

# ترمودینامیک ۲۰۱

تالیف دکتر بهزاد خداکریمی

## مفاهیم بنیادی ترمودینامیک

### ۱-۱ - شکل‌های مختلف انرژی

انرژی جنبشی:

$$E_k = \frac{1}{2} mV^2 \quad (۱)$$

انرژی پتانسیل گرانشی:

$$E_p = mgz \quad (۲)$$

انرژی کل:

$$E = U + E_k + E_p = U + \frac{1}{2} mV^2 + mgz \quad (۳)$$

### ۱-۲ - کار

$$W = \int F ds \quad (۴)$$

کار انبساط و تراکم

$$W = \int PdV \quad (۵)$$

کار الکتریکی

$$W_{elec} = VI\Delta t \quad (۶)$$

که  $V$  و  $I$  به ترتیب اختلاف پتانسیل و شدت جریان الکتریکی را نشان می‌دهند.  
توان الکتریکی نیز عبارت است از:

$$\dot{W}_{elec} = VI \quad (۷)$$

کار محور

$$W_{Shaft} = \tau n \pi \quad (۸)$$

که  $n$  و  $\tau$  به ترتیب تعداد دورها و گشتاور وارده را نشان می‌دهند.

$$\dot{W}_{Shaft} = \tau n \pi \quad (۹)$$

که  $\dot{n}$  تعداد دورها در واحد زمان است.

کار فنر

$$W = \frac{1}{2} k(x_2^2 - x_1^2) \quad (۱۰)$$

## کار گرانشی

$$W_{\text{grav}} = mg(z_2 - z_1) \quad (11)$$

## ۳-۱- گاز ایده‌آل

$$PV = n\bar{R}T \quad (12)$$

در معادله بالا، P فشار، T دما، V حجم، n تعداد مول و  $\bar{R}$  ثابت جهانی گازها است.  
در سیستم SI:

$$\bar{R} = 8.314 \text{ J/molK}$$

$$\bar{R} = 1.987 \text{ cal/molK} \quad \text{همچنین}$$

$$PV = mRT \quad \text{یا} \quad P = \rho RT \quad (13)$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

## ۴-۱- آنتالپی

$$H = U + PV \quad \text{یا} \quad h = u + Pv \quad (14)$$

## ۵-۱- گرمای ویژه

$$C_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (15)$$

$$C_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (16)$$

$$C_v = \frac{3}{2}R \quad \text{۱- در مولکول‌های تک اتمی:}$$

$$C_v = \frac{5}{2}R \quad \text{۲- در مولکول‌های دو اتمی صلب:}$$

$$C_v = 3R \quad \text{۳- در مولکول‌های چند اتمی غیر خطی:}$$

برای گازهای ایده‌آل:

$$\frac{C_p}{C_v} = k \quad (17)$$

$$C_p - C_v = R \quad (18)$$

$$C_p = \frac{kR}{k-1}, \quad C_v = \frac{R}{k-1}$$

## ۶-۱- رفتار گازهای ایده‌آل در دما صفر مطلق

$$u = \int_0^T C_v dT, \quad h = \int_0^T C_p dT \quad (21)$$

هرگاه  $C_p$  و  $C_v$  ثابت باشند:

$$u = C_v T, \quad h = C_p T \quad (22)$$

T بر حسب کلونین

### ۱-۷- ماده تراکم‌ناپذیر

$$C_p = C_v = C$$

$$\Delta u \approx C_{av} (T_f - T_i) \quad (23)$$

$$\Delta h = \Delta u + v \Delta P \approx C_{av} \Delta T + v \Delta P \quad (24)$$

جامدات:

$$\Delta h = \Delta u \approx C \Delta T \quad (25)$$

مایعات:

الف) فشار ثابت

$$\Delta h = \Delta u \approx C \Delta T \quad (26)$$

ب) دما ثابت

$$\Delta h = v \Delta P \quad (27)$$

### ۱-۸- ضریب انبساط گرمایی فشار ثابت $\beta$ و ضریب تراکم‌پذیری دما ثابت $\kappa$

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad (28)$$

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (29)$$

برای گاز ایده‌آل:

$$\kappa = \frac{1}{P} \quad \text{و} \quad \beta = \frac{1}{T}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = -\left( \frac{\partial \ln \rho}{\partial T} \right)_P = \left( \frac{\partial \ln V}{\partial T} \right)_P \quad (30)$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T = \left( \frac{\partial \ln \rho}{\partial P} \right)_T = -\left( \frac{\partial \ln V}{\partial P} \right)_T \quad (31)$$

## خواص مواد خالص

### ۲-۱ - خواص ترمودینامیکی مواد

#### ۱- مخلوط بخار - مایع اشباع

کیفیت:

$$x = \frac{m_g}{m_t} = \frac{m_g}{m_f + m_g} \quad (1)$$

اندیس‌های  $f$  و  $g$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی خواص مربوط به مایع و بخار هستند.

هرگاه  $Z$  یک خاصیت مخلوط اشباع بوده و  $Z_f$  و  $Z_g$  به ترتیب نشان‌دهنده آن خاصیت در حالت مایع اشباع و بخار اشباع باشند:

$$Z = xZ_g + (1-x)Z_f \quad (2)$$

$$:Z_{fg} = Z_g - Z_f$$

$$Z = Z_f + xZ_{fg} \quad (3)$$

$$v = v_f + xv_{fg} \quad (4)$$

$$h = h_f + xh_{fg} \quad (5)$$

$$s = s_f + xs_{fg} \quad (6)$$

### ۲-۲ - معادله کلایپرون - کلایپرون

$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{\alpha\beta}}{Tv_{\alpha\beta}} \quad (8)$$

$h_{\alpha\beta}$  گرمای تغییر فاز و  $v_{\alpha\beta}$  تغییر حجم مربوط به تغییر فاز از  $\alpha$  به  $\beta$  است.

**الف) تبخیر**

$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{fg}}{T(v_g - v_f)} \quad (9)$$

$h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر،  $v_g$  حجم مولی بخار و  $v_f$  حجم مولی مایع است.

$$v_g \gg v_f, \quad v_g = \frac{RT}{P}$$

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = -\frac{h_{fg}}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (10)$$

**ب) تصعید**

$$\frac{d(\ln P)}{dT} = \frac{h_{sg}}{RT^2} \quad (11)$$

$h_{sg}$  گرمای نهان تصعید است.

**ج) ذوب**

$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{sf}}{T(v_f - v_s)} \quad (12)$$

$h_{sf}$  گرمای نهان ذوب،  $v_f$  حجم مولی مایع و  $v_s$  حجم مولی جامد است.

## قانون اول ترمودینامیک

### ۳-۱ - قانون اول ترمودینامیک

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sys} \quad (1)$$

$$Q - W = \Delta E \quad \text{سیستم بسته} \quad (2)$$

$$\delta Q - \delta W = dE \quad \text{شکل دیفرانسیلی} \quad (3)$$

$$W_{out,net} = Q_{in,net} \quad \text{یا} \quad \oint \delta Q = \oint \delta W \quad \text{فرایند چرخه‌ای} \quad (4)$$

Q: گرمای ورودی به سیستم و W: کار انجام شده توسط سیستم

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (5)$$

در سیستم‌های ساکن:

$$Q - W = \Delta U \quad (6)$$

### ۳-۲ - قانون اول ترمودینامیک برای سیستم باز (حجم کنترل)

موازنه جرم:

$$\sum_i m_i - \sum_e m_e = \Delta m_{c.v} \quad (7)$$

$$\sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e = \frac{dm_{c.v}}{dt} \quad (8)$$

موازنه انرژی:

$$\frac{dE_{c.v}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left( u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left( u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (9)$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{c.v} + \dot{m}_e (P_e v_e) - \dot{m}_i (P_i v_i) \quad (10)$$

$$\frac{dE_{c.v}}{dt} = \dot{Q}_{c.v} - \dot{W}_{c.v} + \sum_i \dot{m}_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_e \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (11)$$

حالت پایا - جریان پایا (SSSF)

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_e \dot{m}_e \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{c.v} - \dot{W}_{c.v} = \sum_e \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_i \dot{m}_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) \quad (13)$$

حالت یکنواخت - جریان یکنواخت (USUF)

$$(m_v - m_1)_{c.v} + \sum_e m_e - \sum_i m_i = 0 \quad (14)$$

$$Q_{c.v} + \sum_i m_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) = W_{c.v} + \sum_e m_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) + \left[ m_v \left( u_v + \frac{V_v^2}{2} + gz_v \right) - m_1 \left( u_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) \right] \quad (15)$$

اندیس‌های 1 و e به ترتیب به ورودی و خروجی و اندیس‌های 1 و 2 به ترتیب به حالت‌های اولیه و نهایی اشاره می‌کنند.

پر کردن مخزن:

$$T_v = kT_i \quad (15)$$

تخلیه گاز:

$$T_e = \frac{T_1}{k} \quad (15)$$

$$k = C_p / C_v$$

۳-۳ کاربرد قانون اول در برخی وسایل مهندسی

۱- شیبوره‌های همگرا و واگرا

$$\dot{Q} = \dot{W} = 0, \Delta E_p = 0$$

$$h_e - h_i + \frac{V_e^2 - V_i^2}{2} = 0$$

۲- توربین:

$$\dot{Q} = 0, \Delta E_p = 0, \Delta E_k = 0$$

$$-\dot{W} = \dot{m}(h_v - h_1)$$

۳- کمپرسور

$$\dot{Q} = 0, \Delta E_p = 0, \Delta E_k = 0$$

$$-\dot{W} = \dot{m}(h_v - h_1)$$

محفظه اختلاط

$$\text{معادله پیوستگی: } \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (16)$$

$$\text{قانون اول: } \sum_{in} \dot{m}_i h_i = \sum_{out} \dot{m}_e h_e \quad (17)$$



### ۳-۴ - فرایند اختناق

$$h_i = h_e \quad (18)$$

ضریب ژول - تامسون

$$\mu = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_h \quad (19)$$

$$\mu = -\frac{1}{C_p} \left( \frac{\partial h}{\partial P} \right)_T \quad (20)$$

$$\mu = \frac{T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V}{C_p} \quad (21)$$

$$\mu = \frac{RT^2}{PC_p} \left( \frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \quad (22)$$

### ۳-۵ - فرایندهای برگشت پذیر گازهای ایده آل

۱- فرایند حجم ثابت (ایزومتر)

$$w = 0, \quad q = \Delta u + w = \Delta u + 0 = \Delta u = C_v \Delta T$$

۲- فرایند فشار ثابت (ایزوبار)

$$w = \int P dv = P(v_2 - v_1) = R \Delta T$$

$$q = \Delta u + w = C_v \Delta T + R \Delta T = C_p \Delta T = \Delta h$$

۳- فرایند دما ثابت (ایزوترم)

$$\Delta u = 0, \quad \Delta h = 0$$

$$q = w = \int P dv = \int \frac{RT}{v} dv = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

۴- فرایند بی دررو (آدیباتیک)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (23)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k \quad (24)$$

برای فرایند بی دررو و برگشت پذیر گاز ایده آل در یک سیستم بسته:

$$q = 0$$

$$w = -\Delta u = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-k} = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-k} \quad (25)$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} = 1 + \frac{R}{C_v} \quad (26)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{R}{C_p}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\frac{R}{C_v}}$$

گازهای تک اتمی :  $k \approx 1/67$

گازهای دو اتمی :  $k \approx 1/4$

گازهای چند اتمی :  $k \approx 1/32$

#### ۵- فرایند پلی تروپیک

$$PV^n = \text{cte} \quad (27)$$

$n$  : توان پلی تروپیک

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (28)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \quad (29)$$

مقدار کار در فرایند پلی تروپیک:

$$w = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n} = \frac{k-1}{1-n} \Delta u \quad (n \neq 1) \quad (30)$$

## قانون دوم ترمودینامیک

### ۴-۱- مقدمه

### ۴-۳- بازده گرمایی

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (1)$$

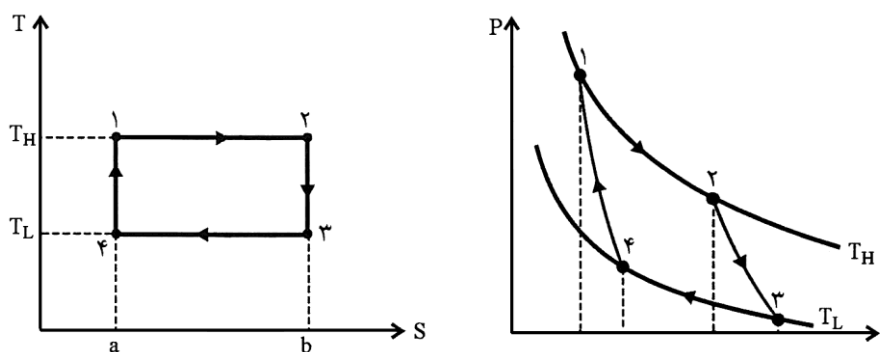
منبع دما بالا (با دمای  $T_H$ ) و منبع دما پایین (با دمای  $T_L$ ):

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} \quad (2)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (3)$$

### ۴-۲- چرخه کارنو

نمودارهای  $P-v$  و  $T-S$ ، برای چرخه کارنو:



$$S_{1 \rightarrow 2} = Q_H, \quad S_{3 \rightarrow 4} = Q_L$$

$$Q_H = T_H(S_2 - S_1), \quad Q_L = T_L(S_3 - S_4)$$

### ۴-۳- مقیاس دمای ترمودینامیکی

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L} \quad (4)$$

که در معادله بالا دماها، مطلق هستند.

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (5)$$

#### ۴-۴ - ضریب عملکرد (COP)

ضریب عملکرد یخچال:

$$\text{COP}_R = \frac{\text{مقدار گرمای گرفته شده از ناحیه سرد}}{\text{کار خالص ورودی}} = \frac{Q_L}{W_{\text{net,in}}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad (۶)$$

ضریب عملکرد پمپ گرمایی:

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{\text{گرمای داده شده به منبع گرم}}{\text{کار خالص ورودی}} = \frac{Q_H}{W_{\text{net,in}}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}} \quad (۷)$$

$$\text{COP}_{R,\text{rev}} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1} \quad (۸)$$

$$\text{COP}_{\text{HP,rev}} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}} \quad (۹)$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} - \text{COP}_R = 1$$

#### ۴-۵ - نامساوی کلانزیوس

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (۱۰)$$

## آنتروپی

### ۵-۱- تعریف آنتروپی

برای یک سیستم بسته در فرایند برگشت پذیر:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (3)$$

### ۵-۲- تغییر آنتروپی در یک فرایند دما ثابت برگشت پذیر داخلی

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (4)$$

$T$ : دمای مطلق ثابت سیستم و  $Q$ : انتقال گرما.

### ۵-۳- تولید آنتروپی

$$\Delta S_{\text{sys}} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{\text{gen}} \quad (6)$$

تغییر آنتروپی کل:

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_{\text{sur}} \geq 0 \quad (7)$$

### • تغییر آنتروپی محیط

$$\Delta S_{\text{sur}} = \frac{Q_{\text{sur}}}{T_{\text{sur}}} \quad (8)$$

$Q_{\text{sur}}$ : گرمای منتقل شده

$T_{\text{sur}}$ : دمایی که طی آن انتقال گرما صورت گرفته است.

### ۵-۴- معادلات Tds

$$Tds = du + PdV \quad (9)$$

$$Tds = dh - v dP \quad (10)$$

### ۵-۵- تغییر آنتروپی در گازهای ایده آل

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (14)$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (15)$$

اگر گرماهای ویژه گازهای ایده آل را ثابت در نظر بگیریم:

$$s_2 - s_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (16)$$

$$s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (17)$$

### 6-5- تغییر آنتروپی در مایعات و جامدات

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C \frac{dT}{T} \approx C_{av} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (18)$$

$C_{av}$ ، گرمای ویژه‌ی متوسط ماده در محدوده‌ی دمایی داده شده است.

### 7-5- موازنه آنتروپی

$$S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{sys} \quad (19)$$

#### تغییر آنتروپی سیستم

$$\Delta S_{sys} = S_2 - S_1 \quad (20)$$

#### انتقال آنتروپی ( $S_{in}, S_{out}$ )

انتقال آنتروپی توسط انتقال گرما:

$$S_{heat} = \frac{Q}{T} \quad (21)$$

انتقال آنتروپی توسط انتقال جرم:

$$S_{mass} = ms \quad (22)$$

#### موازنه آنتروپی برای سیستم‌های بسته

$$\Delta S_{sys} = S_{gen} + \sum \frac{Q_k}{T_k} \quad (23)$$

در یک سیستم بسته آدیاباتیک:

$$\Delta S_{sys} = S_{gen} \quad (24)$$

موازنه آنتروپی برای یک سیستم بسته و محیط اطراف:

$$S_{gen} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{sur} \quad (25)$$

که در معادله بالا:  $\Delta S_{sys} = m(s_2 - s_1)$

اگر دما ثابت باشد:  $\Delta S_{sur} = \frac{Q_{sur}}{T_{sur}}$

#### موازنه آنتروپی برای سیستم‌های باز

$$\Delta S_{c.v} = \sum m_i s_i - \sum m_e s_e + \sum \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} \quad (26)$$

و به شکل آهنگی:

$$\Delta \dot{S}_{c.v} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{S}_{gen} \quad (27)$$

در حالت پایا:

$$\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (28)$$

اگر یک ورودی و یک خروجی وجود داشته باشد:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_e - s_i) - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (29)$$

و اگر علاوه بر شرایط بالا، وسیله، آدیاباتیک هم باشد:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_e - s_i) \quad (30)$$

## ۵-۸- بازدهی ایزوتروپیک

### کار در جریان پایا و برگشت پذیر

$$w_{rev} = -\int_1^2 v dP - \Delta E_k - \Delta E_p \quad (31)$$

اگر تغییرات انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ناچیز باشد:

$$w_{rev} = -\int_1^2 v dP \quad (32)$$

برای یک سیستم تراکم ناپذیر:

$$w_{rev} = -v(P_2 - P_1) - \Delta E_k - \Delta E_p \quad (33)$$

اگر تغییرات انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ناچیز باشد:

$$w_{rev} = -v(P_2 - P_1) \quad (34)$$

$$W_{rev} = -V(P_2 - P_1) = -\frac{m}{\rho}(P_2 - P_1)$$

$$\dot{W}_{rev} = -\frac{\dot{m}}{\rho}(P_2 - P_1)$$

### بازدهی ایزوتروپیک توربین‌ها

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} \quad (35)$$

$w_a$ : کار خروجی واقعی توربین و  $w_s$ : کار خروجی در حالت ایزوتروپیک.

$$w_a = h_i - h_{e,a} \quad , \quad w_s = h_i - h_{e,s}$$

$$\eta_T = \frac{h_i - h_{e,a}}{h_i - h_{e,s}} \quad (36)$$

$h_{e,s}$  و  $h_{e,a}$  به ترتیب نشان دهنده‌ی آنتالپی در شرایط خروجی برای فرایندهای واقعی و ایزوتروپیک

هرگاه گاز ایده‌آل داشته باشیم:

$$\eta_T = \frac{T_i - T_{e,a}}{T_i - T_{e,s}} \quad (37)$$

$$\frac{T_{e,s}}{T_i} = \left(\frac{P_e}{P_i}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$w_s = v(P_i - P_e) \quad (38)$$

### بازده ایزنتروپیک کمپرسورها و پمپها

$$\eta_c = \frac{w_s}{w_a} \quad (39)$$

$$\eta_c = \frac{h_{e,s} - h_i}{h_{e,a} - h_i} \quad (40)$$

با  $h_{e,s}$  و  $h_{e,a}$  به ترتیب نشان دهنده آنتالپی در شرایط خروجی واقعی و ایزنتروپیک گاز ایده آل:

$$\eta_c = \frac{T_{e,s} - T_i}{T_{e,a} - T_i}$$

### بازده ایزنتروپیک نازلها

$$\eta_N = \frac{V_{e,a}^r}{V_{e,s}^r} \quad (41)$$

با صرف نظر از تغییرات انرژی پتانسیل:

$$\eta_N = \frac{h_i - h_{e,a}}{h_i - h_{e,s}} \quad (42)$$

### ۵-۹- کار لازم برای کمپرسور در فرایندهای مختلف

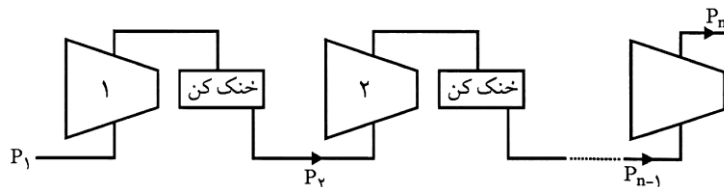
$$w_{in} = \frac{nR(T_r - T_i)}{n-1} = \frac{nRT_i}{n-1} \left[ \left(\frac{P_r}{P_i}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (n \neq 1) \quad (43)$$

فرایند ایزنتروپیک:  $n = k$  فرایند پلی تروپیک:  $1 < n < k$

برای فرایند دما ثابت ( $n = 1$ ):

$$w_{in} = RT \ln \frac{P_r}{P_i} \quad (44)$$

در حالتی که نسبت فشار در هر مرحله یکسان باشد کار لازم حداقل می شود:



$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{P_r}{P_r} = \frac{P_r}{P_r} = \dots = \frac{P_n}{P_{n-1}} = k$$

$$P_n = P_m k^{n-m}$$

$$\frac{P_m}{P_{m-1}} = \left(\frac{P_n}{P_i}\right)^{\frac{1}{n}}$$



## سیکل‌های توانی بخار و گاز

### ۱-۶ راندمان گرمایی سیکل

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (1)$$

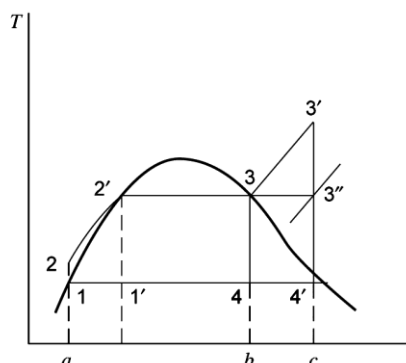
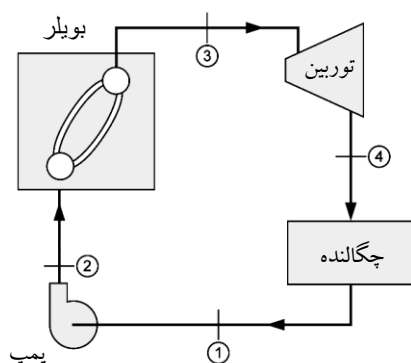
$W_{net}$ : کار خالص تولید شده  $Q_{in}$ : کل گرمای داده شده

### بخش اول: سیکل‌های توانی بخار

#### ۲-۶ سیکل کارنو

این سیکل در فصل ۴ به صورت کامل مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

#### ۳-۶ سیکل رانکین



### بخش دوم: موتورهای احتراق داخلی

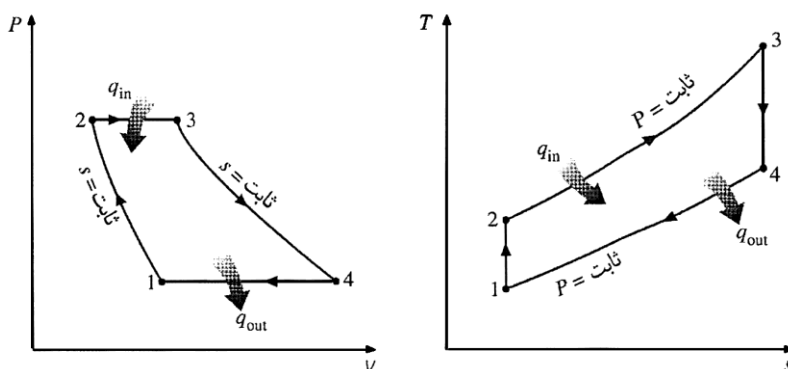
نسبت تراکم ( $r$ ):

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}} \quad (1)$$

فشار مؤثر متوسط:

$$MEP = \frac{W_{net}}{(V_{max} - V_{min})} = \frac{W_{net}}{(v_{max} - v_{min})} \quad (2)$$

### ۶-۴ - سیکل استاندارد هوایی اتو



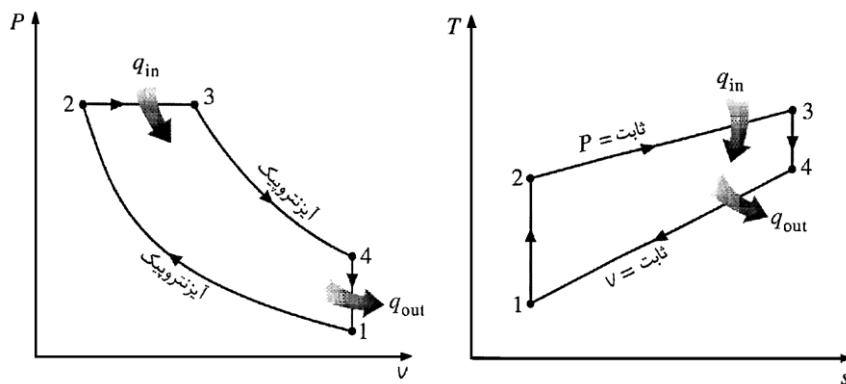
$$\text{نسبت تراکم: } r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} \quad (۳)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} \quad (۴)$$

راندمان سیکل اتو:

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (۵)$$

### ۶-۵ - سیکل استاندارد هوایی دیزل



راندمان گرمایی سیکل دیزل:

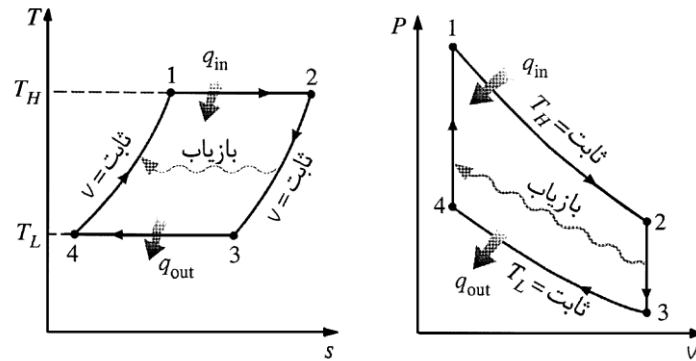
$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (۶)$$

$$\text{نسبت انقطاع: } r_c = \frac{V_3}{V_2} \quad (۷)$$

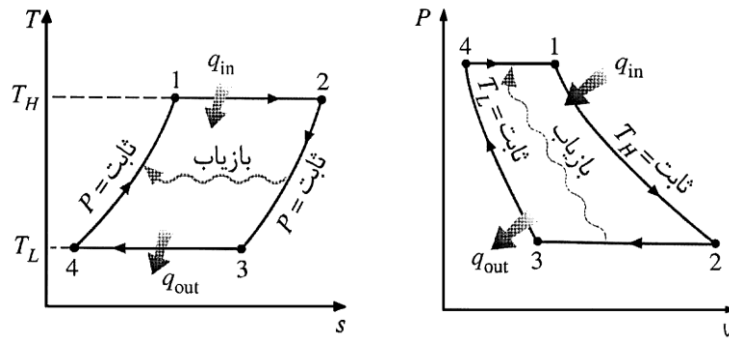
$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] \quad (۸)$$

## ۶-۶- سیکل‌های استرلینگ و اریکسون

الف) سیکل استرلینگ



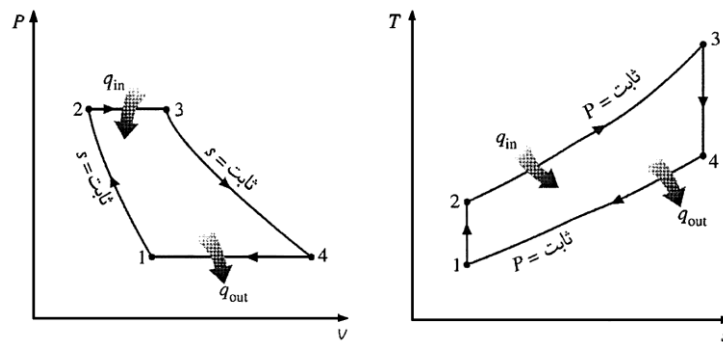
ب) سیکل اریکسون



راندمان سه سیکل:

$$\eta_{th,Stirling} = \eta_{th,Ericsson} = \eta_{th,Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (9)$$

## ۶-۷- سیکل برایتون



راندمان سیکل برایتون:

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad (10-6)$$

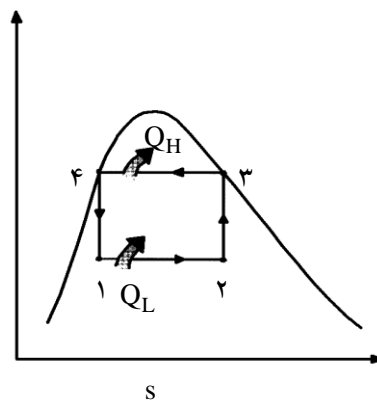
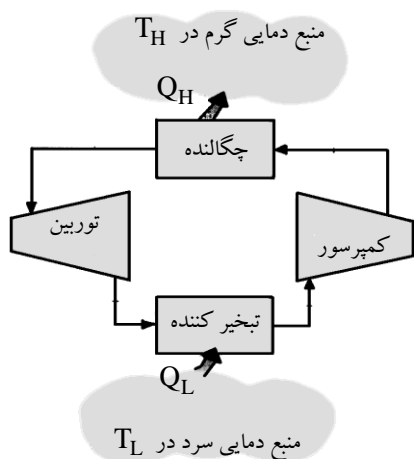
که  $r_p = P_2 / P_1$  (نسبت فشار) و  $k$  نسبت گرمای ویژه است.

خلاصه تعداد فرایندهای مختلف در سیکل‌های مطالعه شده

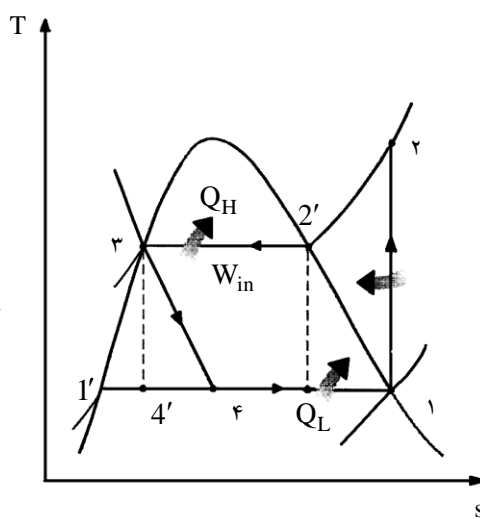
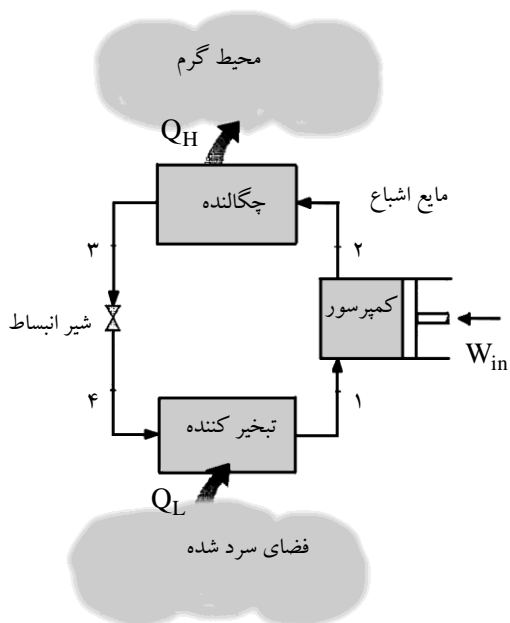
V=cte	P=cte	T=cte	s=cte	
-	-	۲	۲	کارنو
۲	-	-	۲	اتو
۱	۱	-	۲	دیزل
۲	-	۲	-	استرلینگ
-	۲	۲	-	اریکسون
-	۲	-	۲	برایتون

## سیکل‌های تبرید

### ۱-۷ - سیکل کارنو معکوس



### ۲-۷ - سیکل تبرید تراکم بخار ایده‌آل



ضرایب کارایی:

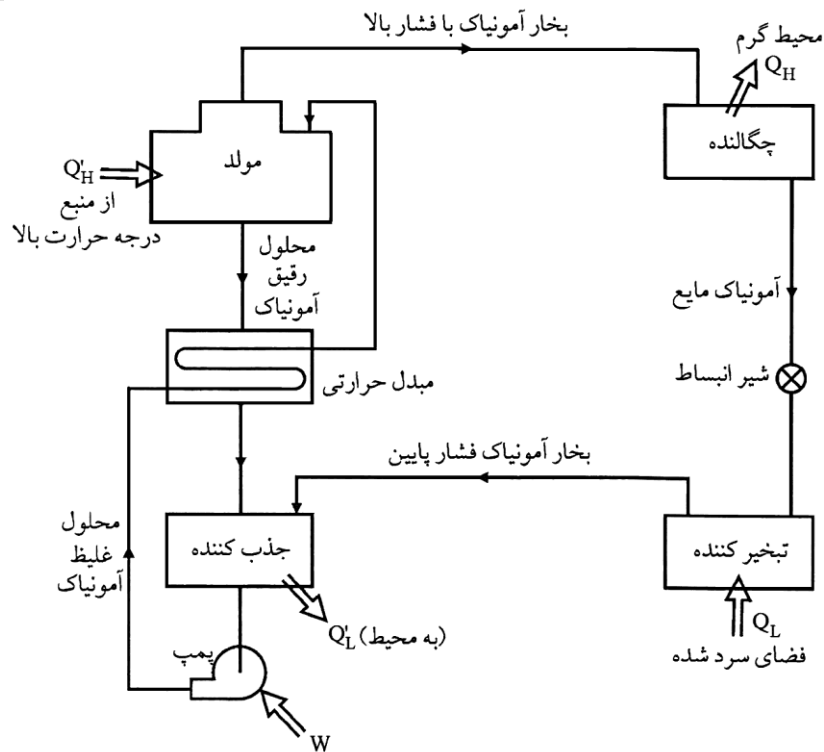
$$\text{COP}_R = \frac{Q_L}{W_{\text{act,in}}} = \frac{h_1 - h_f}{h_v - h_1} \quad (1)$$

$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{Q_H}{W_{\text{act,in}}} = \frac{h_v - h_f}{h_v - h_1} \quad (2)$$

### ۳-۷- سیکل تبرید جذبی

کارایی سیستم‌های جذبی:

$$\text{COP}_{\text{absorp}} = \frac{Q_L}{Q_{\text{gen}} + W_{\text{pump,in}}} \cong \frac{Q_L}{Q_{\text{gen}}} \quad (3)$$



## بررسی رفتار P-V-T اجسام خالص از طریق معادلات حالت

### ۸-۲- معادلات حالت نظری

معادلات ویریال

$$Z = \frac{PV}{RT} = 1 + B'P + C'P^2 + \dots \quad (1)$$

C': ضریب ویریال مرتبه ۳

B': ضریب ویریال مرتبه ۲

Z: ضریب تراکم پذیری (نشان دهنده میزان انحراف از رفتار گاز ایده آل است).

شکل دیگر معادله ویریال:

$$Z = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \dots \quad (2)$$

B: ضریب ویریال مرتبه ۲      C: ضریب ویریال مرتبه ۳      .....

روابط بین ضرایب معادله حالت ویریال

$$B' = \frac{B}{RT} \quad C' = \frac{C - B^2}{(RT)^2} \quad D' = \frac{D - 3BC + 2B^3}{(RT)^3}$$

گاز ایده آل (کامل)

معادله حالت گاز ایده آل:

$$PV = RT$$

### ۸-۲- معادلات حالت تعمیم یافته

معادله واندروالس

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (5)$$

معادله ردلیش – کوانگ

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{T^2 V(V + b)} \quad (6)$$

برای تعیین ثابت‌های a و b در معادلات حالت درجه سوم:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{T_c, V_c, P_c} = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_{T_c, V_c, P_c} = 0$$

معادله واندروالس:

$$a = \frac{27}{64} \frac{R^2 T_c^2}{P_c}, \quad b = \frac{RT_c}{8P_c}, \quad V_c = \frac{3RT_c}{8P_c} = 3b, \quad Z_c = \frac{P_c V_c}{RT_c} = \frac{3}{8}$$

معادله ردلیش - کوانگ:

$$a = \frac{0.42778 R^2 T_c^{2.5}}{P_c}, \quad b = \frac{0.872 RT_c}{P_c}, \quad Z_c = 0.33$$

اصل حالات متناظر دوپارامتری

معادله ردلیش - کوانگ:

$$\begin{cases} Z = \frac{1}{1-h} - \frac{4/93}{T_r^{1.5}} \left( \frac{h}{1+h} \right) \\ h = \frac{0.87 P_r}{Z T_r} \end{cases} \quad (7)$$

$T_r = \frac{T}{T_c}$  و  $P_r = \frac{P}{P_c}$  به ترتیب فشار و دمای کاهشده

معادله واندروالس:

$$Z^3 - \left( \frac{P_r}{8T_r} + 1 \right) Z^2 + \left( \frac{27P_r}{64T_r^2} \right) Z - \frac{27P_r^2}{512T_r^3} = 0 \quad (8)$$

اصل حالات متناظر سه پارامتری

پارامتری مرکزی ( $\omega$ ):

$$\omega = -1 - \log P_r^{\text{sat}} \Big|_{T_r=0.7} \quad (9)$$

معادله پیترز:

$$Z = Z' + \omega Z' \quad (10)$$

$$\begin{cases} Z' = Z'(P_r, T_r) \\ Z' = Z'(P_r, T_r) \end{cases} \Rightarrow Z = Z(T_r, P_r, \omega)$$

معادله دوم:

$$Z = 1 + \frac{BP}{RT} = 1 + \frac{BP_c}{RT_c} \frac{P_r}{T_r}$$

$$\frac{BP_c}{RT_c} = B' + \omega B' \quad (11)$$

$$B' = B'(T_r) \quad \text{و} \quad B' = B'(T_r)$$

۸-۳- معادلات حالت تجربی

معادله حالت BWR:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2}}{V^2} + \frac{bRT - a}{V^3} + \frac{a\alpha}{V^6} + \frac{c}{V^3 T^2} \left( 1 + \frac{\gamma}{V^2} \right) \exp\left( -\frac{\gamma}{V^2} \right) \quad (12)$$



## روابط بین خواص ترمودینامیکی و روابط بین آنها

### ۹-۱- توابع انرژی $G, A, H, U$

آنتالپی (H):

$$H = U + PV \quad (۱)$$

انرژی آزاد همپولتز (A):

$$A = U - TS \quad (۲)$$

انرژی آزاد گیبس (G):

$$G = H - TS \quad (۳)$$

دیفرانسیل توابع انرژی:

$$dU = TdS - PdV \quad (۴)$$

$$dH = TdS + VdP \quad (۵)$$

$$dA = -SdT - PdV \quad (۶)$$

$$dG = -SdT + VdP \quad (۷)$$

### ۹-۲- روابط ماکسول

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V \quad (۸)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P \quad (۹)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \quad (۱۰)$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T \quad (۱۱)$$

### ۹-۳- روابط مربوط به $C_p$ و $C_v$

$$\left(\frac{\partial C_p}{\partial P}\right)_T = -T \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2}\right)_P \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial C_v}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T^2}\right)_V \quad (13)$$

$$C_p - C_v = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \times \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T \quad (14)$$

$$C_p - C_v = T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \times \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \quad (15)$$

با استفاده از ضرایب تراکم پذیری  $\beta$  و  $\kappa$ :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = (1 - \beta T) V \quad (16)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T = (\kappa P - \beta T) V \quad (17)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\beta V \quad (18)$$

$$C_p - C_v = \left(\frac{\beta^2}{\kappa}\right) T V \quad (19)$$

### ۹-۴- روش خواص باقی مانده جهت محاسبه خواص ترمودینامیکی

$$M^R = M - M^{ig} \quad (20)$$

حجم باقی مانده یا پس ماند:

$$V^R = \alpha = V - \frac{RT}{P} \quad (\text{یا } \alpha = \frac{RT}{P} - V) \quad (21)$$

$$\lim_{P \rightarrow \infty} \alpha = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{RT(Z-1)}{P} = B'RT = B$$

### ۹-۵- دمای بویل

در دمای بویل:

$$\lim_{P \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T = 0 \quad \text{یا} \quad \lim_{P \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial(PV)}{\partial P}\right)_T = 0$$

$$T = T @ \text{بویل}; B = B' = 0$$

## خواص ترمودینامیکی مخلوط‌های همگن

### ۱۰-۱- روابط خاصیت برای سیستم‌هایی با ترکیب متغیر

برای یک مخلوط با ترکیب متغیر:

$$d(nU) = Td(nS) - Pd(nV) + \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i \quad (۱)$$

$$d(nH) = Td(nS) + (nV) dP + \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i \quad (۲)$$

$$d(nA) = -(nS) dT - Pd(nV) + \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i \quad (۳)$$

$$d(nG) = -(nS) dT - (nV) dP + \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i \quad (۴)$$

$$\mu_i = \left[ \frac{\partial(nU)}{\partial n_i} \right]_{nS, nV, n_{j \neq i}} = \left[ \frac{\partial(nH)}{\partial n_i} \right]_{nS, P, n_{j \neq i}} = \left[ \frac{\partial(nA)}{\partial n_i} \right]_{T, nV, n_{j \neq i}} = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_{j \neq i}} \quad (۵)$$

$$\left( \frac{\partial \mu_i}{\partial T} \right)_{P, n} = - \left[ \frac{\partial(nS)}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_{j \neq i}} \quad (۶)$$

$$\left( \frac{\partial \mu_i}{\partial P} \right)_{T, n} = \left[ \frac{\partial(nV)}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_{j \neq i}} \quad (۷)$$

### ۱۰-۲- خواص جزئی مولی

$$\bar{M}_i = \left[ \frac{\partial(nM)}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_{j \neq i}} \quad (۸)$$

$$\mu_i = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_{j \neq i}} \quad (۹)$$

$$\begin{cases} H = U + PV \\ \bar{H}_i = \bar{U}_i + P\bar{V}_i \\ H_i = U_i + PV_i \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \\ \bar{C}_p = \left( \frac{\partial \bar{H}_i}{\partial T} \right)_{P,x} \\ C_{p_i} = \left( \frac{\partial H_i}{\partial T} \right)_p \end{cases}, \quad \begin{cases} dG = -SdT + VdP \\ d\bar{G}_i = -\bar{S}_i dT + \bar{V}_i dP \\ dG_i = -S_i dT + V_i dP \end{cases}$$

$$M = \sum_{i=1}^N x_i \bar{M}_i \quad \text{یا} \quad nM = \sum_{i=1}^N n_i \bar{M}_i \quad (10)$$

$$M_i = M \Big|_{x_i=1} = \bar{M}_i \Big|_{x_i=1}$$

### ۱۰-۳- معادله گیبس - دوهم

$$\left[ \frac{\partial M}{\partial T} \right]_{P,x} dT + \left[ \frac{\partial M}{\partial P} \right]_{T,x} dP - \sum_{i=1}^N x_i d\bar{M}_i = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i d\bar{M}_i = 0 \quad (\text{P و T ثابت}) \quad (12)$$

برای یک محلول دو جزئی:

$$\bar{M}_1 = M + (1 - x_1) \frac{dM}{dx_1} \quad (13)$$

$$\bar{M}_2 = M - x_1 \frac{dM}{dx_1} \quad (14)$$

### ۱۰-۴- محلول‌های ایده‌آل

$$\bar{V}_i = \left[ \frac{\partial(nV)}{\partial n_i} \right]_{T,P,n_{j \neq i}} = V_i \quad (15)$$

$$nV = \sum_{i=1}^N n_i \bar{V}_i = \sum_{i=1}^N n_i V_i$$

$$V = \sum_{i=1}^N x_i \bar{V}_i = \sum_{i=1}^N x_i V_i$$

مخلوط گاز ایده‌آل:

$$\begin{cases} V_1 = V_2 = \dots = V_i = \frac{RT}{P} \\ \bar{V}_1 = \bar{V}_2 = \dots = \bar{V}_i = \frac{RT}{P} \end{cases}$$

### ۱۰-۵- فوگاسیته

$$dG_i = RT d \ln f_i \quad (T = \text{cte}) \quad (16)$$

$$\lim_{P \rightarrow 0} \frac{f_i}{P} = 1 \quad (17)$$

$$d\bar{G}_i = RT d \ln \hat{f}_i \quad (T = \text{cte}) \quad (18)$$

$$\lim_{P \rightarrow 0} \frac{\hat{f}_i}{x_i P} = 1 \quad (19)$$

برای هر جزء مخلوط گاز ایده آل:

$$\hat{f}_i = x_i P \quad (20)$$

### ۱۰-۶- ضریب فوگاسیته

$$\phi_i = \frac{f_i}{P} \quad (21)$$

$$\hat{\phi}_i = \frac{\hat{f}_i}{x_i P} \quad (22)$$

تعیین ضریب فوگاسیته:

$$\ln \phi = \int_0^P (Z-1) \frac{dP}{P} \quad (T = \text{cte}) \quad (23)$$

$$\ln \phi = \int_0^P (Z_i-1) \frac{dP}{P} \quad (T = \text{cte}) \quad (24)$$

$$\ln \phi_i = -\frac{1}{RT} \int_0^P \left( \frac{RT}{P} - \bar{V}_i \right) dP \quad (T = \text{cte}) \quad (25)$$

$$\ln \hat{\phi}_i = \int_0^P (\bar{Z}_i-1) \frac{dP}{P} \quad (T = \text{cte}) \quad (26)$$

$$\ln \hat{\phi}_i = -\frac{1}{RT} \int_0^P \left( \frac{RT}{P} - \bar{V}_i \right) dP \quad (T = \text{cte}) \quad (27)$$

### ۱۰-۷- تعیین فوگاسیته حالت‌های مختلف یک ماده خالص

#### تعیین فوگاسیته بخار داغ

$$\ln \frac{f_i}{P^*} = \frac{1}{R} \left[ \frac{H_i - H_i^*}{T} - (S_i - S_i^*) \right] \quad (T = \text{cte}) \quad (28)$$

\*: حالت مرجع که در آن فشار  $P^*$  به حد کافی کوچک است و در نتیجه می‌توان گاز را ایده آل در نظر گرفت ( $f_i^* = P^*$ ).

#### تعیین فوگاسیته بخار و مایع اشباع

$$f_i^V = f_i^L = f_i^{\text{sat}}$$

$$\phi_i^{\text{sat}} = \frac{f_i^{\text{sat}}}{P_i^{\text{sat}}} \quad (29)$$

$$\phi_i^{\text{V}} = \phi_i^{\text{L}} = \phi_i^{\text{sat}} \quad (30)$$

$$f_i^{\text{L}} = f_i^{\text{sat}} = \phi_i^{\text{sat}} P_i^{\text{sat}}$$

تعیین فوگاسیته مایع متراکم

$$\frac{f_i}{f_i^{\text{sat}}} = \exp\left(\frac{V_{\text{ave}}}{RT}(P - P_i^{\text{sat}})\right) \quad (T = \text{cte}) \quad (31)$$

$$f_i = \phi_i^{\text{sat}} P_i^{\text{sat}} \exp\left(\frac{V_{\text{ave}}}{RT}(P - P_i^{\text{sat}})\right) \quad (T = \text{cte}) \quad (32)$$

۱۰-۸- اثر دما و فشار بر روی فوگاسیته و ضریب فوگاسیته

الف) اثر فشار

$$\left(\frac{\partial \ln f_i}{\partial P}\right)_T = \frac{V_i}{RT}, \quad \left(\frac{\partial \ln \phi_i}{\partial P}\right)_T = \frac{V_i - V_i^{\text{ig}}}{RT} = \frac{V_i^{\text{R}}}{RT} \quad (33)$$

$$\left(\frac{\partial \ln \hat{f}_i}{\partial P}\right)_{T,x} = \frac{\bar{V}_i}{RT}, \quad \left(\frac{\partial \ln \hat{\phi}_i}{\partial P}\right)_{T,x} = \frac{V_i^{\text{R}}}{RT} \quad (34)$$

ب) اثر دما:

$$\left(\frac{\partial \ln f_i}{\partial T}\right)_P = -\frac{H_i^{\text{R}}}{RT^2}, \quad \left(\frac{\partial \ln \phi_i}{\partial T}\right)_P = -\frac{H_i^{\text{R}}}{RT^2} \quad (35)$$

$$\left(\frac{\partial \ln \hat{f}_i}{\partial T}\right)_{P,x} = -\frac{\bar{H}_i^{\text{R}}}{RT^2}, \quad \left(\frac{\partial \ln \hat{\phi}_i}{\partial T}\right)_{P,x} = -\frac{\bar{H}_i^{\text{R}}}{RT^2} \quad (36)$$

۱۰-۹- روابط بین  $\hat{f}_i$  و  $f$ ،  $\hat{\phi}_i$  و  $\phi$

الف)  $\hat{\phi}_i$  و  $\phi$

$$\ln \hat{\phi}_i = \left[ \frac{\partial(\ln \phi)}{\partial n_i} \right]_{T,P,n_j \neq i} \quad (37)$$

$$\ln \phi = \sum_{i=1}^N x_i \ln \hat{\phi}_i \quad (38)$$

ب)  $f$  و  $\hat{f}_i$ :

$$\ln \left( \frac{\hat{f}_i}{x_i} \right) = \left[ \frac{\partial(\ln f)}{\partial n_i} \right]_{T,P,n_j \neq i} \quad (39)$$

$$\ln f = \sum_{i=1}^N x_i \ln \left( \frac{\hat{f}_i}{x_i} \right) \quad (40)$$

با استفاده از معادله گیبس - دوهم:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^N x_i d \ln \hat{\phi}_i &= 0, & (41) \\ \sum_{i=1}^N x_i d \ln \left( \frac{\hat{f}_i}{x_i} \right) &= 0, & (42) \end{aligned} \right.$$

$$\sum_{i=1}^N x_i d \ln \hat{f}_i = 0 \quad (43)$$

### ۱۰-۱۰ - قانون لوئیس رندال و قانون هنری

قانون لوئیس - رندال:

$$\hat{f}_i^{id} = x_i f_i \quad (44)$$

$$\hat{f}_i^{id} = x_i f_i^* \quad (45)$$

$f_i^*$  فوگاسیته جزء  $i$  در حالت استاندارد، در همان دما و فشار مخلوط  
قانون هنری:

$$\hat{f}_i^{id} = x_i k_i \quad (46)$$

$k_i$ : ثابت هنری

### ۱۱-۱۰ - تغییرات خاصیت در اثر اختلاط

$$\Delta M = M - \sum_{i=1}^N x_i M_i \quad (48)$$

که  $M_i$  بیان گر خاصیت مولی  $i$  در یک حالت استاندارد مشخص است.

تغییرات خواص مختلف در اثر اختلاط:

$$\frac{\Delta G}{RT} = \frac{1}{RT} \sum_{i=1}^N x_i (\bar{G}_i - G_i) \quad (50)$$

$$\frac{P\Delta V}{RT} = \frac{P}{RT} \sum_{i=1}^N x_i (\bar{V}_i - V_i) \quad (51)$$

$$\frac{\Delta H}{RT} = \frac{1}{RT} \sum_{i=1}^N x_i (\bar{H}_i - H_i) \quad (52)$$

$$\frac{\Delta S}{R} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N x_i (\bar{S}_i - S_i) \quad (53)$$

تغییرات خواص را می توان بر حسب  $G$  هم بیان نمود:

$$\frac{\Delta G}{RT} = \frac{1}{RT} \sum_{i=1}^N x_i (\bar{G}_i - G_i) \quad (54)$$

$$\frac{P\Delta V}{RT} = \frac{P}{RT} \sum_{i=1}^N x_i \left[ \frac{\partial (\bar{G}_i - G_i)}{\partial \ln P} \right]_{T,x} \quad (55)$$

$$\frac{\Delta H}{RT} = - \sum_{i=1}^N x_i \left[ \frac{\partial \left( \frac{\bar{G}_i - G_i^*}{RT} \right)}{\partial \ln T} \right]_{P,x} \quad (56)$$

$$\frac{\Delta S}{R} = - \sum_{i=1}^N x_i \left[ \frac{\partial (\bar{G}_i - G_i^*)}{\partial \ln T} \right]_{P,x} \quad (57)$$

## ۱۰-۱۲ - فعالیت

فعالیت (اکتیویته) جزء  $i$  در محلول:

$$\hat{a}_i = \frac{\hat{f}_i}{f_i^*} \quad (58)$$

$$\bar{G}_i - G_i^* = RT \ln \hat{a}_i \quad (59)$$

بنابراین:

$$\frac{\Delta G}{RT} = \sum_{i=1}^N x_i \ln \hat{a}_i \quad (60)$$

$$\frac{P\Delta V}{RT} = \sum_{i=1}^N x_i \left( \frac{\partial \ln \hat{a}_i}{\partial \ln P} \right)_{T,x} \quad (61)$$

$$\frac{\Delta H}{RT} = - \sum_{i=1}^N x_i \left( \frac{\partial \ln \hat{a}_i}{\partial \ln T} \right)_{P,x} \quad (62)$$

$$\frac{\Delta S}{R} = - \sum_{i=1}^N x_i \ln \hat{a}_i - \sum_{i=1}^N x_i \left( \frac{\partial \ln \hat{a}_i}{\partial \ln T} \right)_{P,x} \quad (63)$$

برای یک محلول ایده آل داریم:

$$\hat{a}_i^{\text{id}} = x_i \quad (64)$$

$$\frac{\Delta G^{\text{id}}}{RT} = \sum_{i=1}^N x_i \ln x_i \quad (65)$$

$$\Delta V^{\text{id}} = 0 \quad (66)$$

$$\Delta H^{\text{id}} = 0 \quad (67)$$

$$\frac{\Delta S^{\text{id}}}{R} = - \sum_{i=1}^N x_i \ln x_i \quad (68)$$

برای یک گاز ایده آل:

$$\hat{a}_i = \frac{\hat{f}_i}{f_i^*} = \frac{x_i P}{P} = x_i$$



خواص محلول‌های ایده‌آل و مخلوط گازهای ایده‌آل:

$$G^{id} = \sum_{i=1}^N x_i G_i^{\circ} + RT \sum_{i=1}^N x_i \ln x_i \quad (69)$$

$$V^{id} = \sum_{i=1}^N x_i V_i^{\circ} \quad (70)$$

$$H^{id} = \sum_{i=1}^N x_i H_i^{\circ} \quad (71)$$

$$S^{id} = \sum_{i=1}^N x_i S_i^{\circ} - R \sum_{i=1}^N x_i \ln x_i \quad (72)$$

برای محلول‌های ایده‌آل و مخلوط گازهای ایده‌آل:

$$\mu_i^{id} = G_i^{id} + RT \ln x_i \quad (73)$$

### ۱۰-۱۳ - خواص اضافی (Excess Properties) و ضریب فعالیت

$$M^E = M - M^{id} \quad (74)$$

$$\Delta M^E = \Delta M - \Delta M^{id} \quad (75)$$

$M^E$ : خاصیت اضافی محلول       $\Delta M^E$ : تغییر خاصیت اضافی در اثر اختلاط

$$\Delta M^E = M^E \quad (76)$$

ضریب فعالیت (ضریب اکتیویته) جزء  $i$  در محلول:

$$\gamma_i = \frac{\hat{a}_i}{x_i} \quad (77)$$

$$\frac{G^E}{RT} = \sum_{i=1}^N x_i \ln \gamma_i \quad (78)$$

$$\ln \gamma_i = \left[ \frac{\partial \left( \frac{nG^E}{RT} \right)}{\partial n_i} \right]_{T,P,n_{j \neq i}} = \frac{\bar{G}_i^E}{RT} \quad (79)$$

$$\frac{G^E}{RT} = \beta_{x_1, x_2} \quad (\text{معادله مارگولس یک پارامتری}) \quad (80)$$

$$\ln \gamma_1 = \beta x_2^2 \quad (81)$$

$$\ln \gamma_2 = \beta x_1^2 \quad (82)$$

رابطه بین ضریب فعالیت و فوگاسیته:

$$\gamma_i = \frac{\hat{f}_i}{x_i \hat{f}_i^{\circ}} = \frac{\hat{f}_i}{\hat{f}_i^{id}} \quad (83)$$

روابط بین انرژی آزاد گیبس اضافی با سایر خواص اضافی

$$G^E = H^E - TS^E \quad (86)$$

$$V^E = \left( \frac{\partial G^E}{\partial P} \right)_{T,x} \quad (87)$$

$$S^E = - \left( \frac{\partial G^E}{\partial T} \right)_{P,x} \quad (88)$$

$$\frac{H^E}{RT} = -T \left[ \frac{\partial \left( \frac{G^E}{RT} \right)}{\partial T} \right]_{P,x} \quad (89)$$

$$C_P^E = \left( \frac{\partial H^E}{\partial T} \right)_{P,x} = T \left( \frac{\partial S^E}{\partial T} \right)_{P,x} \quad (90)$$

رابطه بین تغییرات ضریب فعالیت برحسب خواص اضافی:

$$\frac{PV^E}{RT} = \sum_{i=1}^N x_i \left( \frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial \ln P} \right)_{T,x} \quad (91)$$

$$\frac{H^E}{RT} = - \sum_{i=1}^N x_i \left( \frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial \ln T} \right)_{P,x} \quad (92)$$

$$\frac{S^E}{R} = - \sum_{i=1}^N x_i \ln \gamma_i - \sum_{i=1}^N x_i \left( \frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial \ln T} \right)_{P,x} \quad (93)$$

## ۱۰-۱- مخلوطهای گازی

معادله حالت ویریال

$$Z = 1 + \frac{BP}{RT}$$

ضریب ویریال مرتبه دوم برای یک مخلوط گازی:

$$B = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j B_{ij} \quad (94)$$

برای یک مخلوط دوتایی:

$$B = y_1^2 B_{11} + 2y_1 y_2 B_{12} + y_2^2 B_{22} \quad (95)$$

$B_{11}$  و  $B_{22}$ : ضرایب ویریال برای یک جزء خالص و  $B_{12}$ : ضریب تقاطع است.

تعیین  $\ln \hat{\phi}_1$  و  $\ln \hat{\phi}_2$  را برای یک مخلوط گازی دو جزئی

$$\delta_{12} = 2B_{12} - B_{11} - B_{22} \quad (96)$$

$$B = y_1^2 B_{11} + y_2^2 B_{22} + y_1 y_2 \delta_{12} \quad (97)$$

$$\ln \hat{\phi}_1 = \frac{P}{RT} (B_{11} + y_2^2 \delta_{12}) \quad (98)$$

$$\ln \hat{\phi}_2 = \frac{P}{RT} (B_{22} + y_1^2 \delta_{12}) \quad (99)$$

ضریب ویریال مرتبه سوم برای یک مخلوط گازی:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N y_i y_j y_k C_{ijk} \quad (100)$$

## رابطه پیترز

$$B_{ij} = \frac{RT_{cij}}{P_{cij}} (B' + \omega_{ij} B') \quad (101)$$

$$B' = 0.083 - \frac{0.422}{T_r^{1.6}} \quad (102)$$

$$B' = 0.139 - \frac{0.172}{T_r^{4.2}} \quad (103)$$

قوانین اختلاط مربوط به تعیین  $T_{cij}$ ،  $P_{cij}$  و  $\omega_{ij}$ :

$$T_{cij} = (T_{ci} T_{cj})^{\frac{1}{2}} \quad (104)$$

$$P_{cij} = \frac{Z_{cij} RT_{cij}}{V_{cij}} \quad (105)$$

$$\omega_{ij} = \frac{\omega_i + \omega_j}{2} \quad (106)$$

$$Z_{cij} = \frac{Z_{ci} + Z_{cj}}{2} \quad (107)$$

$$V_{cij} = \left[ \frac{\frac{1}{V_{ci}^r} + \frac{1}{V_{cj}^r}}{2} \right]^{\frac{1}{r}} \quad (108)$$

## قوانین اختلاط مربوط به معادله حالت ردیش کوانگ

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{T^2(v+b)(v)}$$

$$b = \sum_{i=1}^N y_i b_i \quad (109)$$

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j a_{ij} \quad (110)$$

تغییر حجم در اثر اختلاط در دما و فشار ثابت برای یک مخلوط گازی دوجزئی:

$$\Delta V = y_1 y_2 \delta_{12} \quad (111)$$

☀ نکته: برای یک محلول ایده آل گازی:

$$\delta_{12}^{id} = 0$$

$$B_{12}^{id} = \frac{B_{11} + B_{22}}{2}$$

## تبادل فازي

### ۱-۱۱ - تبادل مادي

معیار تبادل مادي:

$$(dG^t)_{T,P} \leq 0 \quad (1)$$

در تبادل مادي در دما و فشار ثابت داریم:

$$(dG^t)_{T,P} = 0 \quad \text{يا} \quad dS^t = \frac{\delta Q^t}{T}$$

وضعیت سایر خواص ترمودینامیکی در هنگام تبادل:

$$(dU^t)_{S^t, V^t} \leq 0 \quad (2)$$

$$(dS^t)_{U^t, U^t} \geq 0 \quad (3)$$

$$(dA^t)_{T, V^t} \leq 0 \quad (4)$$

### ۱-۲ - شرط برقراری تبادل فازي

$$\hat{f}_i^\alpha = \hat{f}_i^\beta = \dots = \hat{f}_i^\pi \quad (5)$$

$$\hat{f}_j^\alpha = \hat{f}_j^\beta = \dots = \hat{f}_j^\pi$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$\hat{f}_n^\alpha = \hat{f}_n^\beta = \dots = \hat{f}_n^\pi$$

### ۱-۳ - تبادل بخار - مایع (VLE)

حالت ایده‌آل (قانون راولت)

$$x_i P_i^{\text{sat}} = y_i P \quad (7)$$

برای یک سیستم دوجزئی:

$$P_1 = y_1 P = x_1 P_1^{\text{sat}} \quad (8)$$

$$P_2 = y_2 P = x_2 P_2^{\text{sat}} \quad (9)$$

$$P = x_1 P_1^{\text{sat}} + (1 - x_1) P_2^{\text{sat}} \quad \text{فشار کل} \quad (10)$$

$$P = \frac{1}{\frac{y_1}{P_1^{\text{sat}}} + \frac{y_2}{P_2^{\text{sat}}}} \quad (11)$$

### حالت واقعی

$$y_i \hat{\phi}_i P = x_i \gamma_i f_i^* \quad (12)$$

الف) فشارهای پایین تا متوسط

$$y_i \hat{\phi}_i^v P = x_i \gamma_i \phi_i^{\text{sat}} P_i^{\text{sat}} \quad (13)$$

$\hat{\phi}_i$ : ضریب فوگاسیته جزء  $i$  در مخلوط در فاز بخار

$$\ln \hat{\phi}_i = \left[ \frac{\partial(\ln \phi)}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_{j \neq i}}$$

برای معادله یک پارامتری ویریا:

$$Z = 1 + \frac{BP}{RT}$$

$$\ln \phi = \frac{BP}{RT}, \quad \ln \hat{\phi}_i = \frac{P}{RT} \left( B_{ii} + \frac{1}{P} \sum_j \sum_k y_j y_k (v \delta_{ji} - \delta_{jk}) \right) \quad (14)$$

قانون رانول اصلاح شده

$$y_i P = x_i \gamma_i P_i^{\text{sat}} \quad (15)$$

$$P = \sum_{i=1}^n y_i P = \sum_{i=1}^n x_i \gamma_i P_i^{\text{sat}} \quad (16)$$

ب) فشارهای بالا

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{\gamma_i f_i^*}{\hat{\phi}_i^v P} = \frac{\gamma_i \phi_i^{\text{sat}}}{\hat{\phi}_i^v} \quad (24)$$

اگر قانون رانول برقرار باشد:

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{P_i^{\text{sat}}}{P} \quad (25)$$

## ۱۱-۴- مدل های $G^E$ برای تعیین ضرایب اکتیویته

بسط توانی ردلیج - کستر

$$\frac{G^E}{RT_{x_1, x_2}} = B + C(x_1 - x_2) + D(x_1 - x_2)^2 + \dots \quad (17)$$

- برای برخی سیستم‌های ساده:  $(B \neq 0, C = D = \dots = 0)$

$$\frac{G^E}{RT_{x_1, x_2}} = B \quad (18)$$

$$\ln \gamma_1 = Bx_2^{\gamma} \quad \ln \gamma_2 = Bx_1^{\gamma}$$

$$\ln \gamma_1^{\infty} = B \quad \ln \gamma_2^{\infty} = B$$

### مدل مارگولس

$$\frac{G^E}{RTx_1x_2} = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 \quad (19)$$

$$\ln \gamma_1 = x_2^{\gamma}(A_{12} + \gamma(A_{11} - A_{12})x_1) \quad , \quad \ln \gamma_2 = x_1^{\gamma}(A_{12} + \gamma(A_{12} - A_{11})x_2)$$

$$\ln \gamma_1^{\infty} = A_{12} \quad \ln \gamma_2^{\infty} = A_{11}$$

### مدل محلول‌هاک با قاعده

$$\frac{x_1x_2}{G^E} = B' + C'(x_1 - x_2) \quad (20)$$

$$\frac{G^E}{RT}$$

صورت دیگری برای معادله بالا به صورت زیر است:

$$\frac{G^E}{RTx_1x_2} = \frac{A'_{12}A'_{21}}{A'_{12}x_1 + A'_{21}x_2} \quad (21)$$

$$\ln \gamma_1 = \frac{A'_{12}}{\left(1 + \frac{A'_{12}}{A'_{21}} \frac{x_1}{x_2}\right)^2} \quad , \quad \ln \gamma_2 = \frac{A'_{21}}{\left(1 + \frac{A'_{21}}{A'_{12}} \frac{x_2}{x_1}\right)^2}$$

$$\ln \gamma_1^{\infty} = A'_{12} \quad \ln \gamma_2^{\infty} = A'_{21}$$

### معادلات ویلسون برای یک سیستم دوجزئی

$$\frac{G^E}{RT} = -x_1 \ln(x_1 + x_2 \Omega_{12}) - x_2 \ln(x_2 + x_1 \Omega_{21}) \quad (22)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{V_j}{V_i} \exp\left(-\frac{a_{ij}}{RT}\right) \quad (23)$$

$V_i$  و  $V_j$  حجم‌های مولی اجزاء خالص در دمای  $T$  هستند.

### ۱۱-۵- نقطه آزنوتروپ

$$x_1^{az} = y_1^{az} \quad , \quad x_2^{az} = y_2^{az}$$

بنابراین:

$$\gamma_i = \frac{P}{P_i^{sat}} \quad (29)$$

$$\gamma_1^{az} P_1^{sat} = \gamma_2^{az} P_2^{sat} \quad (27)$$

### فراریت نسبی:

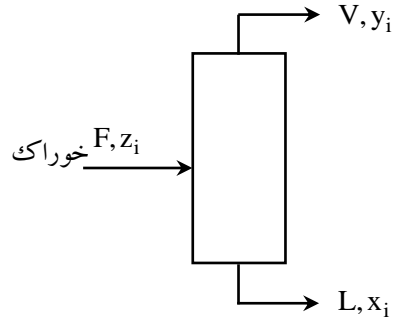
$$\alpha_{12} = \frac{\frac{y_1}{x_1}}{\frac{y_2}{x_2}} = \frac{K_1}{K_2} \quad (28)$$

برای قانون راتول:

$$\alpha_{12} = \frac{P_1^{\text{sat}}}{P_2^{\text{sat}}} \quad (29)$$

$$y_1 = \frac{\alpha_{12} x_1}{1 + (\alpha_{12} - 1) x_1} \quad (30)$$

### ۱۱-۶- تبخیر ناگهانی (Flash)



$$x_i = \frac{z_i}{L + K_i(1-L)} \quad (31)$$

$$y_i = \frac{z_i K_i}{1 + V(K_i - 1)} \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad \text{و} \quad \sum_{i=1}^n y_i = 1$$

☀️ **نکته:** معمولاً در محاسبات تبخیر ناگهانی،  $z_i$ ،  $P$  و  $T$  جزو معلومات و  $x_i$ ،  $y_i$  و  $L$  (یا  $V$ ) از مجهولات مسئله‌اند.

تعیین حالت ترمودینامیکی خوراک:

$$\sum_{i=1}^n z_i K_i < 1 \Rightarrow \text{حالت خوراک به صورت مایع متراکم است.}$$

$$\sum_{i=1}^n z_i K_i = 1 \Rightarrow \text{حالت خوراک به صورت مایع اشباع (نقطه حباب) است.}$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{K_i} = 1 \Rightarrow \text{حالت خوراک به صورت بخار اشباع (نقطه شبنم) است.}$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{K_i} < 1 \Rightarrow \text{حالت خوراک به صورت بخار داغ است.}$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{K_i} > 1 \quad \text{و} \quad \sum_{i=1}^n z_i K_i > 1 \Rightarrow \text{خوراک دوفازی است.}$$

## مخلوط هوا - بخار و تهویه مطبوع

### ۱۲-۱- تعاریف

فشار هوای اتمسفری:

$$P = P_a + P_v \quad (1)$$

$P_a$ : فشار جزئی هوای خشک       $P_v$ : فشار جزئی بخار آب

نسبت رطوبت ( $\omega$ ): نسبت جرم بخار موجود در مخلوط به جرم هوای خشک.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (3)$$

$P$ : فشار کل

رطوبت نسبی ( $\phi$ ): نسبت مقدار رطوبت هوا ( $m_v$ ) به مقدار رطوبت هوای اشباع در همان دما و فشار

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_g} \quad (4)$$

$P_v$ : فشار جزئی بخار در مخلوط و  $P_g$ : فشار بخار اشباع در دمای مخلوط

رابطه بین رطوبت مطلق و نسبی

$$\phi = \frac{\omega P_a}{(0.622 + \omega) P_g} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{\omega P_a}{0.622 P_g} \quad (6)$$

آنتالپی کل هوای اتمسفری،

$$H = H_a + H_v \quad (7)$$

$$T \leq 50: h = h_a + \omega h_g \quad (8)$$

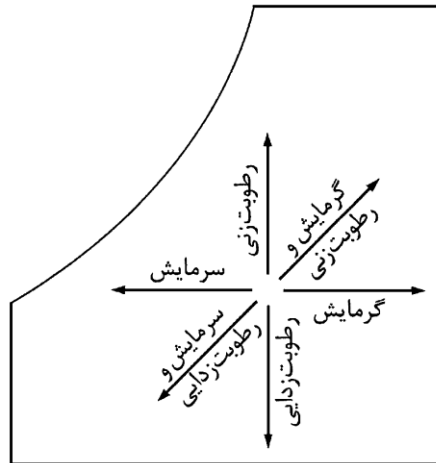


۱۲ - ۲ - دماک اشباع آدیباتیک و دماک مرطوب

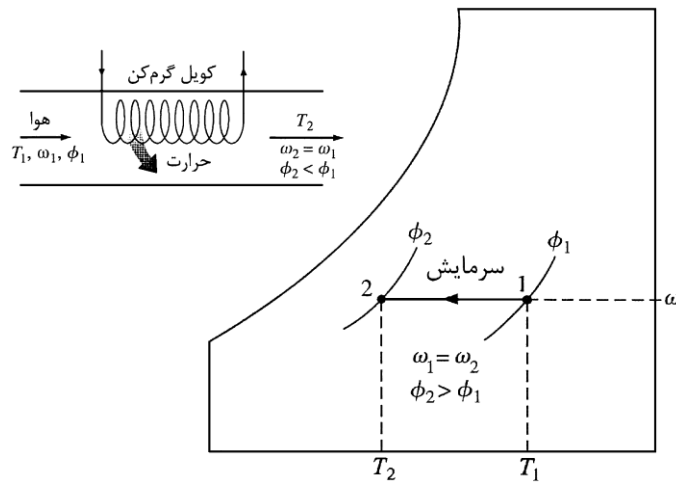
$$\omega_r = \frac{0.622 P_{g_r}}{P_r - P_{g_r}} \quad (9)$$

$$\omega_1 = \frac{C_p(T_r - T_1) + \omega_r h_{fg_r}}{h_{g_1} - h_{f_2}} \quad (10)$$

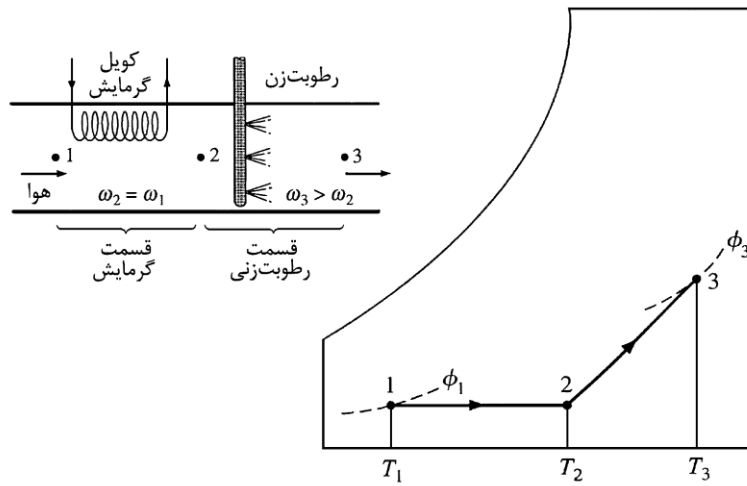
۱۲ - ۳ - فرایندها که تهویه مطبوع



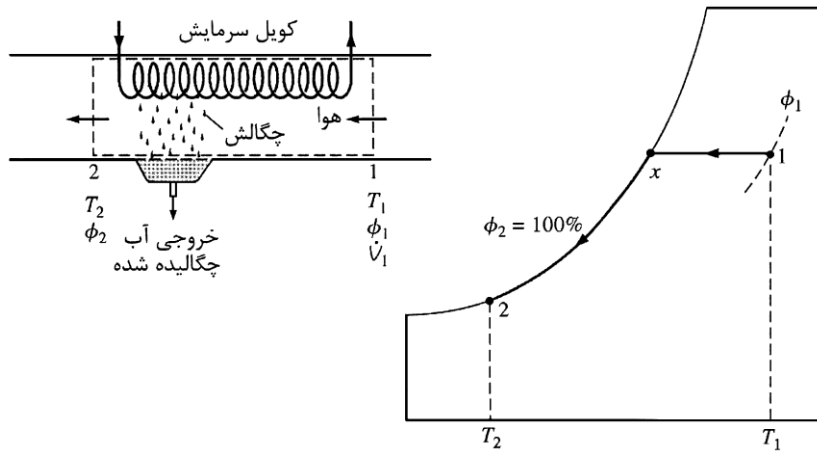
۱۲ - ۳ - ۱ - گرمایش و سرمایش ساده



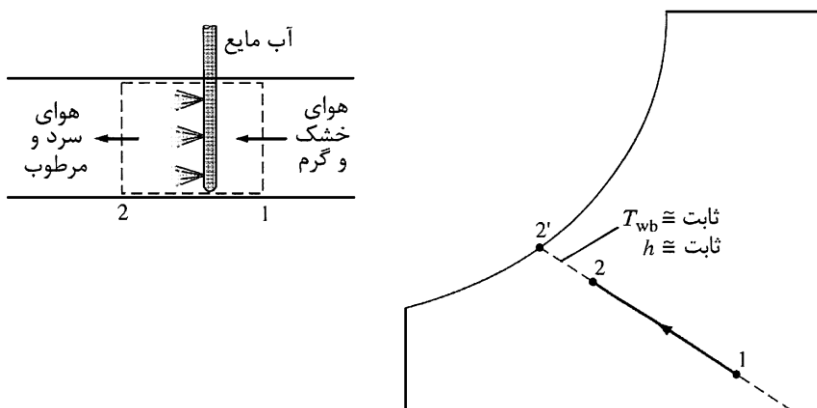
۱۲ - ۳ - ۲ - گرمایش و رطوبت زنی

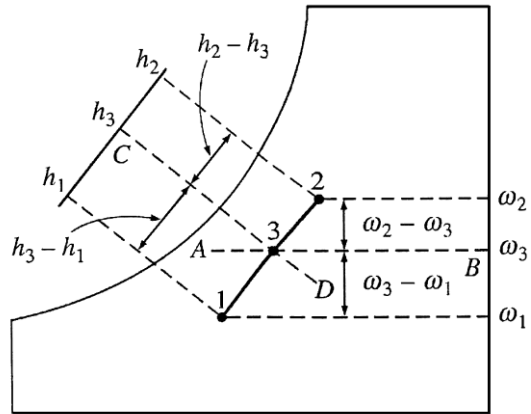
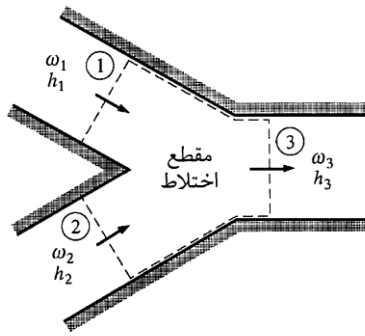


۱۲ - ۳ - ۳ - سرمایش و رطوبت زدایی



۱۲ - ۳ - ۴ - سرمایش تبخیری





$$\frac{\dot{m}_{a_1}}{\dot{m}_{a_2}} = \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} \quad (11)$$

$$T_r = \frac{\dot{m}_{a_1} T_1 + \dot{m}_{a_2} T_2}{\dot{m}_{a_1} + \dot{m}_{a_2}} \quad (12)$$

## تبادل واکنش‌های شیمیایی

### ۱۳-۱ - مختصه واکنش

برای یک واکنش شیمیایی:

$$v_1 A_1 + v_2 A_2 + v_3 A_3 + \dots + v_i A_i + \dots = 0 \quad (1)$$

$A_i$ : فرمول شیمیایی گونه‌های مختلف

$v_i$ : ضرایب استوکیومتری

$$\frac{dn_1}{v_1} = \frac{dn_2}{v_2} = \frac{dn_3}{v_3} = \frac{dn_4}{v_4} = \dots = d\varepsilon \quad (2)$$

$$dn_i = v_i d\varepsilon \quad (3)$$

$\varepsilon$ : مختصه واکنش، درجه پیشرفت، درجه واکنش

$$y_i = \frac{n_i + v_i \varepsilon}{n_t + v \varepsilon} \quad (4)$$

$$v = \sum_{i=1}^N v_i \quad \text{و} \quad n_t = \sum_{i=1}^N n_i \quad (5)$$

$$A = \frac{n_{A, -} - n_{A,}}{n_{A,}} \quad \text{تفکیک جزئی واکنش دهنده} \quad (6)$$

برای  $r$  واکنش مستقل هم‌زمان داریم: ( $j = 1, 2, \dots, r$ ) نشان دهنده واکنش است)

$$\sum_{i=1}^N v_{i,j} A_i = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, r) \quad (7)$$

$$dn_i = \sum_{j=1}^r v_{i,j} d\varepsilon_j \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

$$y_i = \frac{n_i + \sum_{j=1}^r v_{i,j} \varepsilon_j}{n_t + \sum_{j=1}^r v_j \varepsilon_j} \quad (9)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^r v_{i,j} \quad (10)$$

### ۱۳-۲- تعیین ثابت تعادل

$$\Delta G_i^\circ = \sum_{i=1}^N v_i G_i^\circ = \sum_{i=1}^N v_i \mu_i$$

$$\ln k = -\frac{\Delta G_i^\circ}{RT} \quad (11)$$

علامت ۰ نشان دهنده حالت استاندارد i خالص در فشار ثابت و در دمای سیستم

K: ثابت تعادل

$\Delta G^\circ$ : تغییر انرژی آزاد گیبس استاندارد واکنش

$$k = \prod_{i=1}^N (\hat{a}_i)^{v_i} \quad (12)$$

$$k = \prod_{i=1}^N (\hat{f}_i)^{v_i} \quad (13)$$

### ۱۳-۳- روابط بین ثابت تعادل و ترکیب نسبی

#### واکنش‌های فاز گاز

$$K = \prod_{i=1}^N (y_i P \hat{\phi}_i)^{v_i} \quad (14)$$

برای محلول ایده‌آل:

$$\hat{\phi}_i = \phi_i \Rightarrow K = \prod_{i=1}^N (y_i P \phi_i)^{v_i} \quad (15)$$

برای فشار دما به حد کافی پایین و یا دما به حد کافی بالا، رفتار مخلوط تعادلی رفتار گاز ایده‌آل را خواهد داشت.

$$\hat{\phi}_i = \phi_i = 1 \Rightarrow K = \prod_{i=1}^N (y_i P)^{v_i} = \prod_{i=1}^N (P_i)^{v_i} \quad (16)$$

ثابت تعادل را در یک مخلوط تعادلی گاز ایده‌آل:

$$K_P = \prod_{i=1}^N (P_i)^{v_i} \quad (17)$$

برای گاز ایده‌آل:  $P_i = C_i RT$

$$K_C = \prod_{i=1}^N (C_i)^{v_i} = K_P (RT)^{-\nu} \quad (18)$$

$$K_y = \prod_{i=1}^N (y_i)^{v_i} = K_P P^{-\nu} \quad (19)$$

$$K_C = K_y \left( \frac{P}{RT} \right)^{\nu} \quad (20)$$

### واکنش‌های فاز مایع

$$\hat{a}_i = \gamma_i x_i \left( \frac{f_i}{f_i^*} \right)$$

$$K = \prod_{i=1}^N (x_i \gamma_i)^{\nu_i} \quad (21)$$

برای محلول‌های ایده‌آل:

$$K = \prod_{i=1}^N (x_i)^{\nu_i} \quad (22)$$

### ۱۳-۴- اثر دما بر ثابت تعادل

معادله وانت هوف:

$$\frac{d(\ln K)}{dT} = \frac{\Delta H^*}{RT^2} \quad (23)$$

$$\Delta H^* = \text{cte} \Rightarrow \ln \left( \frac{K}{K_1} \right) = -\frac{\Delta H^*}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)$$

### ۱۳-۵- قانون فازهای گیبس

درجه آزادی یک سیستم:

$$F = \nu + N - \pi - r - s \quad (24)$$

$\pi$ : تعداد فازهای در تعادل با یکدیگر

$N$ : تعداد اجزاء سازنده سیستم

$s$ : تعداد محدودیت‌های ویژه سیستم

$r$ : تعداد واکنش‌های مستقل در تعادل

## واکنش‌های شیمیایی و احتراق

### ۱-۱۴ - احتراق

در محاسبات فرض می‌کنند که هوا از ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن تشکیل شده است

$$1 \text{ kmol O}_2 + 3.76 \text{ kmol N}_2 = 4.76 \text{ kmol air} \quad (1)$$

نسبت هوا به سوخت (AF): عبارت است از نسبت جرم هوا به جرم سوخت

$$AF = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \quad (3)$$

### ۱-۲ - آنتالپی تشکیل

$$h_R = h_C = H_P - H_R \quad (4)$$

که R و P به ترتیب مواد اولیه و محصولات هستند.

### ۱-۳ - ارزش حرارتی سوخت (heating value):

$$\text{ارزش حرارتی} = |h_C| \quad \text{kJ / kg fuel} \quad (5)$$

$$\text{HHV} = \text{LHV} + (m h_{fg})_{\text{H}_2\text{O}} \quad \text{kJ / kg fuel} \quad (6)$$

### ۱-۴ - آنتالپی مواد در حالت دلخواه

$$\bar{h}_{T,P} = (\bar{h}_f)_{298,15 \text{ MPa}} + (\Delta \bar{h})_{298,15 \text{ MPa} \rightarrow T,P} \quad (7)$$

### ۱-۵ - تحلیل قانون اول برای سیستم‌های واکنشی

$$Q_{c.v} + \sum_R n_i \bar{h}_i = w_{c.v} + \sum_P n_e \bar{h}_e \quad (8)$$

اگر مواد واکنش دهنده و محصولات در واکنش شیمیایی در حالت  $25^\circ\text{C}$  و  $0.1 \text{ MPa}$  قرار نداشته باشند تغییر آنتالپی بین این حالت و حالت مورد نظر:

$$\bar{h}_{T,P} = \bar{h}_f + \Delta \bar{h} \quad (9)$$

اگر کار انجام شده در طول فرایند احتراق صفر و انتقال حرارت منفی (فرایند گرمازا) باشد حرارت آزاد شده ( $Q_{\text{out}}$ ):

$$Q_{out} = \sum_R n_i \bar{h}_i - \sum_P n_e \bar{h}_e \quad (10)$$

#### ۱۴-۶- دماک آديباتيك شعله

با استفاده از قانون اول:

$$H_P = H_R \quad (11)$$

#### ۱۴-۷- فرايند احتراق واقعي

راندمان محفظه احتراق:

$$\eta_{comb} = \frac{\text{ايدۀ آل (AF)}}{\text{واقعي (AF)}} \quad (12)$$

راندمان ديگ بخار:

$$\eta_{Boiler} = \frac{(Q/m_{fuel})}{HHV} = \frac{\text{حرارت داده شده به واحد جرم بخار}}{\text{ارزش حرارتي بالای سوخت}} \quad (13)$$

موتور احتراق داخلي:

$$\eta_{motor} = \frac{w}{-h_C} \quad (14)$$

w: کار واقعي و  $h_C$ : آنتالپی احتراق