdot 10^6$	$5.029 2 \cdot 10^{-3}$	198	16.5
1 chain	= chain	20.116 8	$20.116 8 \cdot 10^1$	$20.116 8 \cdot 10^2$	$20.116 8 \cdot 10^3$	$20.116 8 \cdot 10^6$	$20.116 8 \cdot 10^{-3}$	792	66
1 furlong	= furlong	201.168	$201.168 \cdot 10^1$	$201.168 \cdot 10^2$	$201.168 \cdot 10^3$	$201.168 \cdot 10^6$	$201.168 \cdot 10^{-3}$	7 920	660
1 mile	= mile	1 609.344	$1 609.344 \cdot 10^1$	$1 609.344 \cdot 10^2$	$1 609.344 \cdot 10^3$	$1 609.344 \cdot 10^6$	$1 609.344 \cdot 10^{-3}$	63 360	5 280
1 UK nautical mile	= UK mile	1 853.18	$1 853.18 \cdot 10^1$	$1 853.18 \cdot 10^2$	$1 853.18 \cdot 10^3$	$1 853.18 \cdot 10^6$	$1 853.18 \cdot 10^{-3}$	72 960	6 080
1 international nautic. mile*	= n mile*	1852	$1852 \cdot 10^1$	$1852 \cdot 10^2$	$1852 \cdot 10^3$	$1852 \cdot 10^6$	$1852 \cdot 10^{-3}$	729 13.39	6 076.12

Unit	Abbreviation	yd	fathom	rod	chain	furlong	mile	UK mile	n mile*
1 meter	= m	1.093 61	$5.468 07 \cdot 10^{-1}$	$1.988 39 \cdot 10^{-1}$	$4.970 97 \cdot 10^{-2}$	$4.970 97 \cdot 10^{-3}$	$6.213 71 \cdot 10^{-4}$	$5.396 12 \cdot 10^{-4}$	$5.399 57 \cdot 10^{-4}$
1 decimeter	= dm	$1.093 61 \cdot 10^{-1}$	$5.468 07 \cdot 10^{-2}$	$1.988 39 \cdot 10^{-2}$	$4.970 97 \cdot 10^{-3}$	$4.970 97 \cdot 10^{-4}$	$6.213 71 \cdot 10^{-5}$	$5.396 12 \cdot 10^{-5}$	$5.399 57 \cdot 10^{-5}$
1 centimeter	= cm	$1.093 61 \cdot 10^{-2}$	$5.468 07 \cdot 10^{-3}$	$1.988 39 \cdot 10^{-3}$	$4.970 97 \cdot 10^{-4}$	$4.970 97 \cdot 10^{-5}$	$6.213 71 \cdot 10^{-6}$	$5.396 12 \cdot 10^{-6}$	$5.399 57 \cdot 10^{-6}$
1 millimeter	= mm	$1.093 61 \cdot 10^{-3}$	$5.468 07 \cdot 10^{-4}$	$1.988 39 \cdot 10^{-4}$	$4.970 97 \cdot 10^{-5}$	$4.970 97 \cdot 10^{-6}$	$6.213 71 \cdot 10^{-7}$	$5.396 12 \cdot 10^{-7}$	$5.399 57 \cdot 10^{-7}$
1 micrometer	= $\mu\text{m}$	$1.093 61 \cdot 10^{-6}$	$5.468 07 \cdot 10^{-7}$	$1.988 39 \cdot 10^{-7}$	$4.970 97 \cdot 10^{-8}$	$4.970 97 \cdot 10^{-9}$	$6.213 71 \cdot 10^{-10}$	$5.396 12 \cdot 10^{-10}$	$5.399 57 \cdot 10^{-10}$
1 kilometer	= km	$1.093 61 \cdot 10^3$	$5.468 07 \cdot 10^2$	$1.988 39 \cdot 10^3$	$4.970 97 \cdot 10^4$	$4.970 97$	$6.213 71 \cdot 10^{-1}$	$5.396 12 \cdot 10^{-1}$	$5.399 57 \cdot 10^{-1}$
1 inch	= in.	0.027 777 8	0.013 888 9	$5.050 51 \cdot 10^{-2}$	$1.262 63 \cdot 10^{-2}$	$1.262 63 \cdot 10^{-4}$	$1.578 28 \cdot 10^{-5}$	$1.370 62 \cdot 10^{-5}$	$1.371 49 \cdot 10^{-5}$
1 foot	= ft	0.333 333	0.166 667	0.060 606 1	0.015 151 5	$1.515 15 \cdot 10^{-3}$	$1.893 94 \cdot 10^{-4}$	$1.644 74 \cdot 10^{-4}$	$1.645 79 \cdot 10^{-4}$
1 yard	= yd	1	0.5	0.181 818	0.045 454 5	$4.545 45 \cdot 10^{-3}$	$5.681 82 \cdot 10^{-4}$	$4.934 21 \cdot 10^{-4}$	$4.937 37 \cdot 10^{-4}$
1 fathom	= fathom	2	1	0.363 636	0.090 909 1	$9.090 91 \cdot 10^{-3}$	$1.136 36 \cdot 10^{-3}$	$9.868 42 \cdot 10^{-4}$	$9.874 73 \cdot 10^{-4}$
1 rod	= rod	5.5	2.75	1	0.25	0.025	$0.003 125$	$2.713 82 \cdot 10^{-3}$	$2.715 55 \cdot 10^{-3}$
1 chain	= chain	22	11	4	1	0.1	0.012 5	0.010 855 3	0.010 862 2
1 furlong	= furlong	220	110	40	10	1	0.125	0.108 553	0.108 622
1 mile	= mile	1 760	880	320	80	8	1	0.868 421	0.868 976
1 UK nautical mile	= UK mile	2 026.67	1 013.33	368.484 8	92.121 2	9.212 12	1.151 52	1	1.000 64
1 international nautic. mile*	= n mile*	2 025.37	1 012.69	368.249	92.062 4	9.206 24	1.150 78	0.999 361	1

Example: 1 m =  $10^3$  mm = 1000 mm; 1 yd =  $9.144 \cdot 10^{-1}$  m = 0.914 4 m;

1 rod =  $2.713 82 \cdot 10^{-3}$  UK mile = 0.002 713 82 UK mile;

1 fathom =  $9.874 73 \cdot 10^{-4}$  n mile = 0.000 987 473 n mile

Exact values are printed in bold type.

The United Kingdom units are denoted by the prefix UK

The American units are denoted by the prefix US

\*International nautical mile = US nautical mile (1 n mile = 1 US mile = 1852 m)

Some other Anglo-American units of length are:

1 mil = 0.001 inch

1 hand = 1/8 yard

1 point (printers) = 1/2592 yard

1 link = 22/100 yard

1 line (button) = 1/1440 yard

1 span = 9 inch



Pressure and stress equivalents

The unit of pressure and stress in the International System (SI) is the pascal, abbreviation Pa;  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 0.1013716 \text{ kp/m}^2 \approx 0.102 \text{ kp/m}^2 = 0.02088554 \text{ lb/ft}^2$ .

The unit of pressure and stress in the metric gravitational system is the kilopond per square meter, abbreviation  $\text{kp/m}^2$ ;  $1 \text{ kp/m}^2 = 9.80665 \text{ Pa} = 9.80665 \text{ N/m}^2 = 0.204816 \text{ lb/ft}^2$ .  
The Anglin-American unit of pressure and stress is the pound force per square foot, abbreviation  $\text{lb/ft}^2$ ;  $1 \text{ lb/ft}^2 = 47.8803 \text{ Pa} = 47.8803 \text{ N/m}^2 = 4.88243 \text{ kp/m}^2$ .

جدول ۱-۱۱: ضرایب تبدیل واحدهای فشار و تنش

Unit	Abbreviation	$\text{Pa}$ $\text{N/m}^2$	$\text{N/cm}^2$	$\text{N/mm}^2$	bar	atm	$\mu\text{bar}$	$\text{kp/m}^2$	$\text{kp/cm}^2$ at	$\text{kp/mm}^2$	$\text{mmHg}$ , $\text{O}^\circ$
1 pascal	$= \text{Pa}$	1	$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-2}$	$10^1$	$1.01972 \cdot 10^{-1}$	$1.01972 \cdot 10^{-1}$	$1.01972 \cdot 10^{-1}$	$1.01972 \cdot 10^{-1}$
1 newton per square meter	$= \text{N/m}^2$										
1 newton per square centimeter	$= \text{N/cm}^2$	$10^4$	1	$10^{-3}$	$10^{-1}$	$10^1$	$10^3$	$1.01972 \cdot 10^1$	$1.01972 \cdot 10^{-1}$	$1.01972 \cdot 10^{-3}$	$1.01972 \cdot 10^1$
1 newton per square millimeter	$= \text{N/mm}^2$	$10^6$	$10^2$	1	$10^1$	$10^3$	$10^5$	$1.01972 \cdot 10^3$	$1.01972 \cdot 10^1$	$1.01972 \cdot 10^{-1}$	$1.01972 \cdot 10^3$
1 bar	$= \text{bar}$	$10^5$	$10^1$	$10^{-1}$	1	$10^1$	$10^3$	$1.01972 \cdot 10^3$	$1.01972$	$1.01972 \cdot 10^{-1}$	$1.01972 \cdot 10^3$
1 millibar	$= \text{mbar}$	$10^3$	$10^{-1}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	1	$10^3$	$1.01972 \cdot 10^1$	$1.01972 \cdot 10^{-3}$	$1.01972 \cdot 10^{-5}$	$1.01972 \cdot 10^1$
1 microbar	$= \mu\text{bar}$	$10^{-1}$	$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-1}$	1	$1.01972 \cdot 10^{-1}$	$1.01972 \cdot 10^{-3}$	$1.01972 \cdot 10^{-5}$	$1.01972 \cdot 10^{-1}$
1 kilopond per square meter	$= \text{kp/m}^2$	9.80665	$9.80665 \cdot 10^{-4}$	$9.80665 \cdot 10^{-6}$	$9.80665 \cdot 10^{-5}$	$9.80665 \cdot 10^{-2}$	$9.80665 \cdot 10^1$	1	$10^{-4}$	$10^{-6}$	1
1 kilopond per square centimeter	$= \text{kp/cm}^2$	$9.80665 \cdot 10^4$	$9.80665$	$9.80665 \cdot 10^{-1}$	$9.80665 \cdot 10^{-1}$	$9.80665 \cdot 10^2$	$9.80665 \cdot 10^4$	$10^4$	1	$10^{-1}$	$10^4$
1 technical atmosphere	$= \text{at}$	$9.80665 \cdot 10^4$	$9.80665$	$9.80665 \cdot 10^{-1}$	$9.80665 \cdot 10^{-1}$	$9.80665 \cdot 10^2$	$9.80665 \cdot 10^4$	$10^4$	$10^1$	1	$10^4$
1 kilopond per square millimeter	$= \text{kp/mm}^2$	$9.80665 \cdot 10^6$	$9.80665 \cdot 10^2$	$9.80665$	$9.80665 \cdot 10^1$	$9.80665 \cdot 10^3$	$9.80665 \cdot 10^5$	$9.80665 \cdot 10^5$	$10^3$	$10^{-4}$	$10^6$
1 millimeter of water	$= \text{mm H}_2\text{O}^\circ$	9.80665	$9.80665 \cdot 10^{-4}$	$9.80665 \cdot 10^{-6}$	$9.80665 \cdot 10^{-5}$	$9.80665 \cdot 10^{-2}$	$9.80665 \cdot 10^1$	1	$10^{-4}$	$10^{-6}$	1
1 millimeter of mercury	$= \text{mm Hg}$	133.322	$133.322 \cdot 10^{-4}$	$133.322 \cdot 10^{-6}$	$133.322 \cdot 10^{-5}$	$133.322 \cdot 10^{-2}$	$133.322 \cdot 10^1$	13.5951	$13.5951 \cdot 10^{-4}$	$13.5951 \cdot 10^{-6}$	13.5951
1 torr	$= 1 \text{ torr}^\circ$										
1 standard atmosphere	$= \text{atm}$	$1.01325 \cdot 10^5$	$1.01325 \cdot 10^1$	$1.01325 \cdot 10^{-1}$	$1.01325$	$1.01325 \cdot 10^2$	$1.01325 \cdot 10^4$	$1.03323 \cdot 10^4$	$1.03323$	$1.03323 \cdot 10^{-2}$	$1.03323 \cdot 10^4$
1 poundal per square foot	$= \text{pdl/ft}^2$	1.48816	$1.48816 \cdot 10^{-4}$	$1.48816 \cdot 10^{-6}$	$1.48816 \cdot 10^{-5}$	$1.48816 \cdot 10^{-2}$	$1.48816 \cdot 10^1$	$1.51750 \cdot 10^{-1}$	$1.51750 \cdot 10^{-3}$	$1.51750 \cdot 10^{-5}$	$1.51750 \cdot 10^{-1}$
1 pound-force per square inch	$= \text{lb/in}^2$	$6.89476 \cdot 10^3$	$6.89476 \cdot 10^{-1}$	$6.89476 \cdot 10^{-3}$	$6.89476 \cdot 10^{-2}$	$6.89476 \cdot 10^1$	$6.89476 \cdot 10^3$	$7.03070 \cdot 10^3$	$7.03070 \cdot 10^{-3}$	$7.03070 \cdot 10^{-5}$	$7.03070 \cdot 10^{-1}$
1 pound-force per square foot	$= \text{lb/ft}^2$	47.8803	$47.8803 \cdot 10^{-4}$	$47.8803 \cdot 10^{-6}$	$47.8803 \cdot 10^{-5}$	$47.8803 \cdot 10^1$	$47.8803 \cdot 10^3$	$4.88243$	$4.88243 \cdot 10^{-4}$	$4.88243 \cdot 10^{-6}$	4.88243
1 UK ton-force per square inch	$= \text{UK tonf/in}^2$	$1.54443 \cdot 10^7$	$1.54443 \cdot 10^3$	$1.54443 \cdot 10^{-1}$	$1.54443 \cdot 10^1$	$1.54443 \cdot 10^3$	$1.54443 \cdot 10^5$	$1.57488 \cdot 10^5$	$1.57488 \cdot 10^{-5}$	$1.57488 \cdot 10^{-7}$	$1.57488 \cdot 10^5$
1 UK ton-force per square foot	$= \text{UK tonf/ft}^2$	$1.07252 \cdot 10^5$	$1.07252 \cdot 10^1$	$1.07252 \cdot 10^{-1}$	$1.07252$	$1.07252 \cdot 10^2$	$1.07252 \cdot 10^4$	$1.09366 \cdot 10^4$	$1.09366$	$1.09366 \cdot 10^{-2}$	$1.09366 \cdot 10^4$
1 inch of water	$= \text{in. H}_2\text{O}$	$2.49089 \cdot 10^3$	$2.49089 \cdot 10^{-1}$	$2.49089 \cdot 10^{-3}$	$2.49089 \cdot 10^{-2}$	$2.49089 \cdot 10^1$	$2.49089 \cdot 10^3$	25.4	$25.4 \cdot 10^{-4}$	$25.4 \cdot 10^{-6}$	25.4
1 foot of water	$= \text{ft. H}_2\text{O}$	$29.8907 \cdot 10^3$	$29.8907 \cdot 10^{-1}$	$29.8907 \cdot 10^{-3}$	$29.8907 \cdot 10^{-2}$	$29.8907 \cdot 10^1$	$29.8907 \cdot 10^3$	304.8	$304.8 \cdot 10^{-4}$	$304.8 \cdot 10^{-6}$	304.8
1 barometric inch of mercury	$= \text{in. Hg}$	$33.8639 \cdot 10^3$	$33.8639 \cdot 10^{-1}$	$33.8639 \cdot 10^{-3}$	$33.8639 \cdot 10^{-2}$	$33.8639 \cdot 10^1$	$33.8639 \cdot 10^3$	345.316	$345.316 \cdot 10^{-4}$	$345.316 \cdot 10^{-6}$	345.316





## Force equivalents

The unit of force in the International System (SI) is the newton, abbreviation N;  $1 \text{ N} = 0.101\,971\,6 \text{ kp} \approx 0.102 \text{ kp} = 0.224\,09 \text{ lbf}$ .  
 The unit of force in the metric gravitational system is the kilopond, abbreviation kp;  $1 \text{ kp} = 9.806\,65 \text{ N} = 2.204\,62 \text{ lbf}$ .  
 The Anglo-American unit of force is the pound-force, abbreviation lbf;  $1 \text{ lbf} = 4.448\,22 \text{ N} = 0.453\,592 \text{ kp}$ .

## جدول ۱-۱۱۷: ضرایب تبدیل واحدهای نیرو

Unit	Abbreviation	N	kN	MN	mN	dyne	sn	kp
1 newton	= N	1	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^3$	$10^5$	$10^{-3}$	$1.019\,72 \cdot 10^{-1}$
1 kilonewton	= kN	$10^3$	1	$10^{-3}$	$10^6$	$10^8$	1	$1.019\,72 \cdot 10^2$
1 meganewton	= MN	$10^6$	$10^3$	1	$10^9$	$10^{11}$	$10^3$	$1.019\,72 \cdot 10^5$
1 millinewton	= mN	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	1	$10^2$	$10^{-6}$	$1.019\,72 \cdot 10^{-4}$
1 dyne	= dyne	$10^{-5}$	$10^{-8}$	$10^{-11}$	$10^{-3}$	1	$10^{-8}$	$1.019\,2 \cdot 10^{-6}$
1 sthene	= sn	$10^3$	1	$10^{-3}$	$10^6$	$10^8$	1	$1.019\,2 \cdot 10^2$
1 kilopond	= kp	9.806 65	$9.806\,65 \cdot 10^{-3}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-6}$	$9.806\,65 \cdot 10^3$	$9.806\,65 \cdot 10^5$	$9.806\,65 \cdot 10^{-3}$	1
1 megapond	= Mp	$9.806\,65 \cdot 10^3$	9.806 65	$9.806\,65 \cdot 10^{-3}$	$9.806\,65 \cdot 10^6$	$9.806\,65 \cdot 10^8$	9.806 65	$10^3$
1 pond	= p	$9.806\,65 \cdot 10^{-3}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-6}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-9}$	9.806 65	$9.806\,65 \cdot 10^2$	$9.806\,65 \cdot 10^{-6}$	$10^{-3}$
1 millipond	= mp	$9.806\,65 \cdot 10^{-6}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-9}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-12}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-3}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-1}$	$9.806\,65 \cdot 10^{-9}$	$10^{-6}$
1 poundal	= pdl	$1.382\,55 \cdot 10^{-1}$	$1.382\,55 \cdot 10^{-4}$	$1.382\,55 \cdot 10^{-7}$	$1.382\,55 \cdot 10^2$	$1.382\,55 \cdot 10^4$	$1.382\,55 \cdot 10^{-4}$	$1.409\,81 \cdot 10^{-2}$
1 pound-force	= lbf	4.448 22	$4.448\,22 \cdot 10^{-3}$	$4.448\,22 \cdot 10^{-6}$	$4.448\,22 \cdot 10^3$	$4.448\,22 \cdot 10^5$	$4.448\,22 \cdot 10^{-3}$	$4.535\,92 \cdot 10^{-1}$
1 UK ton-force	= UK tonf	9 964.02	$9\,964.02 \cdot 10^{-3}$	$9\,964.02 \cdot 10^{-6}$	$9\,964.02 \cdot 10^3$	$9\,964.02 \cdot 10^5$	$9\,964.02 \cdot 10^{-3}$	1 016.05
1 ounce-force	= ozf	$2.780\,14 \cdot 10^{-1}$	$2.780\,14 \cdot 10^{-4}$	$2.780\,14 \cdot 10^{-7}$	$2.780\,14 \cdot 10^2$	$2.780\,14 \cdot 10^4$	$2.780\,14 \cdot 10^{-4}$	$2.834\,95 \cdot 10^{-2}$
Unit	Abbreviation	Mp	p	mp	pdl	lbf	UK tonf	ozf
1 newton	= N	$1.019\,72 \cdot 10^{-4}$	$1.019\,72 \cdot 10^2$	$1.019\,72 \cdot 10^5$	7.233 01	$2.248\,09 \cdot 10^{-1}$	$1.003\,61 \cdot 10^{-4}$	3.596 94
1 kilonewton	= kN	$1.019\,72 \cdot 10^{-1}$	$1.019\,72 \cdot 10^5$	$1.019\,72 \cdot 10^8$	7.233 01 $\cdot 10^3$	$2.248\,09 \cdot 10^2$	$1.003\,61 \cdot 10^{-1}$	$3.596\,94 \cdot 10^3$
1 meganewton	= MN	$1.019\,72 \cdot 10^2$	$1.019\,72 \cdot 10^8$	$1.019\,72 \cdot 10^{11}$	7.233 01 $\cdot 10^6$	$2.248\,09 \cdot 10^5$	$1.003\,61 \cdot 10^2$	$3.596\,94 \cdot 10^6$
1 millinewton	= mN	$1.019\,72 \cdot 10^{-7}$	$1.019\,72 \cdot 10^{-1}$	$1.019\,72 \cdot 10^2$	7.233 01 $\cdot 10^{-3}$	$2.248\,09 \cdot 10^{-4}$	$1.003\,61 \cdot 10^{-7}$	$3.596\,94 \cdot 10^{-3}$
1 dyne	= dyne	$1.019\,72 \cdot 10^{-5}$	$1.019\,72 \cdot 10^{-3}$	1.019 72	7.233 01 $\cdot 10^{-5}$	$2.248\,09 \cdot 10^{-6}$	$1.003\,61 \cdot 10^{-9}$	$3.596\,94 \cdot 10^{-5}$
1 sthene	= sn	$1.019\,72 \cdot 10^{-1}$	$1.019\,72 \cdot 10^5$	$1.019\,72 \cdot 10^8$	7.233 01 $\cdot 10^3$	$2.248\,09 \cdot 10^2$	$1.003\,61 \cdot 10^{-1}$	$3.596\,94 \cdot 10^2$
1 kilopond	= kp	$10^{-3}$	$10^3$	$10^6$	70.931 6	2.204 62	$9.842\,07 \cdot 10^{-4}$	35.274 0
1 megapond	= Mp	1	$10^6$	$10^9$	70.931 6 $\cdot 10^3$	$2.204\,62 \cdot 10^3$	$9.842\,07 \cdot 10^{-1}$	$35.274\,0 \cdot 10^3$
1 pond	= p	$10^{-6}$	1	$10^3$	70.931 6 $\cdot 10^{-3}$	$2.204\,62 \cdot 10^{-3}$	$9.842\,07 \cdot 10^{-7}$	$35.274\,0 \cdot 10^{-3}$
1 millipond	= mp	$10^{-9}$	$10^{-3}$	1	70.931 6 $\cdot 10^{-6}$	$2.204\,62 \cdot 10^{-6}$	$9.842\,07 \cdot 10^{-10}$	$35.274\,0 \cdot 10^{-6}$
1 poundal	= pdl	$1.409\,81 \cdot 10^{-2}$	$1.409\,81 \cdot 10^1$	$1.409\,81 \cdot 10^4$	1	0.031 081 0	$1.387\,54 \cdot 10^{-5}$	0.497 295
1 pound-force	= lbf	$4.535\,92 \cdot 10^{-4}$	$4.535\,92 \cdot 10^2$	$4.535\,92 \cdot 10^5$	32.174 0	1	$4.464\,29 \cdot 10^{-4}$	16
1 UK ton-force	= UK tonf	$1\,016.05 \cdot 10^{-3}$	$1\,016.05 \cdot 10^3$	$1\,016.05 \cdot 10^6$	72 069.9	2 240	1	35 840
1 ounce-force	= ozf	$2.834\,95 \cdot 10^{-2}$	$2.834\,95 \cdot 10^1$	$2.834\,95 \cdot 10^4$	2.010 88	0.062 5	$2.790\,18 \cdot 10^{-5}$	1

Examples:  $1 \text{ N} = 0.101\,972 \text{ kp}$ ;  $1 \text{ kN} = 1.003\,61 \cdot 10^{-1} \text{ tonf} = 0.100\,361 \text{ tonf}$ ;  
 $1 \text{ kp} = 9.806\,65 \cdot 10^{-3} \text{ kN} = 0.009\,806\,65 \text{ kN}$ ;  $1 \text{ lbf} = 4.464\,29 \cdot 10^{-4} \text{ tonf} = 0.000\,446\,429 \text{ tonf}$ .

Exact values are printed in bold type.

The United Kingdom units are denoted by the prefix UK.

The American units are denoted by the prefix US.

## جدول ۲-۱۱۷: روابط بین واحدهای نیرو: نیوتون، استن و دین

Unit	Abbreviation	mN	N	kN	MN	msn	csn	dsn	sn	dasn	hsn	ksn	dyne
1 millinewton	= mN	1	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^2$
1 newton	= N	$10^3$	1	$10^{-3}$	$10^{-6}$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^5$
1 kilonewton	= kN	$10^6$	$10^3$	1	$10^{-3}$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^8$
1 meganewton	= MN	$10^9$	$10^6$	$10^3$	1	$10^6$	$10^5$	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	1	$10^{11}$
1 millisthene	= msn	$10^3$	1	$10^{-3}$	$10^{-6}$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^5$
1 centisthene	= csn	$10^4$	$10^1$	$10^{-2}$	$10^{-5}$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^6$
1 decisthene	= dsn	$10^5$	$10^2$	$10^{-1}$	$10^{-4}$	$10^2$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^7$
1 sthene	= sn	$10^6$	$10^3$	1	$10^{-3}$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^8$
1 decasthene	= dasn	$10^7$	$10^4$	$10^1$	$10^{-2}$	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^9$
1 hectosthene	= hsn	$10^8$	$10^5$	$10^2$	$10^{-1}$	$10^5$	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	1	$10^{-1}$	$10^{10}$
1 kilosthene	= ksn	$10^9$	$10^6$	$10^3$	1	$10^6$	$10^5$	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	1	$10^{11}$
1 dyne	= dyne	$10^{-2}$	$10^{-5}$	$10^{-8}$	$10^{-11}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$	1

Examples:  $1 \text{ N} = 10^{-1} \text{ csn} = 0.1 \text{ csn}$ ;  $1 \text{ hsn} = 10^2 \text{ kN} = 100 \text{ kN}$ .