

سجده سمانی



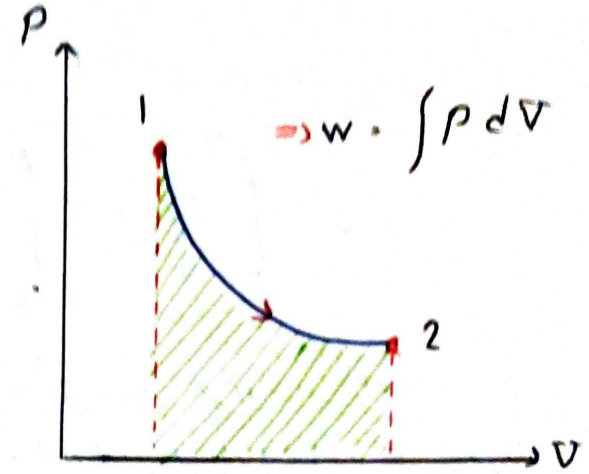
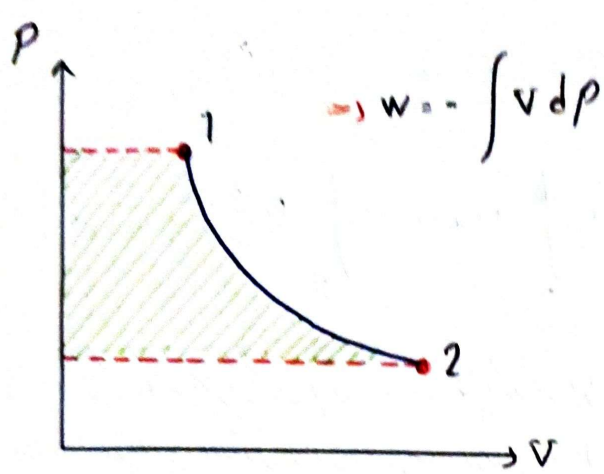
- Thermodynamics 2 -

استاد : دکتر مهدی علی احمادی

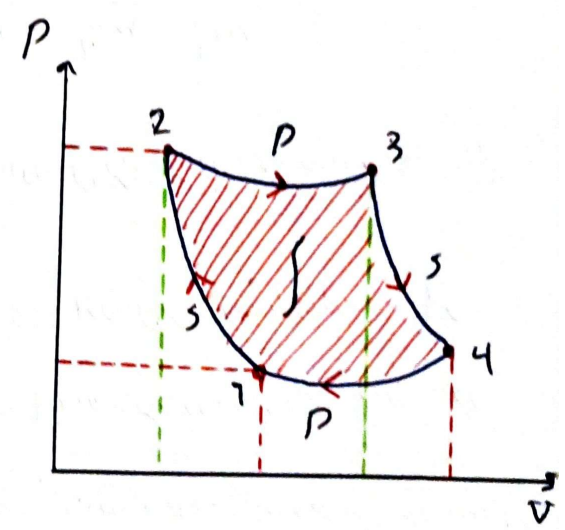
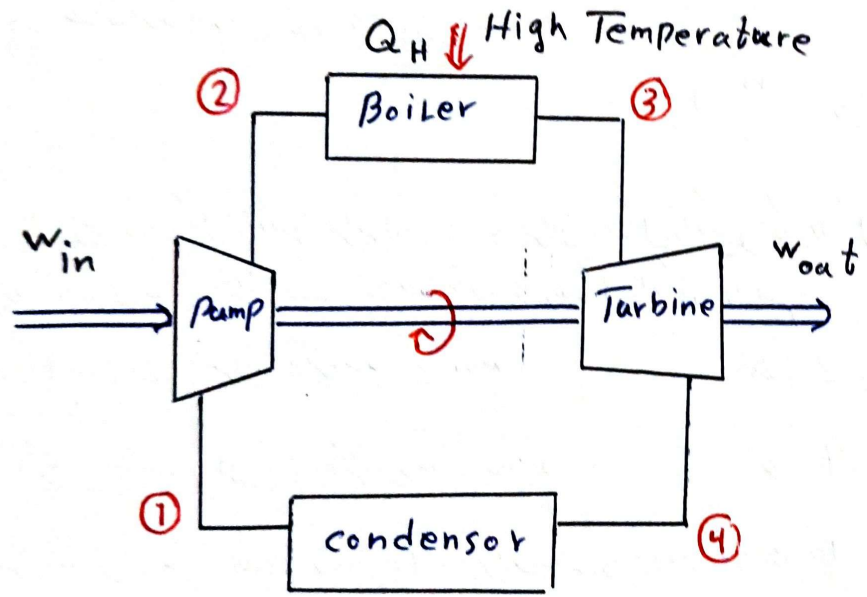
دانشجو : مسیح سبحانی

- بهار ۱۴۰۲ -

در فصل اول سیکل های توان و برعکس را مورد بررسی قرار می دهیم. از ترمودینامیک یک به یاد داریم که برای یک حجم کنترل در شرایط پایا یا اصطلاحاً $SSSF$ با صرف نظر از تغییرات انرژی پتانسیل و جنبشی کار مفیدی برگشت پذیر و برای یک سیستم بسته که عیناً همان فرایند $1 \rightarrow 2$ را طی کند با صرف نظر از انرژی جنبشی و پتانسیل کار مرز متحرک یا کار مرزی برگشت پذیر است. \therefore



نکته مهم این است که کار انجام شده طی فرایندهای فوق الزاماً برابر نیست. به سیکل زیر وقت کنید که در آن پمپ صرف کننده کار و توربین تولید کننده کار است. \therefore



$Q_L \downarrow$ Low Temperature Reservoir

در این سیکل بین نقطه یک و دو ابتدا سیال توسط پمپ فشرده شده و به بویلری می رسد و در بویلر از جسی خارجی Q_{in} گرما گرفته و در نقطه سه به بخار مافوق گرم تبدیل می شود یا **super Heat**. سپس بخار مافوق گرم توربین را به گردش در آورده و به نقطه چهار می رسد. در نقطه چهار وارد کندانسور شده و گواهی اضافه را به محیط اطراف تحویل می دهد و تبدیل به مایع مدهون سرد شده و این سیکل ادامه می یابد. مساحت زیر منحنی $P-v$ سیکل نشان دهنده مقدار کار انجام شده توسط این سیکل است. یک سیکل در واقع یک فرجه بسته است و به نقطه شروع بازمی گردد. بنابراین یک سیکل توان چهار جزء دارد که وظیفه انتقال گرما (یا انبساط)، تولید کار، دفع گرما و انقباض (یا افزایش فشار) را دارد. برای یک سیکل در شرایط پایا با صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل و با فرض ثابت بودن فشار در بویلر و کندانسور و همچنین

ایزنتروپیک بودن فرایندهای تراکم و انبساط، کار تولیدی سیکل برابر است با W_{net}

$$W_{net} = - \int_1^2 v dp - \int_3^4 v dp = - \int_1^2 v dp + \int_4^3 v dp = \text{سطح زیر منحنی}$$

حال فرض کنیم سیستم بسته ای را در نظر بگیریم که دقیقاً همان سیکل پیچیده شده قبلی را طی می کند و داریم W_{net}

$$W_{net} = \int_1^2 p dv + \int_2^3 p dv + \int_3^4 p dv + \int_4^1 p dv = \text{مساحت داخل پرفه}$$

نکته مهم این است که کار هر فرایند پایا و بسته باید یکدیگر برابر نیستند اما کار کل سیکل در هر دو حالت برابر است. جهت افزایش کار خالص تولیدی سیکل باید حجم مخصوص سیال عامل حین فرایند انبساط بالا و حین فرایند تراکم پایین باشند. به سببی که در صفحه قبل مشاهده کردید **سیکل رانکین** گفته می شود. اصطلاحاً به سیکل های بخار سیکل رانکین گویند و این گونه سیکل ها بر اساس بخار کار می کنند. مایع اصلی در سیکل رانکین آب می باشد. در سیکل رانکین هیچ سیالی اضافه و یا کم نمی شود به عبارتی W_{net}

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

جریان جرمی در سیکل رانکین برابر است. بنابراین سیکل رانکین یک سیکل ایده آل برای فرایندهای بخار و به طور کلی نیروگاه های تقابلی بخار است. به طور خلاصه در سیکل رانکین داریم W_{net}

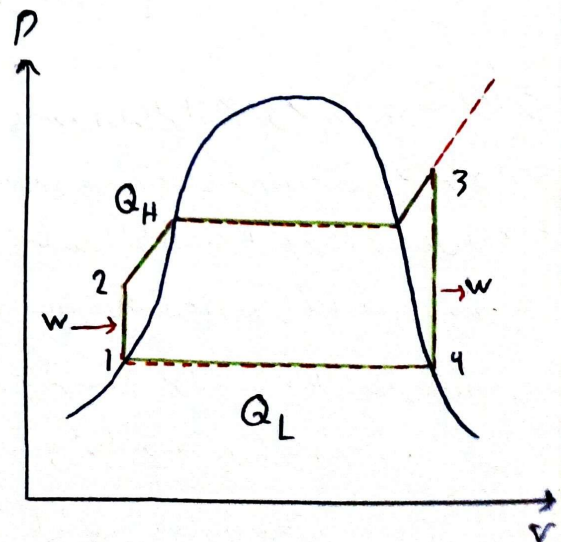
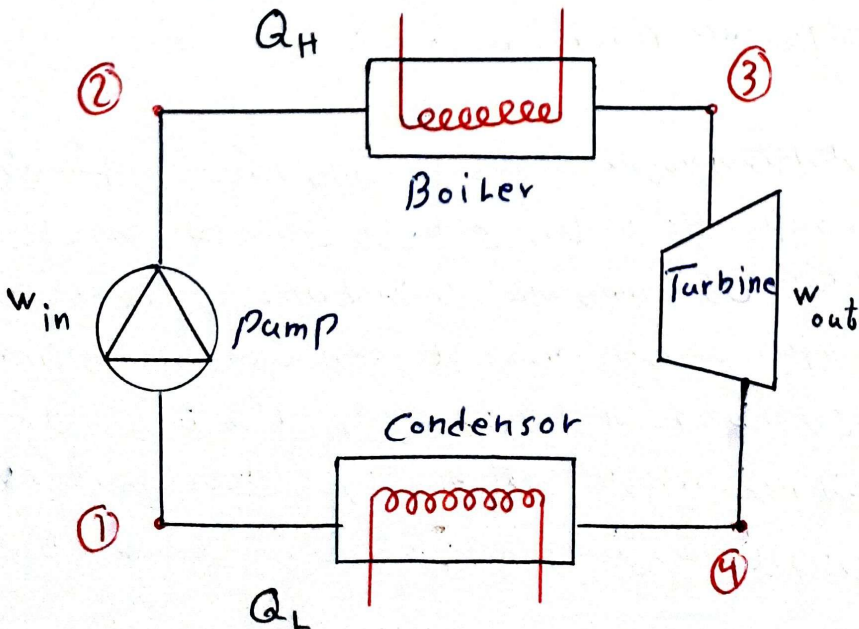
☆ $1 \rightarrow 2$ فرایند آیزنتروپیک در پمپ

☆ $2 \rightarrow 3$ انتقال گرما در فشار ثابت بویلر

☆ $4 \rightarrow 1$ دفع گرما در فشار ثابت کندانسور

☆ $3 \rightarrow 4$ انبساط آیزنتروپیک توربین

در این سیکل دو فرض اساسی داریم. از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر شده و تمامی اجزاء فرایند آنها پایا در نظر گرفته می شود W_{net}



در این سیکل کار بهیچ نیزیه شرح زیر خواهد بود:

$$\dot{w}_p = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$$

$$\dot{w}_{st} = \dot{m}_3 (h_3 - h_4) \rightarrow \dot{w}_{net} = \dot{w}_{st} - \dot{w}_p$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{\dot{w}_{st} - \dot{w}_p}{\dot{m}_f L}$$

همچنین قانون اول برای فرایندهای جریان پایا به شرح زیر است:

$$(\dot{q}_{in} - \dot{q}_{out}) + (\dot{w}_{in} - \dot{w}_{out}) = h_e - h_i$$

Pump: $\dot{q} = 0 \Rightarrow \dot{w}_{pump\ in} = h_2 - h_1 = v(P_2 - P_1)$

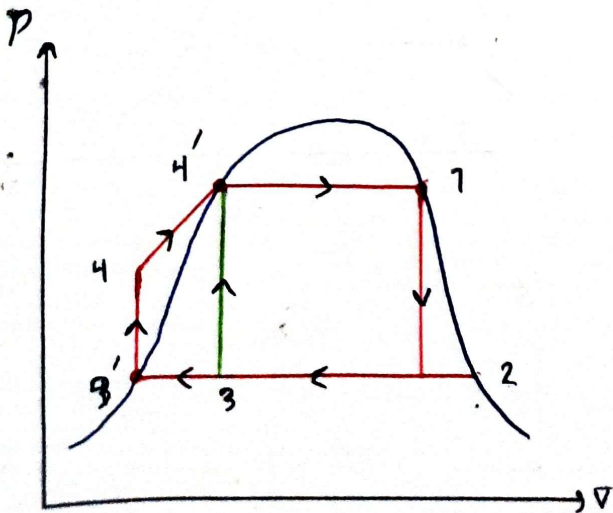
Boiler: $\dot{w} = 0 \Rightarrow \dot{q}_{in} = h_3 - h_2$

Condensor: $\dot{w} = 0 \Rightarrow \dot{q}_{out} = h_4 - h_1$

Turbine: $\dot{w}_{Turbine\ out} = h_3 - h_4$

$$\dot{w}_{net} = \dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} = \dot{w}_{T, out} - \dot{w}_{P, in} \rightarrow \eta = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{q}_{in}} = 1 - \frac{\dot{q}_{out}}{\dot{q}_{in}}$$

رنج بازدهی سیکل رانکین بین 30 تا 40 درصد می باشد. T_L کمترین دمای درون سیکل است که مربوط به کندانسور می باشد و T_H بیشترین دمای درون سیکل است که مربوط به بویلر می باشد. واضح است که بازدهی سیکل رانکین از سیکل کارنو (که کارنو دمای منبعش سیکل ها می باشد) کمتر است زیرا سیکل رانکین برگشت پذیری را نمی پذیرد اما برگشت پذیری خارجی نیست.



راندمان سیکل کارنو: $\eta_{th-Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

راندمان سیکل رانکین: $\eta_{th.Rankin} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{\int_4^1 T ds}{\int_2^3 T ds} = 1 - \frac{\bar{T}_L (s_2 - s_3)}{\bar{T}_H (s_1 - s_4)}$

$\begin{cases} s_2 = s_1 \\ s_4 = s_3 \end{cases} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{\bar{T}_L (s_2 - s_3)}{\bar{T}_H (s_1 - s_4)} = 1 - \frac{\bar{T}_L}{\bar{T}_H} \Rightarrow \begin{cases} \bar{T}_L = T_L \\ \bar{T}_H < T_H \end{cases}$

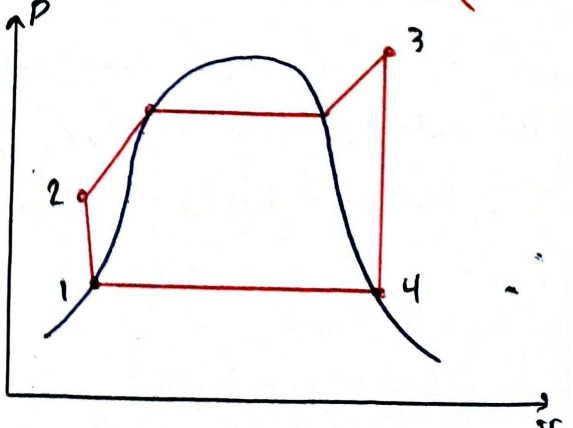
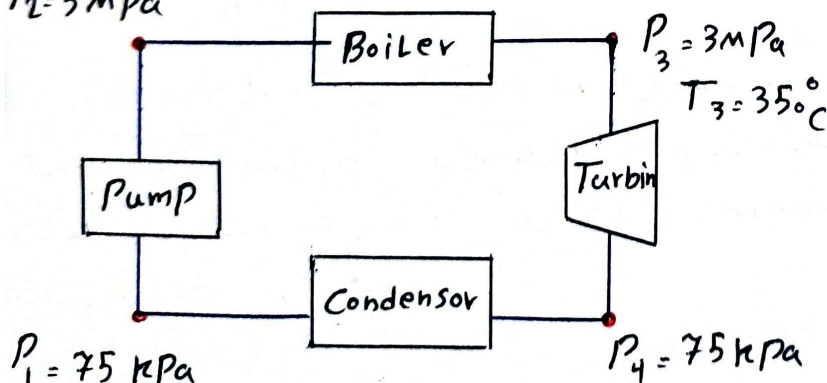
$\Rightarrow \eta_{th.Rankin} < \eta_{th.Carnot}$

با وجود اینکه راندمان سیکل رانکین بیشتر می باشد ولی از سیکل رانکین برای طراحی سیکل ها استفاده می شود زیرا در نقطه سوم آب رو فازی و حاوی بخار است و نباید وارد پمپ شود، عدم امکان سوپر هیت کردن و احتراز از رطوبت یا لا در توربین که باعث خوردگی پره های توربین می شود، عدم امکان جذب یخ خشک بزرگی از انرژی احتراق در نقاط 6 تا 4.

پارادوکس ترمودینامیک 1

در رانکین که مجموع تغییرات آنترופی یک سیستم و محیط اطرافش صاف مثبت است، اما در مواردی تنها تغییرات آنترופی یک سیستم مورد بررسی قرار می گیرد، فرایند آیزنتروپیک به فرایندی اطلاق می شود که در آن تغییرات آنترופی سیستم برابر با صفر باشد، با این تعریف هر فرایند اریا باتیک برگشت پذیر فرایندی آیزنتروپیک است و غالباً به اشتباه تصور می بر این است که هر فرایند آیزنتروپیک نیز فرایندی برگشت پذیر است و اریا باتیک است ولی اینطور نیست.

مثال 1 نیروگاه بخار مطابق شکل زیر بر اساس سیکل رانکین عمل می کند راندمان آن را محاسبه کنید؟



state 1 $\begin{cases} P_1 = 75 \text{ kPa} \\ T_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h_1 = h_f @ 75 = 384.44 \\ v_1 = v_f @ 75 = 0.001031 \end{cases}$

$$\text{state 2} \left\{ \begin{array}{l} P_2 = 3 \text{ MPa} \\ \Rightarrow w_p = -v_1 (P_2 - P_1) = -0.001037 (3000 - 75) = \\ s_2 = s_1 \end{array} \right.$$

$$w_p = -3.03 \xrightarrow[\text{pump}]{q=0} q - w_p = h_2 - h_1 \rightarrow h_2 = h_1 - w_p = 387.39 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{state 3} \left\{ \begin{array}{l} P_3 = 3 \text{ MPa} \\ T_3 = 350^\circ \text{C} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} h_3 = 3115.25 \\ k_3 = 6.7428 \end{array} \right.$$

$$\text{state 4} \left\{ \begin{array}{l} P_4 = 75 \text{ kPa} \\ s_4 = s_3 = 6.7428 \end{array} \right. \Rightarrow x_4 = 0.886 \rightarrow h_4 = 2403$$

$$\text{Boiler: } w=0 \Rightarrow q_H - w = h_3 - h_2 \rightarrow q_H = 2727.86$$

$$\text{Condensor: } w=0 \Rightarrow -q_L - w = h_1 - h_4 \rightarrow q_L = h_4 - h_1 = 2018.84$$

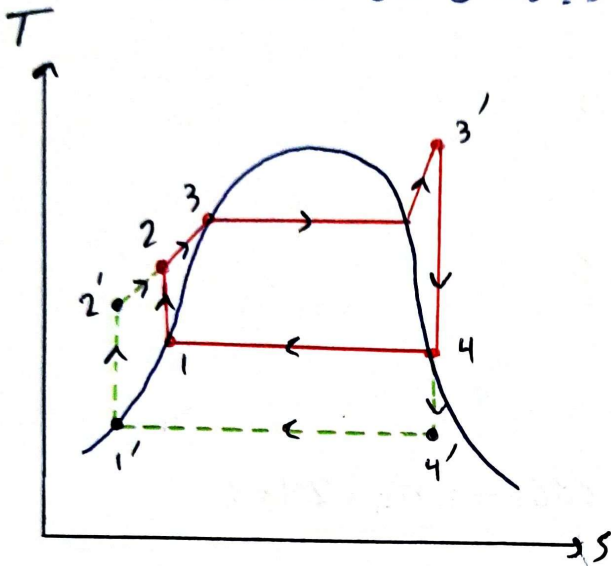
$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{2018.84}{2727.86} = 0.26 \times 100 = 26\%$$

حل برای افزایش بازدهی سیکل رانگین روشن‌هایی را ارائه می‌کنیم، روشن‌اول برای افزایش بازدهی سیکل رانگین این است که رهای بخار را افزایش دهیم که باعث افزایش کار می‌شود زیرا مساحت منحنی افزایش می‌یابد، از مزیت‌های این روشن‌افزایش کیفیت بخار است و کیفیت بخار در فرایند توربین افزایش می‌یابد ولی عیب بزرگ این روشن‌افزایش این است که پوهای توربین تا مقدار مشخصی رها می‌توانند تحمل کنند بنابراین با افزایش رهای بیش از حد امکان فرای و خوردگی پره‌های توربین بالاست، روشن‌دوم برای افزایش بازدهی سیکل رانگین افزایش فشار است، که با افزایش فشار کار مصرفی کم می‌شود و عیب بزرگ است همچنین اگر بخار را به هم یوگیری برای فشارهای بالا

بسیار زیر هزینه برآی را در بر خواهد داشت، روش بعدی نیز کاهش فشار و رطوبت است، فشار کندانسور را کاهش می‌دهیم که باعث افزایش کارایی می‌شود. همچنین با کاهش فشار امکان دارد که در قوی توربین آب و بخار داشته باشیم که باعث خوردگی پره‌های می‌شود. می‌دانیم که رطوبت و فشار نسبت مستقیم دارند بنابراین اگر ما را از مقدار مشخصی کمتر کنیم به جایی می‌رسیم که از دمای محیط اطراف دمای سیکل کمتر است بنابراین چون انتقال حرارت از دمای بالاتر به پایین‌تر می‌باشد کندانسور خنک نمی‌شود، بنابراین به طور خلاصه داریم: **۱۱:**

= اثر کاهش رطوبت و فشار (کندانسور) بر پارامترهای سیکل رانگین: **۱۲:**

در این حالت کار خالص تولیدی سیکل افزایش می‌یابد و راندمان سیکل افزایش می‌یابد: **۱۳:**

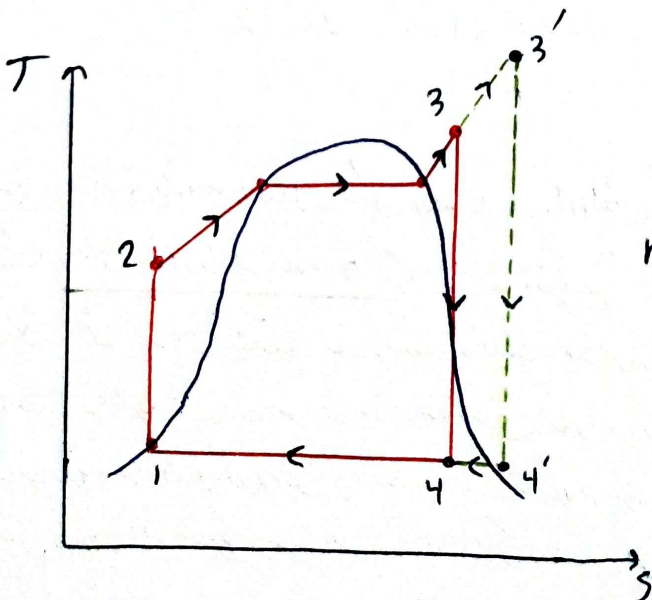


$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = \begin{cases} \bar{T}_L : \text{گامش زیار } (4' \rightarrow 1') \\ \bar{T}_H : \text{گامش کمر } (1' \rightarrow 2') \end{cases}$$

در این سیکل گرمای راه شوره به سیکل افزایش می‌یابد که اثر منفی دارد زیرا سوخت بیشتری در یو لیم صرف می‌شود، و عمیق این روش کاهش کیفیت بخار در توربین ضروری 9% است که باعث رطوبت بیشتر و در نتیجه آسیب به پره‌های توربین می‌شود. از صحت و ایست‌های این روش دمای آب خنک‌کن است، به طور میانگین دمای کندانسور باید 10°C بیشتر از دمای آب خنک‌کن باشد و از حدی پایین آوردن دمای آب خنک‌کن هزینه‌های زیادی دارد (۱۰). **۱۴:**

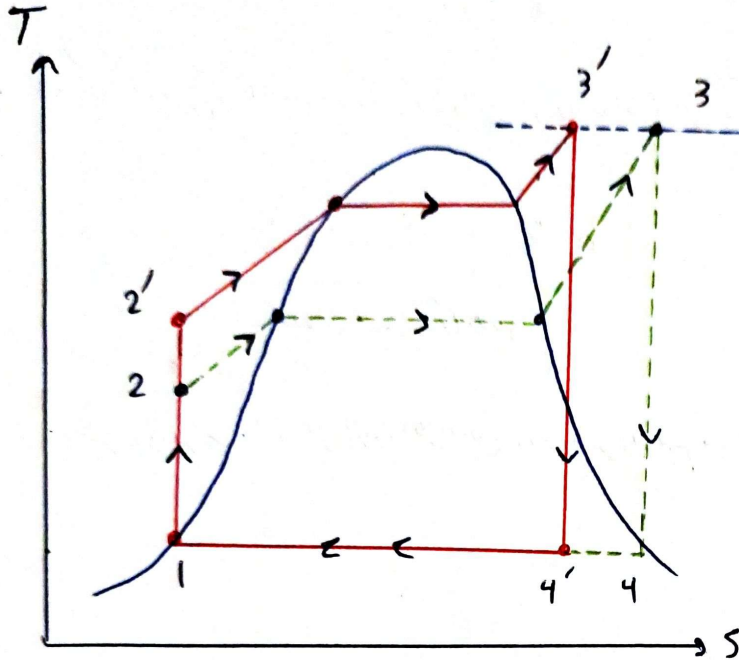
= اثر سوپر هیت کردن بخار و روی به توربین بر پارامترهای سیکل رانگین: **۱۵:**

در این حالت کار خالص تولیدی و گرمای راه شوره افزایش می‌یابد، گرمای دفع شوره از سیکل افزایش می‌یابد (5) راندمان سیکل نیز در این حالت افزایش می‌یابد: **۱۶:**



$$\eta_{th} = 1 - \frac{\bar{T}_L}{\bar{T}_H} = \begin{cases} (\bar{T}_L)_{1 \rightarrow 4} = (\bar{T}_L)_{1 \rightarrow 4'} \\ (\bar{T}_H)_{2 \rightarrow 3} < (\bar{T}_H)_{2 \rightarrow 3'} \end{cases}$$

آزمایای این روش میدان به افزایش راندمان، افزایش کار تولیدی و افزایش کیفیت بخار در فروجی توربین اشاره کرد
 محدودیت این روش تحمل حرارت پره های توربین است که حداکثر دمای قابل تحمل آنها حدود 250°C می باشد.
 = اثر افزایش فشار ماکزیمم (بولیتر) بر پارامترهای سیکل رانکین:
 در خصوص کار خالص تولیدی به دلیل انقباض سطح نمودار داخل حوضه نمی توان دقیق گفت بنا بر این مقداری افزایش و مقداری کاهش می یابد، راندمان سیکل در این حالت افزایش می یابد.



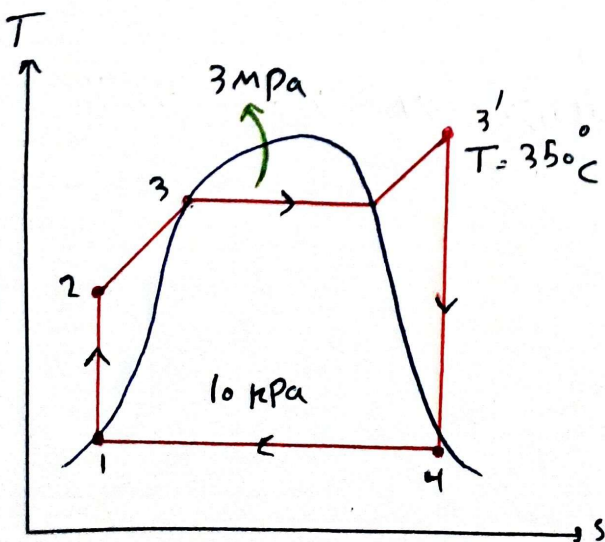
$$\eta_{th} = 1 - \frac{\bar{T}_L}{\bar{T}_H}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (T_H)_{2' \rightarrow 3} > (T_H)_{2 \rightarrow 3} \\ (T_L)_{4 \rightarrow 1} = (T_L)_{4' \rightarrow 1} \end{array} \right.$$

در خصوص گرمای راه شده به سیکل می توان گفت که سطح زیر منحنی $2 \rightarrow 3'$ نسبت به $2' \rightarrow 3$ هم مقداری افزایش دارد و هم کاهش، در هر صورت نمی توان دقیق گفت ولی گرمای رقیق شده از سیکل $4 \rightarrow 1$ کاهش یافته و در این صورت به گذرانسور کوچکتری نیاز داریم.

لازم به ذکر است که اگر فشار از نوک گذرگاه اشباع یا نقطه بحرانی بالاتر رود سیال فوق بحرانی و بولیرسیکل فوق بحرانی می شود که در صنعت استفاده می شود، مزیت آن افزایش راندمان سیکل و عبود آن کاهش کیفیت بخار در فروجی توربین ($\eta_4 < \eta_4'$) است و محدودیت آن کاهش دمای قابل تحمل پره های توربین است.

مثال 2) در یک نیروگاه بخار که بر اساس سیکل رانکین کار می کند بخار با فشار 3 MPa و دمای 350°C وارد توربین می شود و در گذرانسور با فشار 10 kPa تقطیر می شود، مطلوب است:



الف) بازه نیروگاه را مشخص کنید؟

ب) بازه حرارتی نیروگاه بخار اگر بخار از 350°C تا 600°C داغ شود را تعیین کنید؟

ج) اگر فشار بخار به 15 MPa افزایش یابد در حالی که دمای ورودی توربین در 600°C باقی بماند بازه حرارتی نیروگاه چگونه است؟

الف) فشار کندانسور کمتر و در نتیجه رانیم:

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_4)' = 0.812 \\ (\eta_{th})' = 33.5\% \end{array} \right. \xrightarrow{\text{مثال ۱}} \left\{ \begin{array}{l} x_4 = 0.886 \\ \eta_{th} = 26\% \end{array} \right.$$

همانطور که گفتیم با کاهش فشار کندانسور بازه افزایش و کیفیت بخار کاهش می یابد:

$$\frac{33.5\% > 26\%}{\text{بازه افزایش}}$$

$$0.812 < 0.886$$

کیفیت بخار کاهش

ب) دمای یویلر مانند مثال اول افزایش یافته و رانیم:

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (x_4)'' = 0.914 \\ (\eta_{th})'' = 37.3\% \end{array} \right.$$

در اثر افزایش دمای یویلر بازه افزایش کیفیت بخار توربین افزایش و رطوبت کاهش می یابد:

$$37.3\% > 33.5\%$$

بازه افزایش

$$0.914 > 0.812$$

کیفیت بخار توربین افزایش

$$8.6\% < 18.8\%$$

رطوبت کاهش

ج) کیفیت بخار در این حالت کاهش می یابد زیرا رانیم:

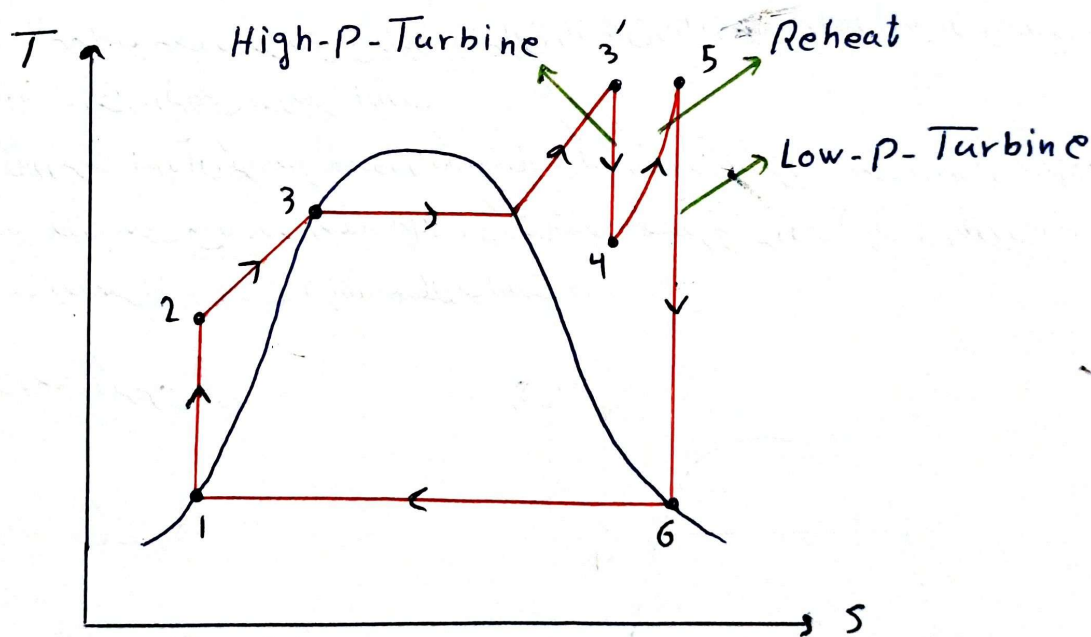
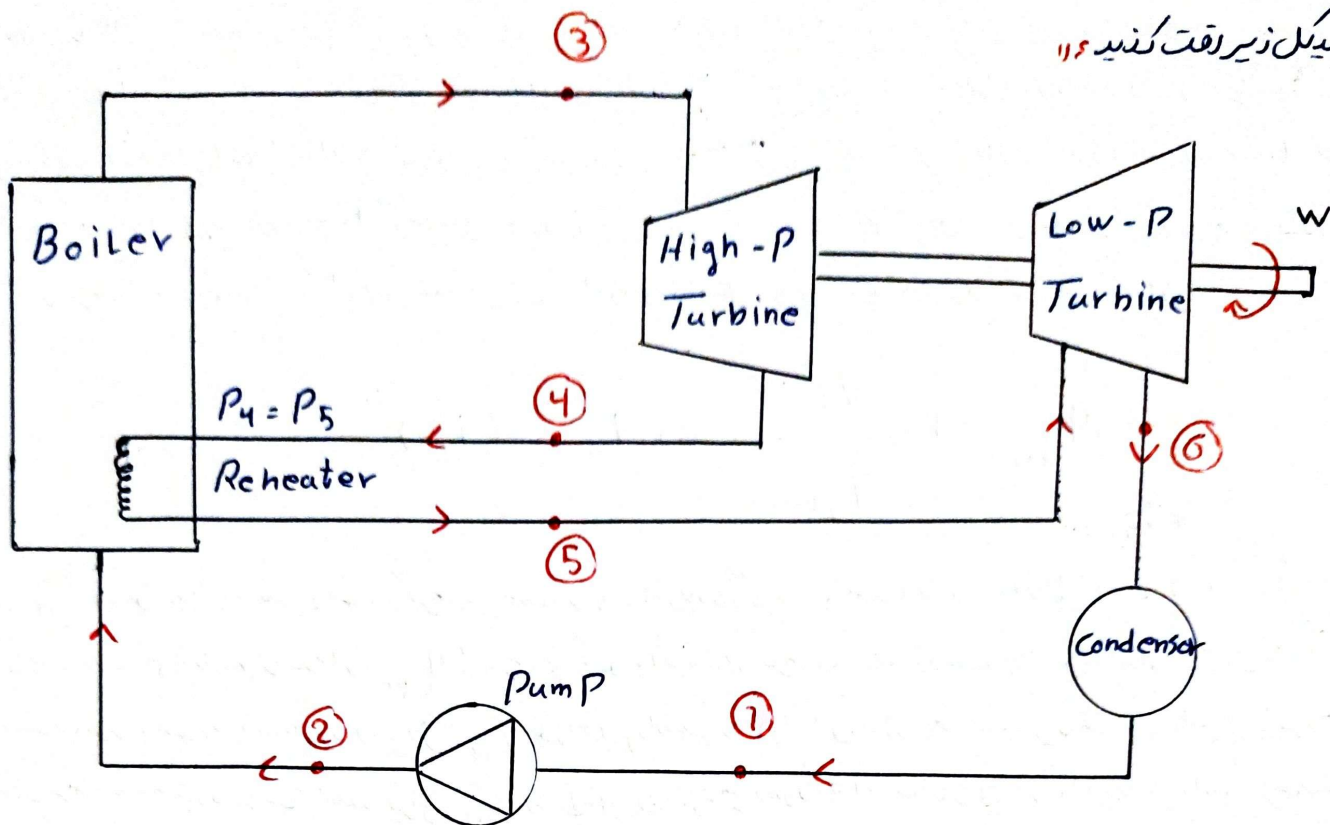
$$\left\{ \begin{array}{l} x_4 = 0.804 \\ \eta_{th} = 43\% \end{array} \right.$$

=>

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.802 \rightarrow 0.912 : \text{کیفیت بخار کاهش} \\ 43\% \rightarrow 37.3\% : \text{بازه افزایش} \end{array} \right.$$

- سیکل رانگین با گرمایش مجدد:

به سیکل زیر وقت کنید



بروش گرمایش مجدد آب از طریق پمپ فشرده شده و به بویلر ارسال کرده و آن را به رمای سوپر هیت می رسانیم، از دو توربین ستفاده می کنیم یکی توربین فشار پایین و یک توربین فشار بالا ابتدا بخار را به داخل توربین فشار بالا می فرستیم تا از آن کار بگیریم، در خروجی بخار کمی خنک شده و فشار کمی کاهش می یابد سپس دوباره بخار را وارد بویلر کرده و رمای آن را افزایش می دهیم و وارد توربین فشار پایین می کنیم، سپس دوباره از آن کار می گیریم، در خروجی بخار وارد کندانسور شده و حرارت آن به محیط اطراف منتقل می شود و سپس به پمپ رسیده و سیکل بسته می شود، بنابراین در این سیکل از بخار در دو نقطه کار می گیریم یعنی:

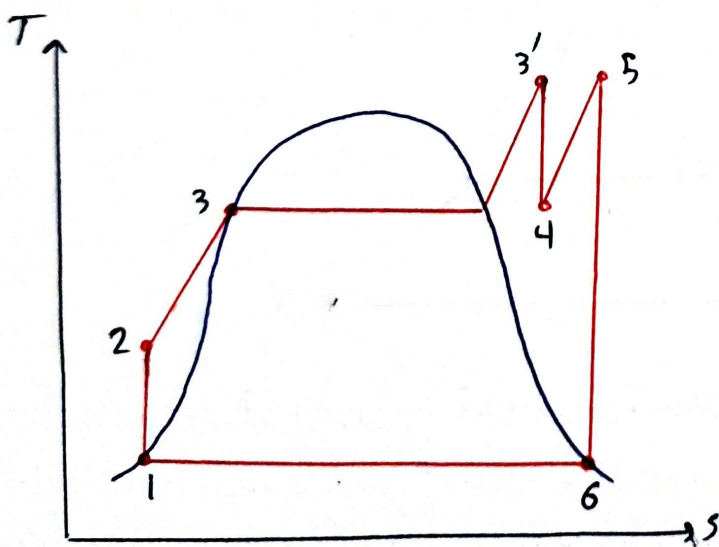
$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{H.st} + \dot{W}_{L.st} - \dot{W}_p$$

عمیق این روش هزینه بسیار بالایی آن است زیرا توربین ها به دلیل تکنولوژی ساخت بالا تجهیزات گران قیمتی هستند زیرا نیروی پره های توربین به جهت تحمل رمای بالا آلیاژ خاکی را نیاز می برند که در رمای بالا خوردگی ایجاد کنند، که این آلیاژ عمدتاً آلونیکل است، به این آلیاژها سوپر آلیاژ نیز گفته می شود. بنابراین با توجه به این توضیحات - دیدیم که وقتی از یولیر با فشار بالا استفاده می کنیم رطوبت بخار در فرای توربین زیاد می شود و این یک مشکل بزرگ است، یکی از راه های حل این مشکل گرمایش مجدد یا Reheat است، در این روش کارخانه تولیدی، گرمای رده شده به سیکل و گرمای رده شده از سیکل افزایش می یابد، راندمان سیکل در این روش معمولاً افزایش می یابد: //

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \Rightarrow T_L = (T_L)''$$

تغییرات T_H در این روش بستگی به فشار گرمایش مجدد دارد، اگر فشار گرمایش مجدد بسیار بالا باشد $Reheat, = 4 \rightarrow 3$ اثرش را از دست می دهد و راندمان η_{th} تغییری نمی کند، اگر فشار گرمایش مجدد بسیار پایین باشد، چیزی نزدیک به رمای کندانسور، مقادیر بسیار زیادی از T_H خواهیم داشت که T_H آن کم می شود پس راندمان کاهش می یابد، حال اگر فشار گرمایش مجدد بیدین باشد برای P_4 نقطه ای تعیین می شود که اگر فشار 4 از آن بیشتر باشد گرمایش مجدد اثرش را از دست می دهد و اگر کمتر باشد راندمان افت می کند، معمولاً در نیروگاه ها همین حالت بیدین فشار - انتخاب می شود و راندمان با گرمایش مجدد افزایش می یابد، بنابراین راندمان یا از مزایای اصلی این روش است ولی مزیت اصلی آن افزایش کیفیت بخار در فرای توربین است. //

مثال 3) نیروگاه بخار را که در چرخه ایده آل گرمایش مجدد رانکین کاری کند را در نظر بگیرید، بخار در فشار 15 MPa و رمای 600°C وارد توربین فشار قوی می شود و در فشار 10 kPa در کندانسور تقطیر می گردد، اگر مقدار رطوبت بخار در خارج توربین فشار ضعیف بیشتر از 10.4% نباشد مطلوب است. //



الف) فشاری که در آن بخار مجدد گرم می شود را محاسبه کنید؟

ب) راندمان این چرخه را محاسبه کنید؟

$$\left\{ \begin{array}{l} P_3 = P_2 = 15 \text{ MPa} \\ T_3 = 600^\circ \text{C} , T_5 = 600^\circ \text{C} \\ P_6 = P_1 = 10 \text{ kPa} \\ \eta_6 = 0.896 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} s_3 = s_4 \\ s_1 = s_2 \\ P_1 = P_3 \\ P_6 = P_1 , \eta_1 = 1 \end{array} \right.$$

الف) $P_5 = ?$

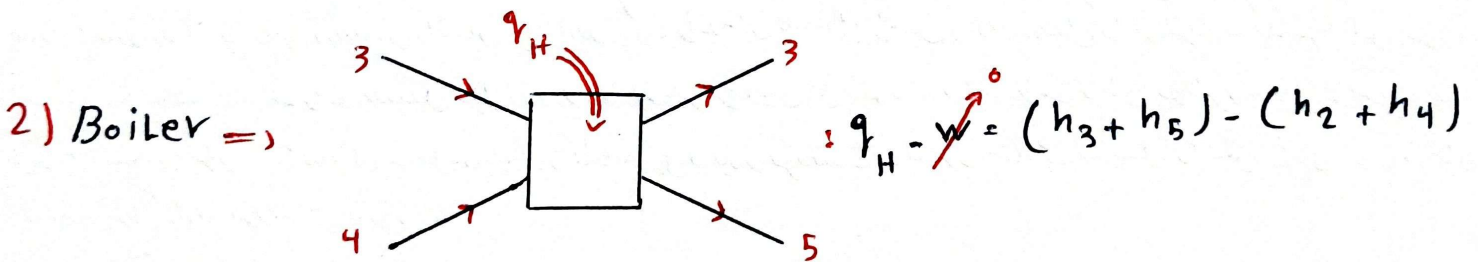
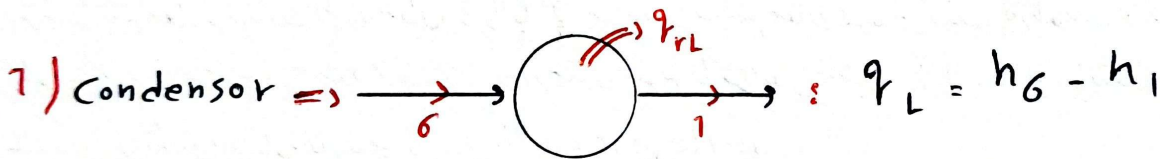
$$\begin{cases} P_6 = 10 \text{ kPa} \\ \eta_6 = 0.869 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h_6 = h_f + \eta_6 h_e = 2,335,8 \\ s_6 = s_f + \eta_6 s_e = 7.37 \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_5 = 600^\circ\text{C} \\ s_5 = 7.37 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_5 = 4 \text{ MPa} \\ h_5 = 3674.44 \end{cases}$$

توربین ایزنتروپیک و

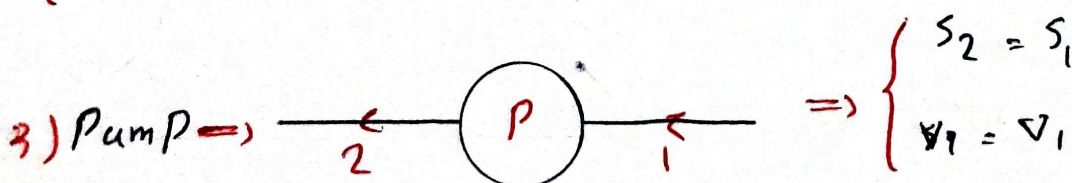
$$s_5 = s_6$$

ب) برای بیست آوردن بازدهی حجم معیار کندانسور یویلر و لیمپ را مشخص کنید.



$$\Rightarrow \eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = (h_4, h_3, h_2, h_1)$$

$$\begin{cases} P_1 = 10 \text{ kPa} \\ \eta_1 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h_1 = h_f = 191.81 \\ v_1 = v_f = 0.00101 \end{cases}$$



$$w_p = + \int_1^2 v dp = v_1 (P_2 - P_1) = 15.11 \quad , \quad \text{سسس} \rightarrow w_p = h_2 - h_1$$

$$\rightarrow h_2 = h_1 + w_p = 206.92 \quad \frac{kJ}{kg}$$

$$\rightarrow \begin{cases} P_3 = 15 \text{ mpa} \\ T_3 = 600^\circ \text{C} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h_3 = 3582.3 \\ s_3 = 6.6775 \end{cases} \quad , \quad \begin{cases} P_4 = P_3 = 4 \text{ mpa} \\ s_4 = s_3 = 6.6775 \end{cases}$$

$$\rightarrow h_4 = 3154.3 \quad \rightarrow q_L = h_6 - h_1 = 2143.99$$

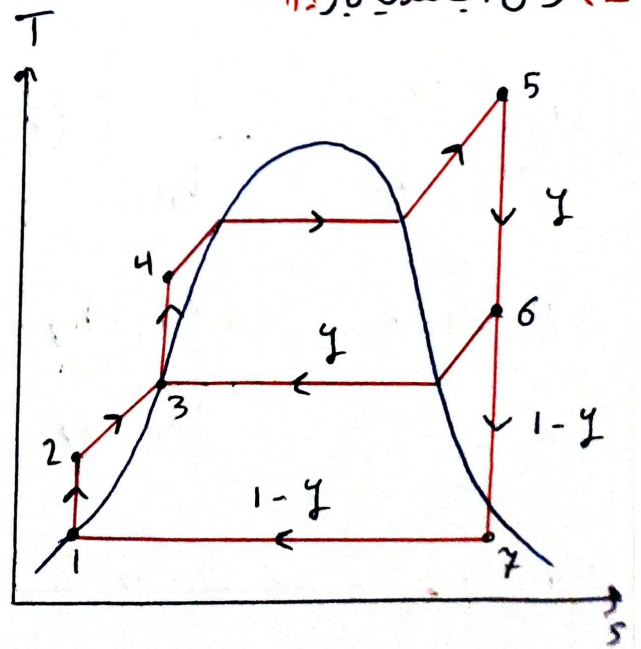
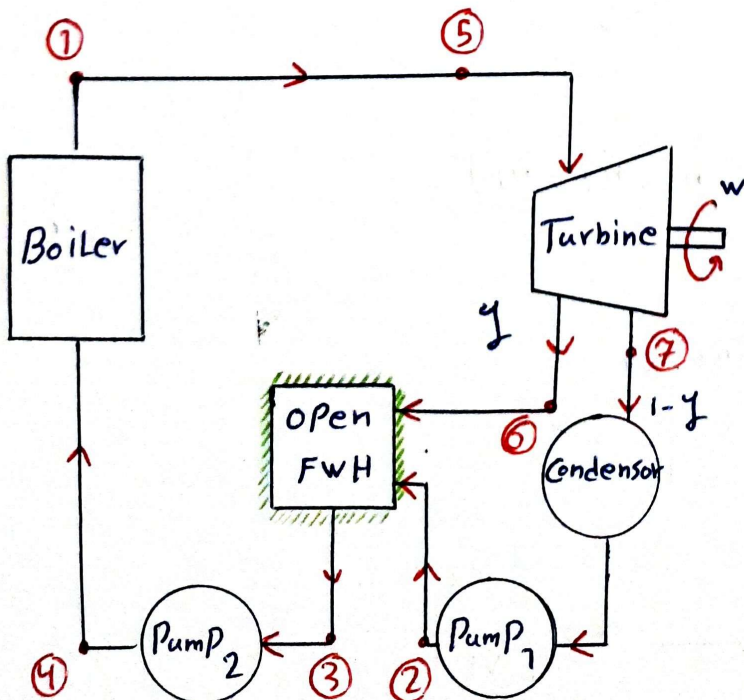
$$q_H = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) = 3893.52 \quad \rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 0.45 = 45\%$$

اگر بخواهیم مقادیر درست آصره مثال 3 را با 2 مقایسه کنیم مشاهده می کنیم که رطوبت کاهش پیدا کرده، در مثال دوم رطوبت بدون گرمایش مجدد 19.6% و در مثال سوم با گرمایش مجدد 4.7% می باشد.

Regeneration یا بازایاب در سیکل رانکین دارای بازایاب یا

هدف استفاده از بازایاب در سیکل رانکین این است که راندمان سیکل رانکین را به سیکل کارنو نزدیک کنیم به این صورت که آب تغذیه بوسیله بخار خود سیکل قبل از ورود به بویلر گرمایش می شود، و اختلاف دمای بویلر و سیال حاصل آب هنگام انتقال حرارت به سیال حاصل در بویلر کاهش می یابد و برگشت ناپذیری خارجی سیکل کاهش یافته و راندمان آن به سیکل کارنو نزدیک می شود.

= گرمین آب تغذیه بازایاب



در این سیکل چاه حرارتی گذرانسور و چشمه حرارتی بویلر است، هر قدر که اختلاف رمای مابین این دو کمتر شود بازدهی سیکل افزایش می یابد، یعنی از بخار وارد شده به توربین در طبقات میانی زیرکش می شود و به همراه آب تغذیه خارج شده از پمپ قبل از اینکه وارد بویلر شود وارد گرمکن یا مبدل آب تغذیه باز می شوند و آب تغذیه را با حرارت راضی آب زیرکش شده در توربین گرم کرده و به صورت مایع اشباع از گرمکن آب تغذیه باز خارج شده و وارد بویلر می شود، در نتیجه این بار اختلاف رمای آب تغذیه و رمای بویلر و منبع حرارتی به دلیل انتقال حرارت داخلی و گرم شدن آب تغذیه و رمای بویلر کاهش پیدا کرده، برگشت ناپذیری خارجی ایجاد شده در بویلر کاهش پیدا کرده و در نتیجه راندمان نیروگاه افزایش پیدا می کند، در این روش کار توربین کاهش می کند زیرا یعنی از بخار را زیرکش می کنیم از طرفی سوخت مصرفی بویلر کاهش پیدا می کند، لازم به ذکر است که در این روش آب و بخار با یکدیگر ترکیب می شوند.

در حالت ایده آل فشار بخار زیرکش شده آب تغذیه خروجی از پمپ و آب تغذیه خروجی از گرمکن آب تغذیه با یکدیگر برابر هستند یعنی $P_2 = P_6 = P_3$ ، به دلیل زیرکش شدن مقداری، بخار آب در توربین ربی های وارده با یکدیگر برابر نیست، به ازای ربی جری داریم:

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_t} = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_t} = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_t} = \gamma, \quad \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_t} = \gamma, \quad \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_t} = \frac{\dot{m}_8}{\dot{m}_t} = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_t} = 1 - \gamma$$

$$q_{in} = \gamma (h_5 - h_4) \text{ : کاهش}, \quad q_{out} = (1 - \gamma) (h_7 - h_1) \text{ : کاهش}$$

$$W_{Turbine} = \gamma (h_5 - h_6) + (1 - \gamma) (h_6 - h_7)$$

$$W_{Pump} = (1 - \gamma) W_{P_{1.in}} + \gamma W_{P_{2.in}} \Rightarrow \begin{cases} W_{P_{1.in}} = V_1 (P_2 - P_1) \\ W_{P_{2.in}} = V_3 (P_4 - P_3) \end{cases} \Rightarrow \text{کاهش}$$

$$W_{net} = W_{T.out} - W_{P.in}$$

مثال 4) نیروگاه حرارتی در چرخه ایده آل رانندگی که توسط گرمکن آب تغذیه باز کار می کند را در نظر بگیرید، بخار در فشار 15 MPa و رمای 600°C وارد توربین می گردد و در فشار 10 kPa در گذرانسور تقطیر می شود، مقداری بخار در فشار 1.2 MPa توربین را ترک نموده و وارد گرمکن آب تغذیه باز می شود، مقدار بخار خروجی از توربین و بازده حرارتی نیروگاه را بدست آورید؟ همچنین مطلوب است:

الف) محاسبه \dot{m}_1 ؟

ب) محاسبه راندمان سیکل نیروگاه؟

$$1) \begin{cases} P_1 = 10 \text{ kPa} \\ \eta_1 = 0 \text{ (اصابع اشباع)} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} h_1 = h_f = 191.81 \\ v_1 = v_f = 0.00101 \end{cases}$$

$$2) w_{P_1} = v_1 (P_2 - P_1) = 1.22 \rightarrow w_{P_1} = h_2 - h_1 \rightarrow h_2 = 193.03$$

$$3) \begin{cases} P_3 = 1.2 \text{ MPa} \\ \eta_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} h_3 = h_f = 798.64 \\ v_3 = v_f = 0.001130 \end{cases}$$

$$4) w_{P_2} = v_3 (P_4 - P_3) = 15.72 \rightarrow w_{P_2} = h_4 - h_3 \rightarrow h_4 = 814.37$$

$$5) \begin{cases} P_5 = 15 \text{ MPa} \\ T_5 = 600^\circ\text{C} \end{cases} \xrightarrow{\text{superheat}} \begin{cases} h_5 = 3582.3 \\ s_5 = 6.6775 \end{cases}$$

$$6) \begin{cases} P_6 = 1.2 \text{ MPa} \\ s_6 = s_5 = 6.6775 \end{cases} \Rightarrow h_6 = 2859.5, \quad 7) \begin{cases} P_7 = 10 \text{ kPa} \\ s_7 = s_6 = s_5 = 6.6775 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \text{First Law of Thermodynamics: } Q_{cv} - W_{cv} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_i h_i$$

$$m_1 h_6 + (1 - m_1) h_2 = 1 \times h_3 \Rightarrow m_1 = 0.227 \text{ الف}$$

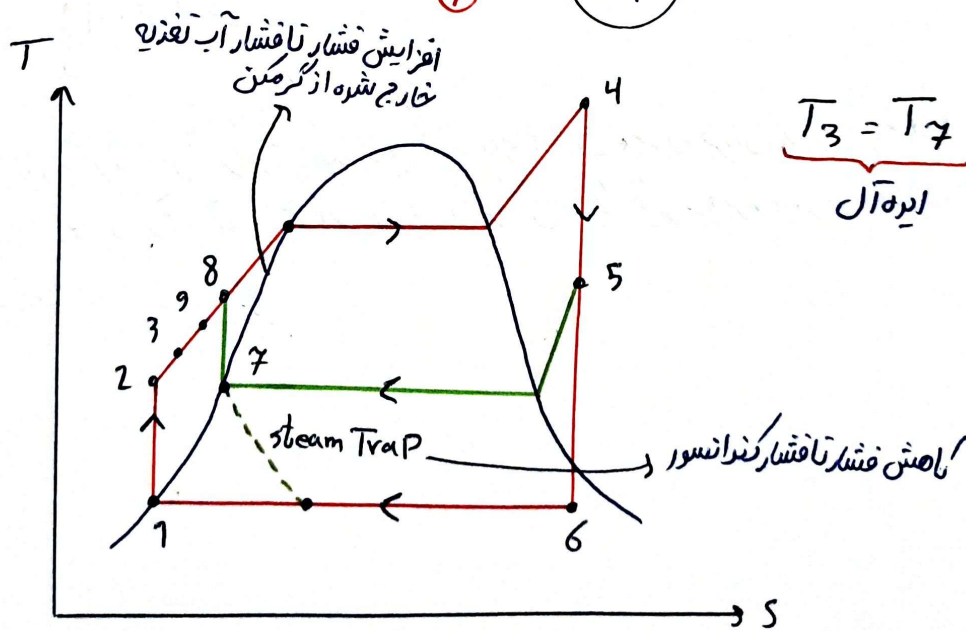
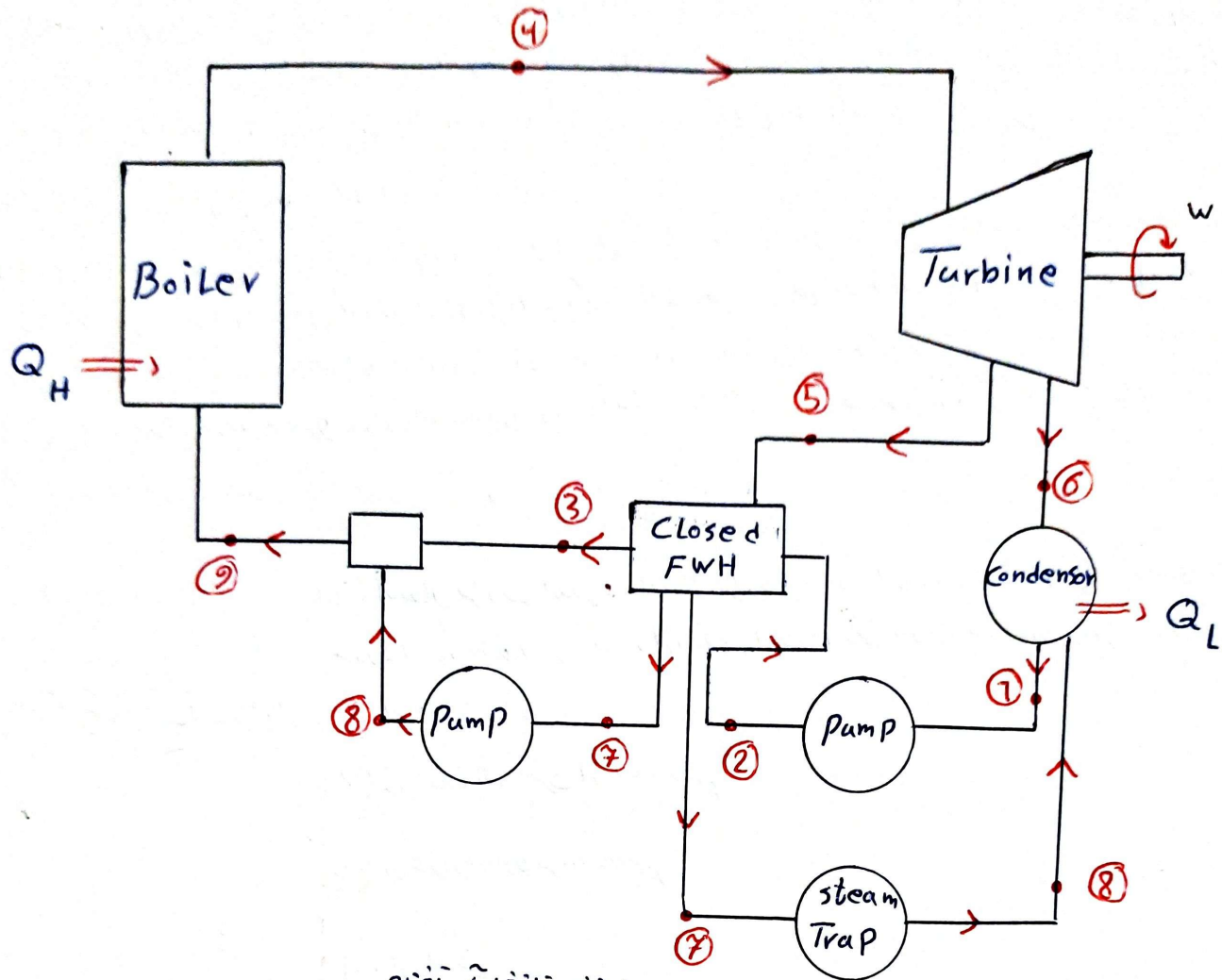
$$ب) q_H = h_5 - h_4 = 2767.93 \rightarrow q_L = (1 - m_1)(h_7 - h_1) = 1487.1$$

$$w_{net} = q_H - q_L = 1189.83 \rightarrow \eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 0.463 = 46.3\%$$

در مقایسه با مثال دوم راندمان سیکل با بازایاب افزایش یافته و شمره است: 43% \rightarrow 46.3%

= گرمن آب تغذیه بسته :

در این سیکل بخار و آب با یکدیگر مخلوط نمی شوند بلکه فقط تبادل حرارت انجام می دهند و سیکل زیر رفت کنید :



ویژگی اصلی گرمن های بسته این است که جریان آب تغذیه با بخار آبی که در توربین زیر کش می شود مخلوط نمی شوند بلکه بخار آب روی لوله حامل آب تغذیه می آید و گرمای خود را به آب منتقل کرده و به صورت مایع اشباع از گرمن خارج می شود. به دلیل مخلوط نشدن آب زیر کش شده و آب تغذیه فشار از آنها برابر نیست ، $P_5 < P_2$ در اینجا رو صورت تخلیه را داریم :

backward-Discharge (2)

forward-Discharge (1)

تخلیه پیشرو یا **forward - Discharge** :

پس از آن که مایع اشباع از گرمکن خارج شد با استفاده از پمپ فشار آن را به فشار گرمکن آب تغذیه پایین رست گرمکن قبلی برسانیم (اگر یک گرمکن داشتیم فشار آن را به فشار آب تغذیه خارج شده از گرمکن می‌رسانیم تا به همراه آب تغذیه وارد بویلر شوند) هر گرمکن نیاز به یک پمپ دارد و از معایب این روش هزینه خرید بالای پمپ‌ها و نگهداری هر پمپ است. از مزیت‌های آن می‌توان به حفظ انرژی سیال و بهبود راندمان اشاره کرد. ۲۰

تخلیه پسرو یا **backward-Discharge** :

پس از آنکه مایع اشباع از گرمکن خارج شد با استفاده از یک شیر فشار شکن فشار آن را تا فشار گرمکن آب تغذیه بالا رست پایین می‌آوریم. اگر این گرمکن بود فشار آن به فشار کندانسور می‌رسد همی یک فرایند انتقالی ثابت و کامل برگشت ناپذیری رخ می‌دهد و سپس به همراه آب درون کندانسور به سیکل بازی گردد. از مزیت‌های روش ساره بودن سیستم و عدم وجود هزینه و خرید پمپ می‌توان اشاره کرد. ولی اگر انرژی سیال هدر رفته و راندمان کاهش می‌یابد. ۲۰

مقایسه گرمکن‌های آب تغذیه باز و بسته :

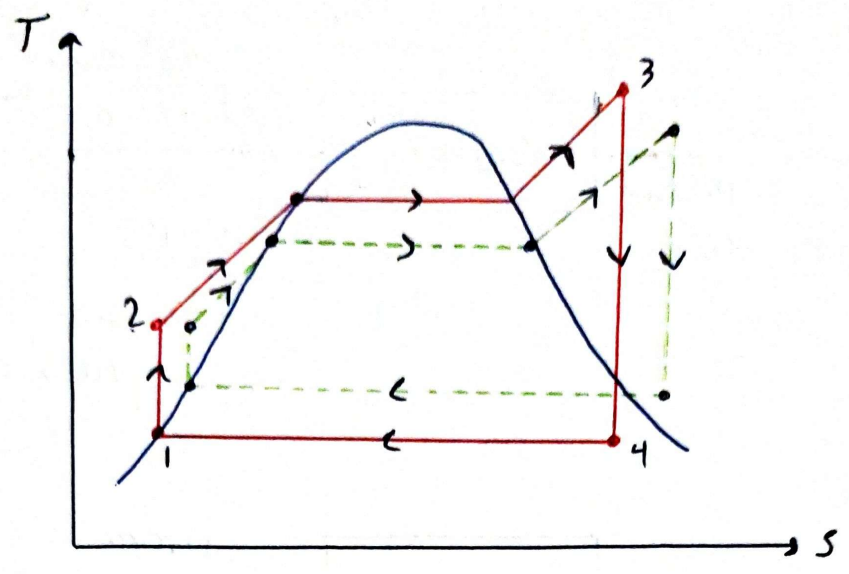
- 1) انتقال حرارت بهتر: انتقال حرارت مستقیماً با مخلوط شدن بخار آب و آب مایع مذبح تغذیه اتفاق می‌افتد و از سطحی استفاده نمی‌شود پس انتقال حرارت کامل انجام می‌شود. ۲۰
- 2) قابلیت هواگیری از سیستم
- 3) ساختار ساره تر سیستم
- 4) ارزانتر

از معایب گرمکن آب تغذیه باز نیاز داشتن گرمکن به یک پمپ اختصاصی است. چون جریان‌ها با هم مخلوط می‌شوند باید فشار بخار زیر کش شده از توربین و آب تغذیه و آب فزونی از گرمکن یا یکدیگر برابر و کمتر از فشار بویلر باشد که به وسیله پمپ انجام می‌شود. ۲۰

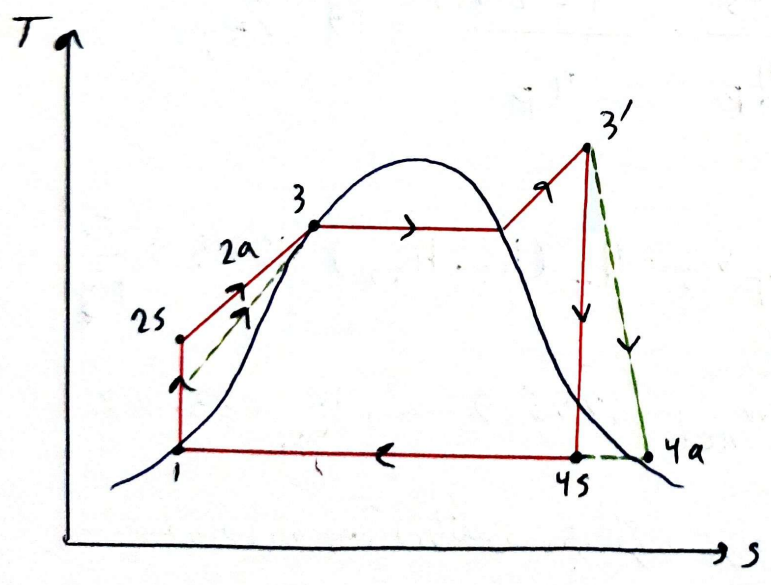


- انحراف سیکل رانکین واقعی از حالت ایده آل :

فرایندهای سیکل رانکین در عمل برگشت پذیری را نمی پذیرند به نمودار T-S زیر وقت کنید :



در این فرایند در نقطه 1-2 به دلیل اصطکاک سیال در پمپ فرایند آنتروپی ثابت و برگشت پذیر نیست و $s_2 > s_1$ در نقطه 2-3 به دلیل افت فشار ناشی از اصطکاک در بویلر فشار نقاط 2 و 3 برابر نیست و کاهش پیدا می کند، در نقاط 3-4 به دلیل اصطکاک در توربین مقواری برگشت پذیر رخ می دهد و $s_4 > s_3$ در نقطه 4-1 اگر گذر از سوپراپازانت فشار و در برابر این فشار ورودی از فروبی بیشتر تا برافت فشار عملی کند و $P_4 > P_1$ ، اما نکته حائز اهمیت این است که افت فشار در بویلر و گذر از سوپراپازانت در برگشت پذیری را نمی پذیرد و می توان از آنها صرف نظر کرد :



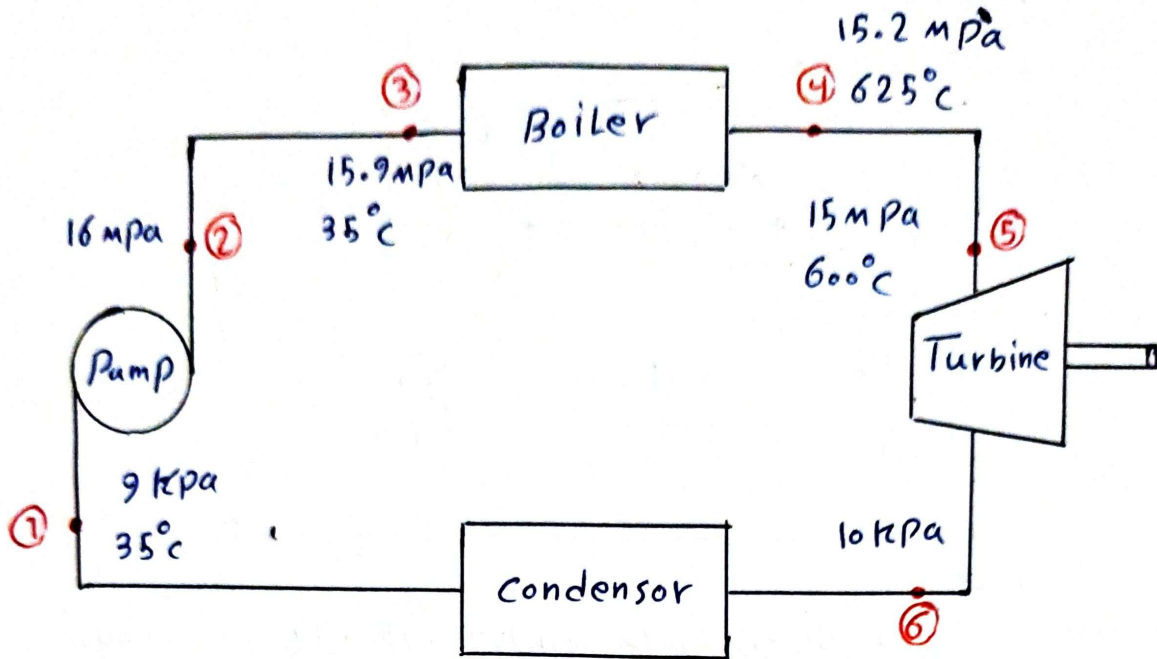
$$\eta_{pump} = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

$$\eta_{Turbine} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

به شرطی می توان برای بار از اختلاف افتالی ها استفاده کرد که لذا انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر نشود. همچنین علاوه بر اصطکاک سیال عامل اصلی اتلاف حرارت به محیط در توربین نیز باعث ایجاد برگشت پذیری می شود که البته انتقال حرارت به محیط برخلاف اصطکاک باعث کاهش آنتروپی می شود.

به مثال صفحه تویه کنید :

مثال 5) در نیروگاه زیربازره ایزنتروپیک پمپ $\eta_p = 85\%$ و بازره ایزنتروپیک توربین $\eta_T = 87\%$ و $\dot{m} = 15$ می‌باشد ابتدا راندمان سیکل را محاسبه و سپس توان خالص خروجی نیروگاه را بدست آورید.



$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} \quad , \quad w_{net} = w_T - w_P$$

$$\eta_{pump} = \frac{w_s}{(w_p)_a} \Rightarrow \text{واقعی: } w_p = \frac{w_s}{\eta_p} = \frac{v_1 (P_2 - P_1)}{\eta_p} = 19 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{Turbine} = \frac{w_T}{w_s} \Rightarrow \text{واقعی: } w_T = \eta_T w_s = \eta_T (h_5 - h_{6s}) = 1275.9 \text{ kJ/kg}$$

$$q_H = h_4 - h_3 = 3499 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow w_{net} = 1256.9 \rightarrow \eta_{th} = 35.9\%$$

- تحلیل قانون دوم سیکل رانکین: نرخ برگشت ناپذیری یک حجم کنترل جریان پایا (SSSF) «

$$I = T_0 \dot{S}_{gen} = T_0 (\dot{S}_{out} - \dot{S}_{in}) = T_0 \left(\sum_{out} \dot{m}_s + \frac{\dot{Q}_{out}}{T_{b,out}} - \sum_{in} \dot{m}_s - \frac{\dot{Q}_{in}}{T_{b,in}} \right)$$

$$I = T_0 \dot{S}_{gen} = T_0 \left(s_e - s_i + \frac{q_{out}}{T_{b,out}} - \frac{q_{in}}{T_{b,in}} \right)$$

ورودی و یک خروجی

$$i = T_0 \left(\sum \frac{q_{out}}{T_{out}} - \sum \frac{q_{in}}{T_{bin}} \right)$$

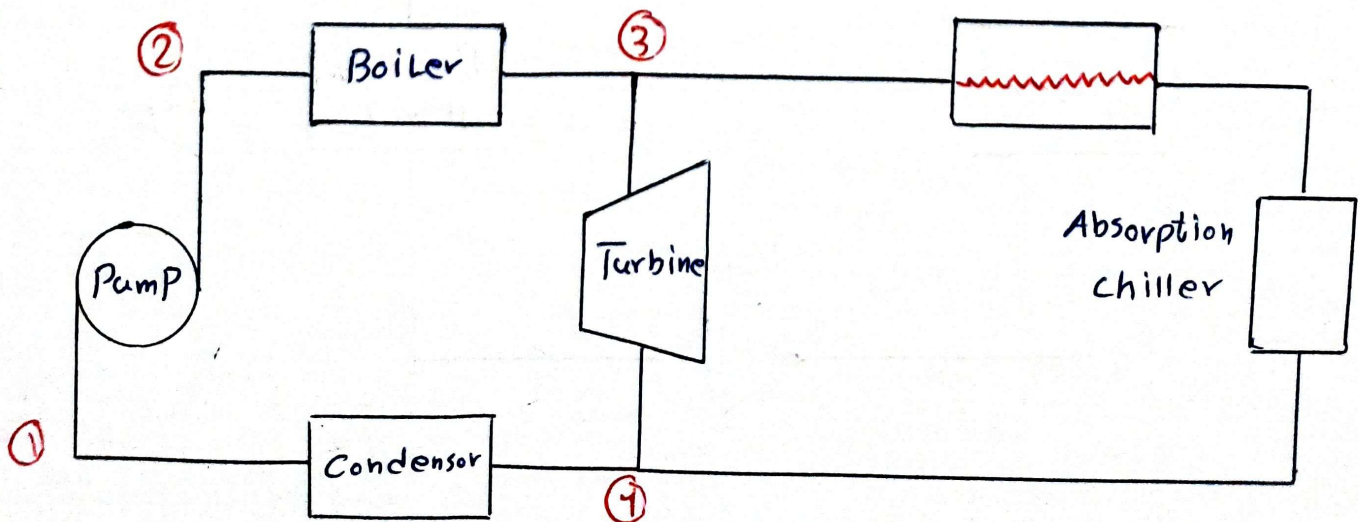
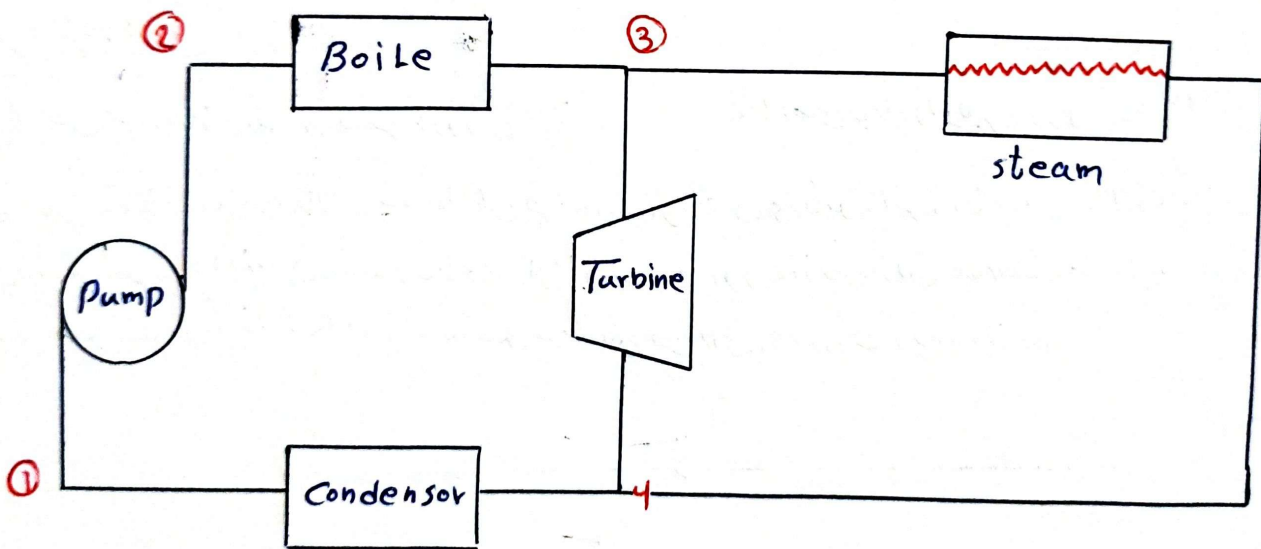
نرخ برگشت ناپذیری سیکل رانگین نیز به شرح زیر است :

$$i = T_0 \left(\frac{q_{out}}{T_L} - \frac{q_{in}}{T_H} \right)$$

عوامل دیگری نیز در برگشت ناپذیری سیکل رانگین نیز دخیل هستند به عنوان مثال : متراکم کردن خروجی مایع در کندانسور های واقعی ، وجود اصطکاک در یاتاقان ها ، نشت بخار به بیرون ، نفوذ هوا به داخل کندانسور و توان مورد نیاز رستگاه های جانبی مانند فن ها .

- سیستم های تولید همزمان یا تولید توأم یا **Cogeneration** :

در سیکل ها یا سیستم های تولید همزمان بیش از یک محصول تولیدی خواهد داشت ، می توان از یک سیکل رانگین سیستم تولید همزمان را به وجود آورد ، به عنوان مثال :



در سیکل اول بخار گرفته شده و برای گرمایش استفاده می شود که در واقع در این سیکل هم گرمای هم برق تولید شده است نام دیگر این سیکل نیروگاه **CHP** یا **Combined Heat and Power** می باشد، حال اگر خط بخار گرفته شده را به یک چیلر جذبی منتقل کنیم آنجا همایش تولید می شود که به آن **CCP** یا **Combined Cooling Power** گویند، و یا حتی ممکن است سیکل به صورت همزمان حرارت همایش و برق را تولید کند که در این صورت به این گونه سیکل ها **CCHP** یا **Combine Cooling, Heat and Power** گویند، در سیستم های تولید همزمان یا تولید توان گرمایش فرایندی رکن اساسی است، در بسیاری از مواقع در صنعت نمی توان گرما را مستقیماً با فرایند احتراق به سیال عامل منتقل کرد به دلیل ۱۱

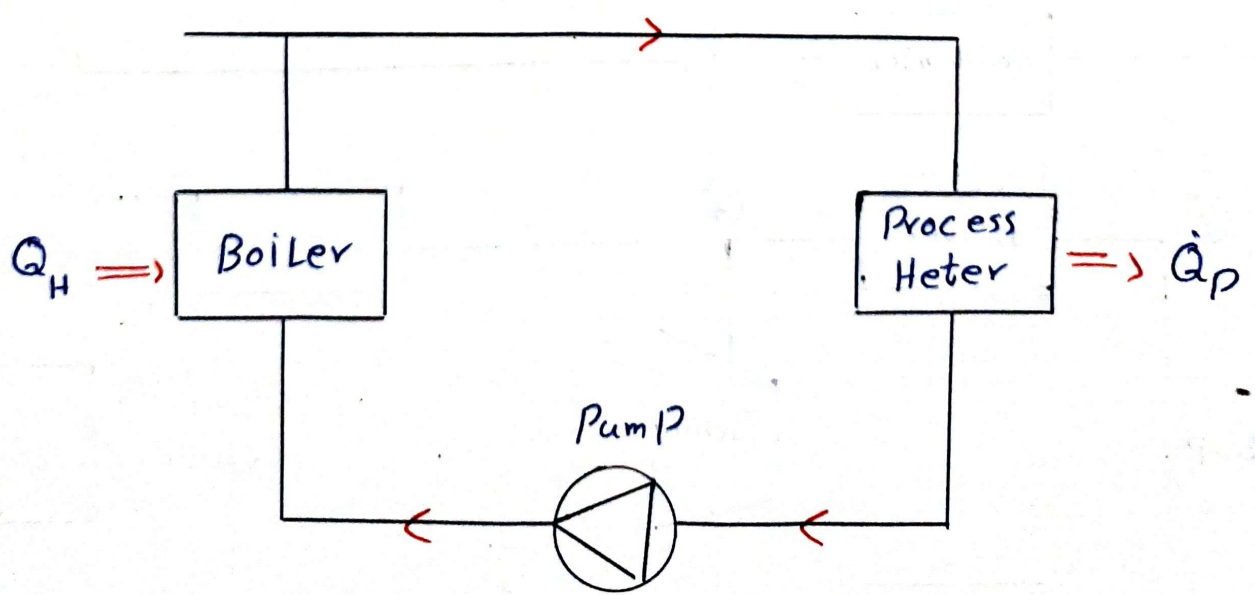
(۱) امنیتی: به عنوان مثال برای گرم کردن نفت خام در پارایشگاه نمی توان آن را مستقیماً در کوره در معرض حرارت مستقیم قرار داد زیرا احتمال انفجار وجود دارد ۱۲

(۲) هزینه ها: نفت و سوختی که برای بویلر استفاده می شود در زمستان و برما و یسکوزیته بسیار بالایی خواهد داشت و پیدا کردن آنها به چه فشار زیادی و هزینه بالایی در بر دارد، بنابراین نیاز است که با گرم کردن سوخت و یسکوزیته آن را پایین آورد تا بسیار راحت شود.

در گرمایش فرایندی برای گرم کردن به سیال از یک سیال واسطه استفاده می شود، به کاربردترین سیال واسطه برای گرمایش فرایندی بخار آب است زیرا بخار آب به دلیل بارایون ظرفیت حرارتی انرژی بالایی را می تواند با خود حمل کند و به سیال اصلی منتقل کند، خود آب در برابر احتراق کاملاً بی خطرات است و همچنین ارزان و در دسترس است، از ویژگی های گرمایش فرایندی ۱۱

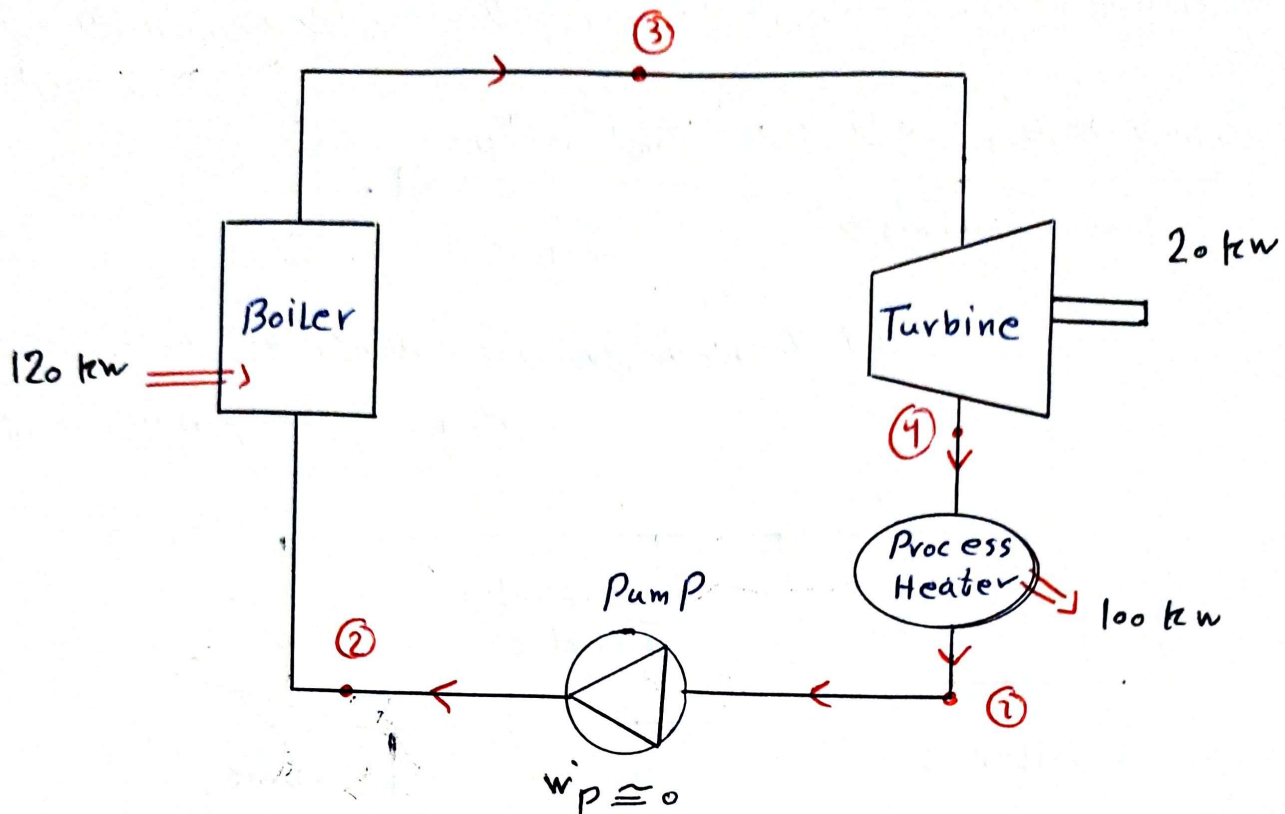
(۱) دمای مورد نیاز پایین در هیتتر حدود 200°C (۲) دمای بالای بویلر حدود 1400°C

همچنین اختلاف دمای سیال یا محیطی طی چرخه بسیار کاهش می یابد، انرژی یا کیفیت بالا به انرژی یا کیفیت پایین تبدیل می شود که اگر انرژی بسیار بالایی در آن از دست می رود، از بزرگترین معایب گرمایش فرایندی همین از دست رفتن مقدار زیادی انرژی است، سیکل گرمایش فرایندی به صورت زیر است ۱۱



به مثال صفحه بعد وقت کنید ۱۲

مثال 6) سیکل زیر را تحلیل و راندمان آن را بدست آورید ۷۰



در این سیکل 20 kW گرمای بیشتر به بویلر را لیم و در عوض با اضافه کردن توربین 20 kW کار دریافت کرده ایم، یعنی در واقع این سیکل ترکیب سیکل گرمایش فرایندی ساره و سیکل جدیدی است که 20 kW گرمای دریافت کرده و به 20 kW کار تبدیل می کند که یعنی بازه سیکل جدید 100% است ۱۱

$$\Rightarrow \eta'_{th} = \frac{w_+}{Q_H} = \frac{20}{20} = 100\%$$

حال در سیکل حاصل که برایند سیکل گرمایش فرایندی ساره و توربین با بازه 100% است بازه به شرح زیر است ۱۲

$$\Rightarrow \eta_{th} = \frac{w_{net}}{Q_H} = \frac{20}{120} = 16.6\%$$

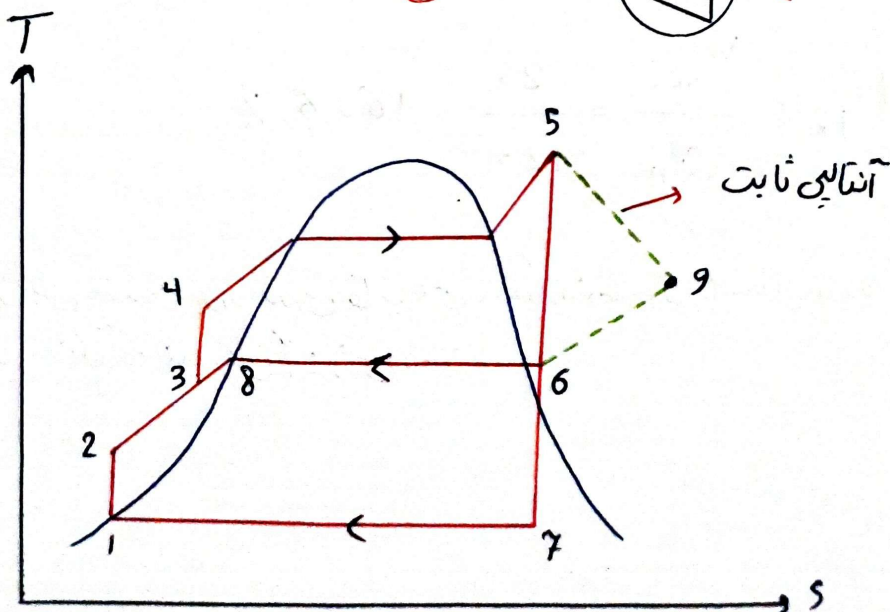
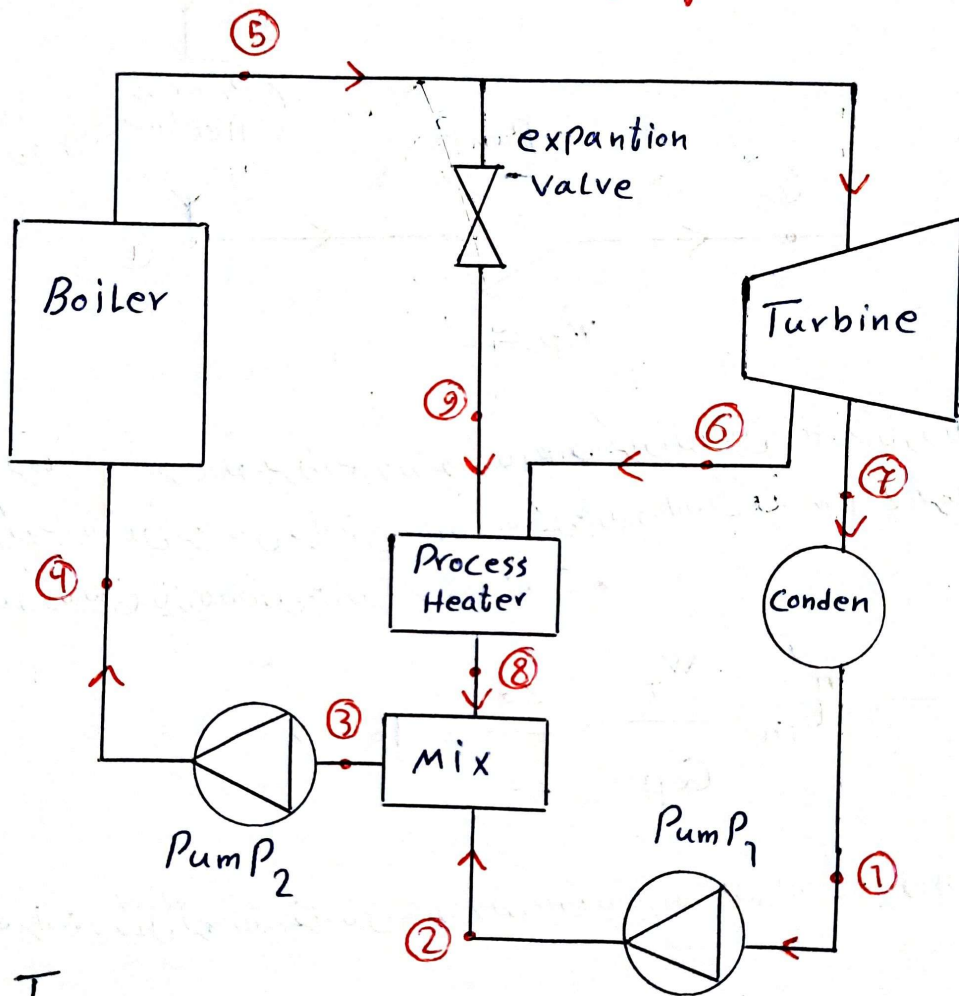
یعنی سیکل گرمایش فرایندی صنعه قبل به قدری فایده می باشد که زمانی که با سیکل بازه 100% ترکیب شده بازه ای آن 16.6% می باشد، دلیل آن هدر رفتن انرژی است.

- ضریب بهره برداری ۱۱٪
 زمانی که سیکلی را در یک روزه دو فریز انرژی (مثلا گرما و کار) را همزمان تولید می کنند، راندمان معیار خوبی برای سنجش
 عملکرد آن نیست ۱۶٪

$$\epsilon_u = \frac{\text{کار خالص تولیدی} + \text{گرمایش فرایندی}}{\text{گرمای کل داده شده به سیکل}} = \frac{w_{net} + Q_p}{Q_H} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

ضریب بهره برداری در حالت ایده ال می تواند ۱۰۰٪ باشد ولی عملاً حدود ۷۰٪ است.

- سیکل اصلی تولید تقاضا (Cogeneration) ۱۶٪



اهداف تولید تقارم عبارتند از گرمایش فرایندی که هدف اصلی است و تولید توان و برف که هدف فرعی می باشد، در این سیکل چون توربین و کمپرسور فرایندی کاملاً سری بسته نشده اند تقارنایی تنظیم مجدد وجود دارد، تنظیم سیکل به این صورت است که با کمپرسور زیاد کردن فشار بخار زیرگش شده از توربین می توان میزان گرمای تولید شده در کمپرسور فرایندی و توان تولید شده در توربین را تنظیم کرد. با توجه به اینکه هدف اصلی تولید گرما در کمپرسور فرایندی است می توان با باز کردن شیر کنترل تمام بخار گرم شده توسط بویلر را صرف گرم کردن و گرم کردن فرایندی کرد و این گونه کار تولیدی در توربین صفر می شود. ۶۶

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_4 (h_5 - h_4) \quad , \quad \dot{Q}_{out} = \dot{m}_7 (h_7 - h_1)$$

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_8 h_8 \quad , \quad \dot{W}_{Turbine} = (\dot{m}_5 - \dot{m}_6) (h_5 - h_6) + \dot{m}_7 (h_6 - h_7)$$

نکته حائز اهمیت این است که همانند کمپرسور بسته با تخلیه بیشتر و در صورت وجود شیر فشار شکن فرایند 5 تا 9 آنالای ثابت خواهد بود. ۶۰

- سیکل های توانی استاندارد هوا ۶۵

در این سیکل ها فرض می کنیم که سیال عامل هوا بوده که به طور مستمر در یک سیکل بسته جریان دارد و هوا رفتار گاز ایده آل را دارد، همچنین فرض کرده که فرایند انتقال حرارت از منبع خارجی جایگزین فرایند احتراق می شود و تمام فرایندها برگشت پذیر داخلی هستند و سیکل با دفع حرارت به محیط کامل می شود (۱) البته در واقعیت تخلیه سیال عامل صورت می گیرد (۲) در صورتی که گرمای ویژه ثابت باشند سیکل سرد است.

(1) سیکل برایتون یا **Brayton** = سیکل ایده آل توربین گازی

(2) سیکل اوتو یا **Otto** = سیکل ایده آل موتور بنزینی

(3) سیکل دیزل یا **Diesel** = سیکل ایده آل موتور دیزل انواع سیکل های استاندارد توانی هوا

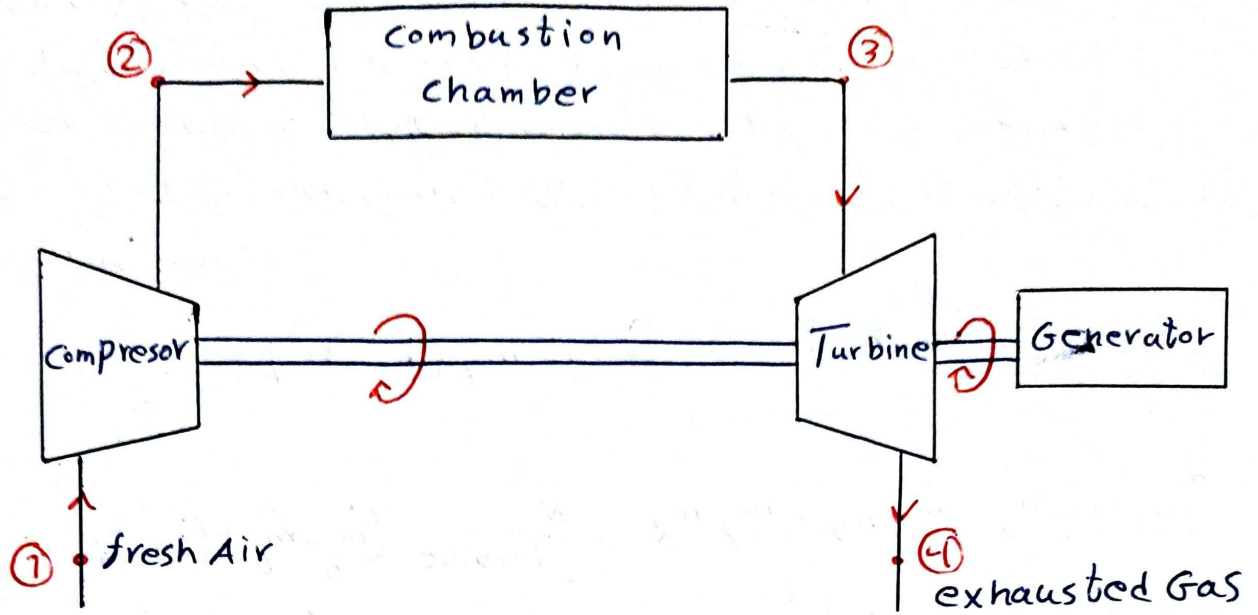
(4) سیکل های رولانه = ترکیب سیکل اوتو و سیکل دیزل

(5) سیکل توربو جت = سیکل ایده آل بیشترانش موتور جت

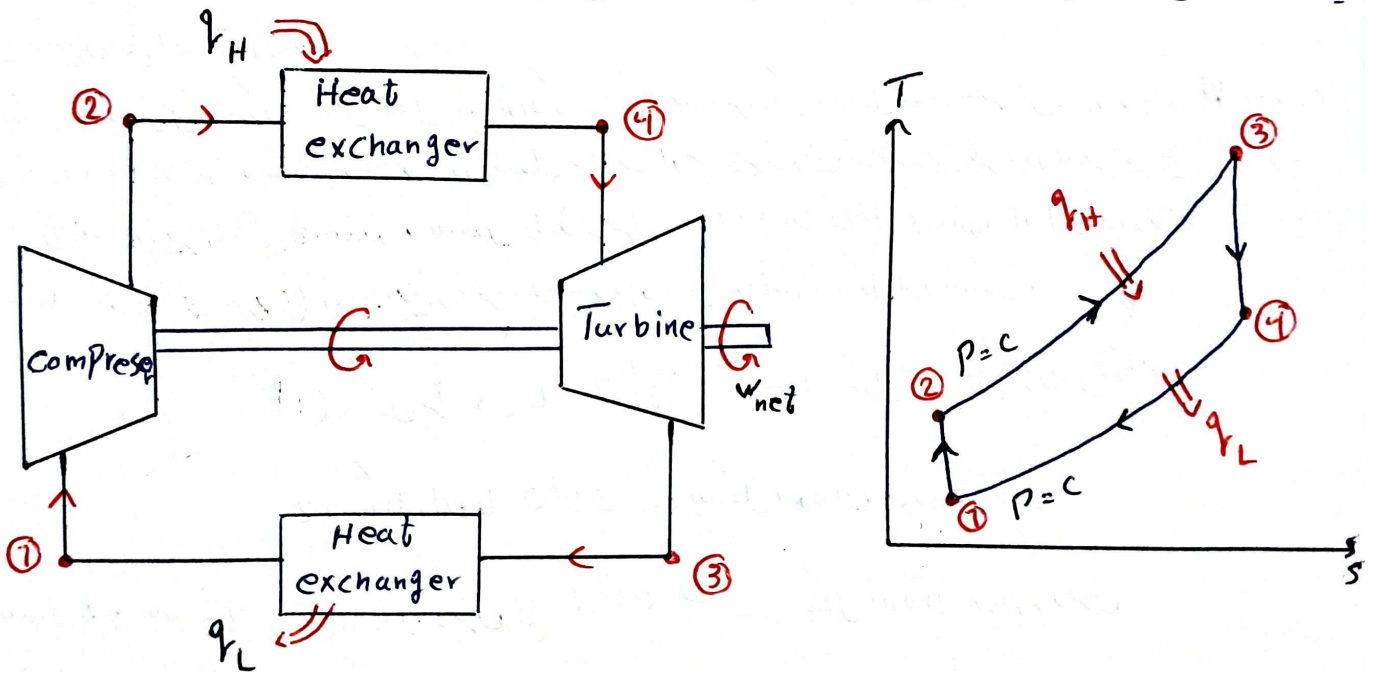
- سیکل برایتون یا **Brayton cycle** ۶۵

در سیکل برایتون هوا وارد یک کمپرسور می شود، کمپرسور هوا را فشرده می کند در واقع همان کاری را که پمپ بر روی آب انجام می دهد کمپرسور برای هوا انجام می دهد، هوای فشرده وارد محفظه احتراق یا **Combustion chamber** می شود و با سوخت ترکیب شده و واکنش شیمیایی حاصل از این دو موجب احتراق می شود، در نتیجه این احتراق گازهای داغی به وجود می آید که این گازها وارد توربین می شوند. ۶۰

به شکل سیکل برای تون زیر اوقت کنید:»



این سیکل واقعی است، با اجمال فرضیات گفته شده آن را به سیکل های استاندارد هوای برای تون تبدیل می کنیم:»



کمپرسور که کار فشرده سازی هوا را انجام می دهد مصرف کننده کار بوده و توربین و ژنراتور تولید کننده کار هستند، در نقطه 1 → 2 تراکم آیزنتروپیک بوده و ایده آل است و در واقع تراکم آریاباتیک و برگشت پذیر است، در نقطه 2 → 3 گرما با آن در فشار ثابت و برگشت پذیر، در نقطه 3 → 4 انبساط آریاباتیک و برگشت پذیر است و در واقع آیزنتروپیک می باشد، در نقطه 4 → 1 دفع حرارت فشار ثابت و برگشت پذیر صورت می گیرد. کمپرسور با یک نسبت فشار هوا را متراکم می کند، حتی برای خرید یک کمپرسور باید نسبت فشار آن مشخص باشد:»

$$\gamma_c = \frac{P_2 \rightarrow \text{فشار خروجی}}{P_1 \rightarrow \text{فشار ورودی}}$$

نسبت فشار کمپرسور

حال روابط نقاط را می نویسیم.

در سیکل دینامیک قبل معادلات خاکه معیار تنداز ::

$$\dot{w}_{net} = \dot{w}_{GT} - \dot{w}_C$$

$$2 \rightarrow 3 : \dot{q}_{in} = \dot{m}_2 (h_3 - h_2) = \dot{m}_2 C_p (T_3 - T_2)$$

که گرمای ویژه یافزید حرارت ویژه

$$3 \rightarrow 4 : \dot{Q}_L = \dot{m} (h_4 - h_1) = \dot{m} C_p (T_4 - T_1) \rightarrow \eta_{th} = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$\dot{w}_C = \dot{m}_1 (h - h_1) , \dot{w}_{GT} = \dot{m}_3 (h_3 - h_4)$$

از لحاظ بقای جرم نیز واضح است که $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$ هستند، فرضیاتی که در سیکل برای تون داریم معیار تنداز :: هو فزاینده γ هستند، تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیز و سیال حاصل هوا گاز ایده آل با گرمای ویژه ثابت (سیکل برد) است و در اینم ::

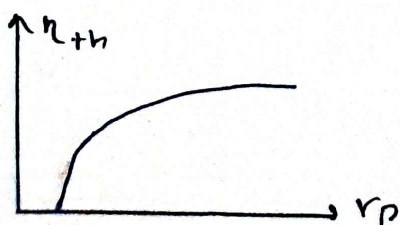
$$\dot{q}_{in} = h_3 - h_2 = C_p (T_3 - T_2) , \dot{q}_{out} = h_4 - h_1 = C_p (T_4 - T_1)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{q}_{in}} = 1 - \frac{\dot{q}_{out}}{\dot{q}_{in}} = 1 - \frac{C_p (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 (T_4/T_1 - 1)}{T_2 (T_3/T_2 - 1)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_4}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} = 1 - \frac{1}{(r_p)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

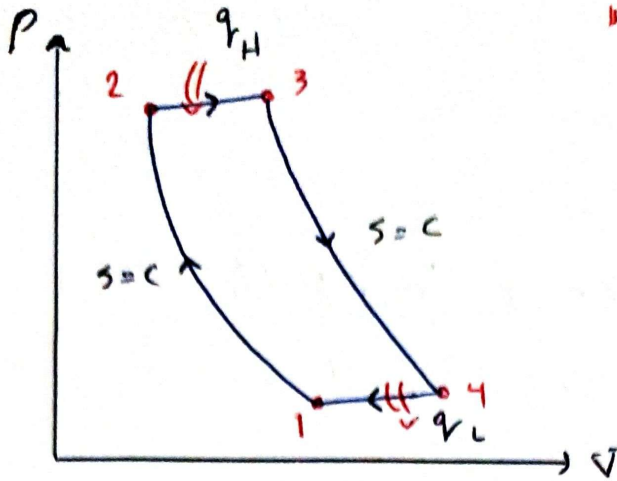
با وجود برقرار بودن سه شرط برگشت پذیری، آیزنتروپیک و گاز ایده آل با C_p ثابت می توان گفت که ::

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_2}{T_3}$$



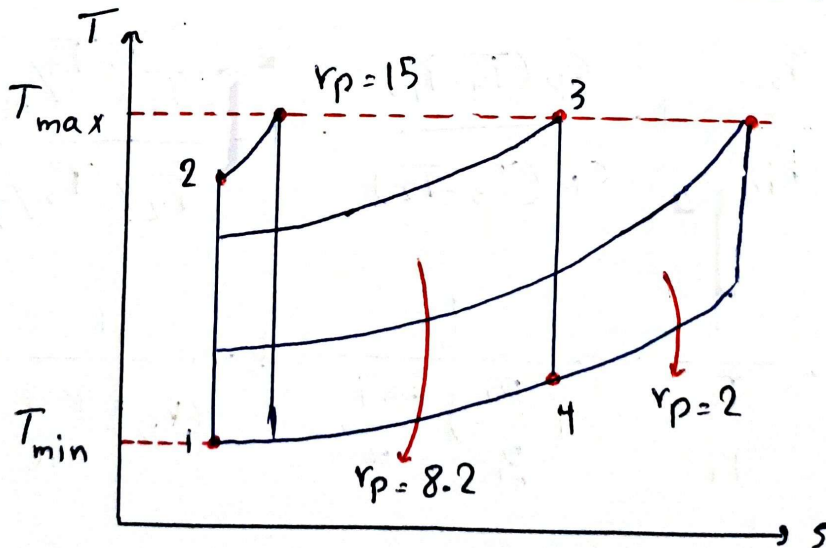
نسبت فشار سیکل یوره و معمولاً بین 11 تا 16 است ::

به تعبیر نمودار P-V نیز خواهیم داشت:



در این سیکل نسبتی در برهه تحت عنوان نسبت کار برگشتی که یعنی به مقدار از کاری که در GT تولید می‌کنیم فرجه کمپرسور می‌شود زیرا گفتیم کمپرسور مصرف کننده کار است، در سیکل‌های بخار نیز این نسبت را برای پمپ داریم، این نسبت در سیکل‌های گازی بیشتر است زیرا در سیکل‌های گازی مقدار بیشتری از کار تولید شده توسط کمپرسور مصرف می‌شود، به این دلیل که کمپرسور هوا را فشرده سازی می‌کند و فشرده سازی هوا انرژی بالایی نیاز دارد.

اثر تغییرات $\gamma_p = P_2/P_1$ بر اندام سیکل برایتون: در سیکلی که ایده آل است و فرایندهای تراکم و انبساط در آن کاملاً آیزنتروپیک هستند، با افزایش γ_p راندمان افزایش می‌یابد، در پی آن فشار γ_p تقریباً هم افزایش یافته و به دنبال آن رمای توربین نیز افزایش می‌یابد، به دلیل محدودیت رمای قابل تحمل توربین (حدود 1425°) نمی‌توان رمای توربین را به میزان دلخواه افزایش داد، با توجه به راندمان:

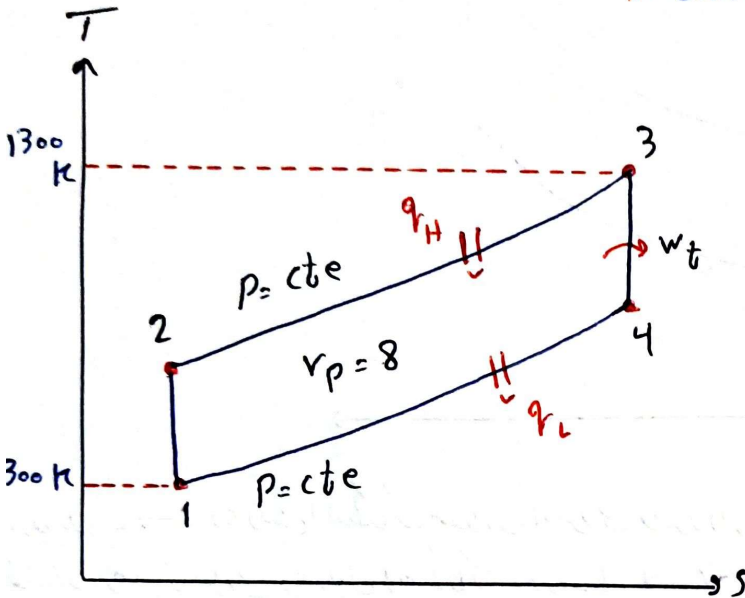


بنابراین برای دستیابی به راندمان بهتر حتماً باید T_{max} را ثابت نگه داشته و سپس γ_p را تغییر دهیم، کار خالص تولیدی سیکل ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد تا به صفر میل کند، پس یک مقدار بهینه γ_p وجود دارد، که در آن کار تولیدی ماکزیمم است و با افزایش یا کاهش آن کار تولیدی سیکل کاهش می‌یابد تا به صفر میل کند.

$$\Rightarrow \gamma_{p \text{ بهینه}} = \left(\frac{T_{max}}{T_{min}} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}} \quad \gamma_{bw} = \frac{w_c}{w_t} \quad \begin{matrix} \text{نسبت} \\ \text{کار} \\ \text{برگشتی} \end{matrix}$$

راندمان سیکل برای تون حدود 30% است که دلیل پایین بودن راندمان بالا بودن کار مصروفی کمپرسور است (کار مصروفی کمپرسور حدود 40% تا 80% کار تولیدی توربین است در حالی که در سیکل رانندگی کار مصروفی پمپ حدود 17% تا 2% کار توربین است) ۱۰

مثال 7) نیروگاهی که بر اساس سیکل ابرهال برای تون کار می کند دارای نسبت فشار 8 می باشد، دمای گاز ورودی به کمپرسور 300 K و دمای گاز ورودی به توربین 1300 K می باشد، با فرض استفاده از هوای استاندارد و گرماهی ویژه متغیر نسبت به دما محاسبه کنید. همچنین مطلوب است: ۱۱



الف) دمای گاز در خروجی توربین؟

ب) نسبت کار برگشتی سیکل؟

ج) بازه حرارتی چرخه؟

با فرض ثابت c_p سیکل ابرهال

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{(r_p)^{\frac{k-1}{k}}} = 0.448 = 44.8\%$$

آیزنتروپیک $1 \rightarrow 2$: تراکم $1 \rightarrow 2$: $T_1 = 300 \text{ K} \rightarrow h_1 = 300.473 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow P_{r1} = 1.11458$

دمای خروجی کمپرسور $\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow P_{r2} = P_{r1} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 1.11458 (8) = 8.9166$

$T_2 = 540 \text{ K} \rightarrow h_2 = 544.686 \rightarrow T_3 = 1300 \text{ K} \rightarrow h_3 = 1395.892$

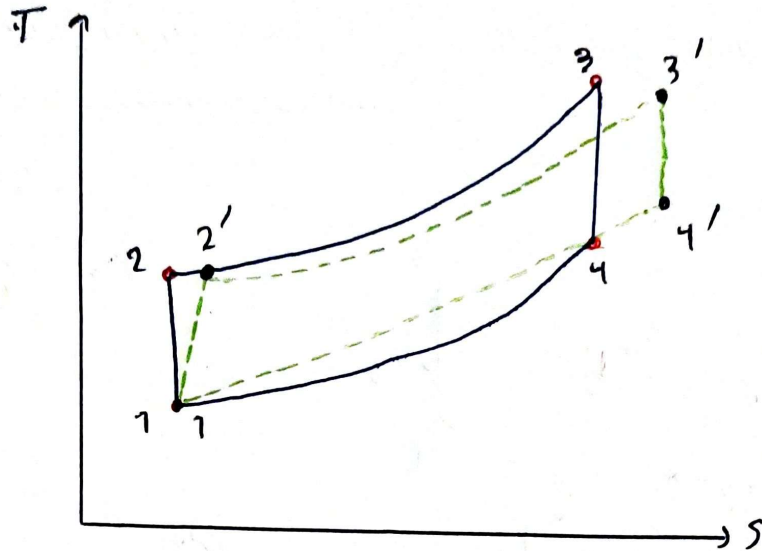
آیزنتروپیک $3 \rightarrow 4$: $P_{r3} = 265.7145 \rightarrow P_{r4} = P_{r3} \left(\frac{P_4}{P_3} \right) = 265.7145 \left(\frac{1}{8} \right)$

دمای خروجی توربین $P_{r4} = 33.2143 \rightarrow T_4 = 770 \text{ K} \rightarrow h_4 = 769.372$

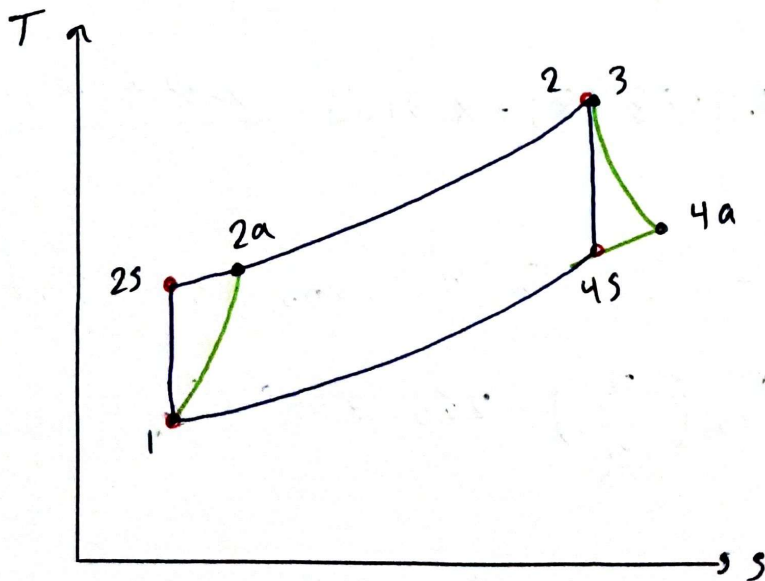
ب) $\eta_{bw} = \frac{w_c}{w_t} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4} = \frac{244.213}{606.52} = 0.402 \times 100 = 40.2\%$

ج) $\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{w_t - w_c}{h_3 - h_2} = \frac{362.307}{851.206} = 0.426 = 42.6\%$

- انحراف سیکل برای تون واقعی از سیکل ایره آل :
 توضیح را در زیر که سیکل برای تون ایره آل آیزنتروپیک بوده و واقعی و حقیقی است ، اما همیشه ایره آل نخواهد بود و سیکل انحراف پیدا می‌کند ، گفته یودیم که کمپرسور مصرف کننده کار است اگر سیکل ایره آل باشد کمپرسور را برگردانیم صرف کند و آ G کار بیشتری تولید کند ، بنابراین در انحراف سیکل برای تون را در زیر



در نقطه 2 → 1 به دلیل اصطکاک مقداری انتروپي وجود دارد و فرایند کاملاً آیزنتروپیک نیست ، در نقطه 3 → 2 افت فشار در مبدل حرارتی به دلیل اصطکاک ، در نقطه 4 → 3 به دلیل اصطکاک و انتقال گرما که معمولاً از انتقال گرما صرف نظری کنیم) انتروپي مقداری تولید می‌شود و در نقطه 1 → 4 به دلیل اصطکاک کمی افت فشار داریم .
 نکته مهم این است که افت فشار در مبدل‌های حرارتی سهم زیادی در انحراف ندارند پس از نقش آنها در انحراف از حالت ایره آل صرف نظری کنیم و در زیر



$$\eta_T = \frac{w_{aT}}{w_{sT}} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

$$\eta_c = \frac{w_{sc}}{w_{ac}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

مثال 8) در مثال 7 اگر بازه کمپرسور 80% و بازه توربین 85% باشد محاسبه کنید

الف) نسبت بار برگشتی ؟

ب) بازه حرارتی سیکل ؟

ج) دمای خروجی سیکل تعیین ؟

$$\eta_c = \frac{w_s}{w_a} \Rightarrow (w_a)_c = \frac{244.213}{0.8} = 305.26 \frac{kJ}{kg}$$

$$\eta_t = \frac{w_a}{w_s} \Rightarrow (w_a)_t = 0.85 \times 606.52 = 515.54 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_{bw} = \frac{(w_a)_c}{(w_a)_t} = \frac{305.26}{515.54} = 0.592 = 59.2 \%$$

$$\Rightarrow \text{ب) } (w_a)_c = h_{2a} - h_1 \Rightarrow h_{2a} = 305.26 + 300.473 = 605.733$$

$$\xrightarrow{T_{2a} = 598K} q_H = h_3 - h_{2a} = 1395.892 - 605.723 = 790.159$$

$$w_{net} = w_{at} - w_{ac} \rightarrow w_{net} = 210.28 \rightarrow \eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = 0.266 \times 100 = 26.6 \%$$

به دلیل برگشت ناپذیری های توربین و کمپرسور بازه از 42.6% به 26.6% رسیده، در واقع بازه توربین های گاز به حد قابل رقابت نمی رسدند تا آنکه اصلاحاتی روی آنها صورت گرفت ۱۱

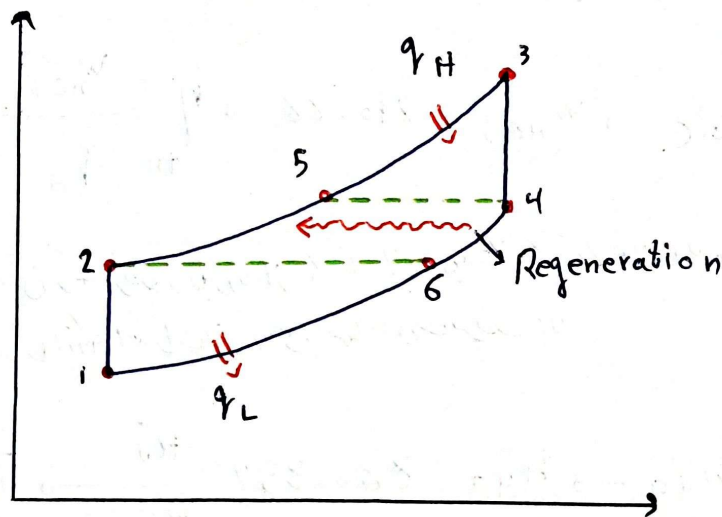
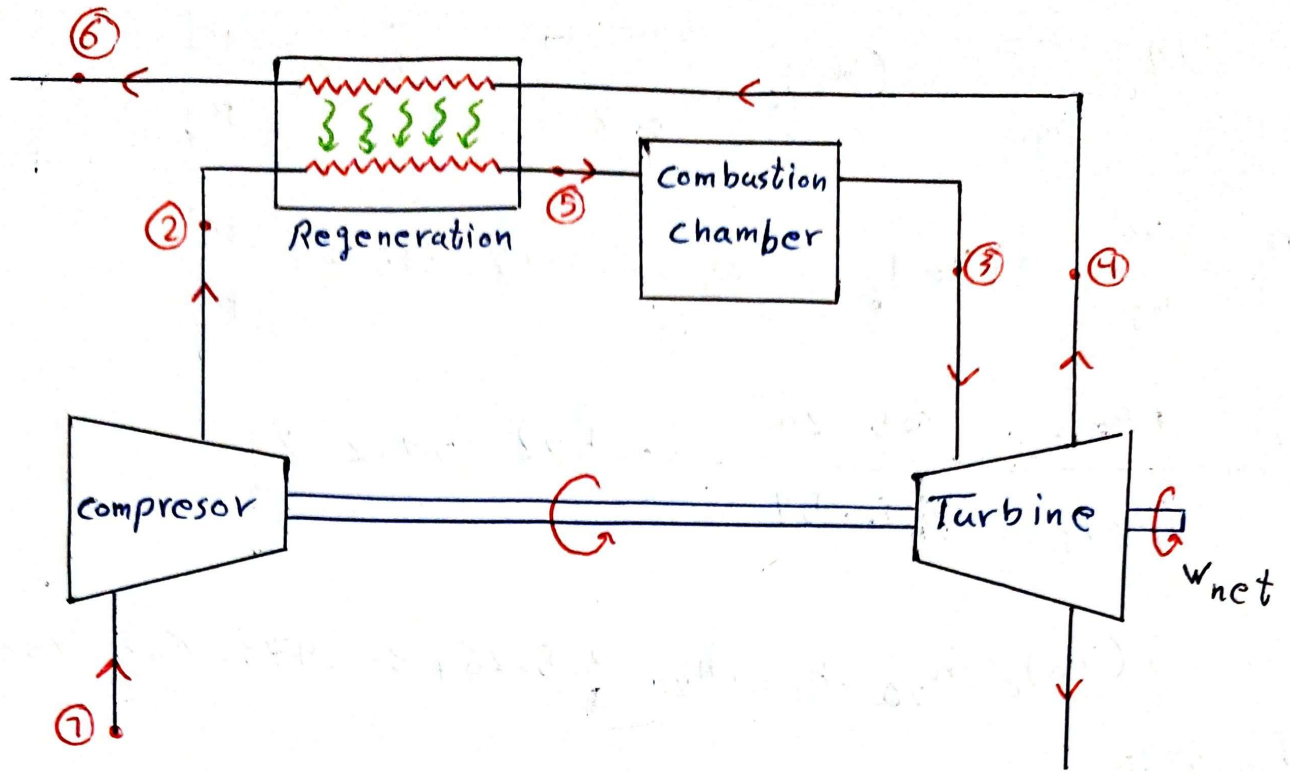
$$2) w_{aT} = h_3 - h_{4a} \rightarrow h_{4a} = 880.352 \frac{kJ}{kg} \rightarrow T_{4a} = 853 K$$

این مقدار از دمای هوای خروجی کمپرسور که $T_{2a} = 598 K$ و باشد بیشتر است و استفاده از بازایب برای کم کردن دما در مورد نیاز در ورودی پیشنه ها می شود ۱۲

- سیکل برای تون با بازایب یا Regeneration ۱۱

گاز های خروجی از توربین دارای دما و انرژی بالایی هستند که اگر بدون استفاده دوباره وارد محیط شوند علاوه بر آثار منفی زیست محیطی باعث هدر رفتن انرژی سیال و در نتیجه کاهش زیاد راندمان سیکل می شود، بنابراین ما با استفاده از مبدل های بازایب از این گرما برای گرم کردن گاز بعد از کمپرسور استفاده می کنیم،

در این صورت گرمای راه شده و گرفته شده از سیکل کاهش می یابد، کار خالص تولیدی بی تغییر می ماند زیرا اثرات ورودی و خروجی بدون تغییر می باشد پس مساحت داخدا گرفته بدون تغییر است و راندمان سیکل نیز افزایش می یابد، به نمودار و سیکل صفحه بعد وقت کنید ۱۱



همانطور که گفتیم در این سیکل گرمای رازده شده به سیکل یا q_H کاهش می یابد $(s_3 > s_2 < s_4 > s_3)$ ، گرمای گرفته شده از سیکل یا q_L کاهش می یابد $(s_6 > s_1 < s_4 > s_1)$ ، کار خالص تولیدی بدون تغییر و راندمان افزایش می یابد یعنی رازدهی \uparrow

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} \begin{cases} w_{net} : \text{ثابت} \\ q_H : \text{افزایش} \end{cases} \Rightarrow \eta_{th} \uparrow$$

نکته مهم این است که در صورتی کار خالص تولیدی ثابت می ماند که سیکل ایزه ال فرض شود، در غیر این صورت افت راندمان میابد باز یاب یا مدت تحصیل افت فشار به سیکل شده $(P_3 \downarrow)$ و کار خالص تولیدی کاهش می یابد \downarrow

ضریب کارایی میل به باز یاب به شرح زیر است:

$$\epsilon = \frac{(q_{\text{regen}})_{\text{act}}}{(q_{\text{regen}})_{\text{max}}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \xrightarrow[\text{ثابت: } p]{\text{سکیل بر}} \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2}$$

در صورتی که ضریب کارایی 100% باشد $T_5 = T_4$ و $T_6 = T_2$ و برعکس اما این ضریب کارایی در عمل کمتر از 85% است. مقادیر بالای ضریب کارایی موجب افزایش سطوح انتقال حرارت و در نتیجه افزایش هزینه و همچنین افزایش افت فشار می‌شود بنابراین مقادیر بالای این ضریب ϵ مقرون به صرفه نیستند.

- راندمان سیکل برای یون با باز یاب ایده آل $(\epsilon = 1)$:

در یک سیکل برای یون با باز یاب ایده آل خواهیم داشت:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

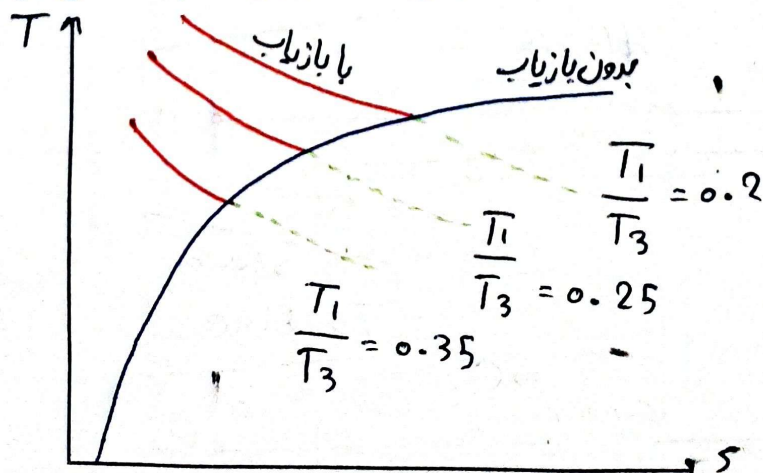
اثبات این رابطه به شرح زیر است:

$$\eta_{th} = \frac{w_{\text{net}}}{q_H} = \frac{w_T - w_C}{q_H} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{q_H} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{T_3 - T_4}$$

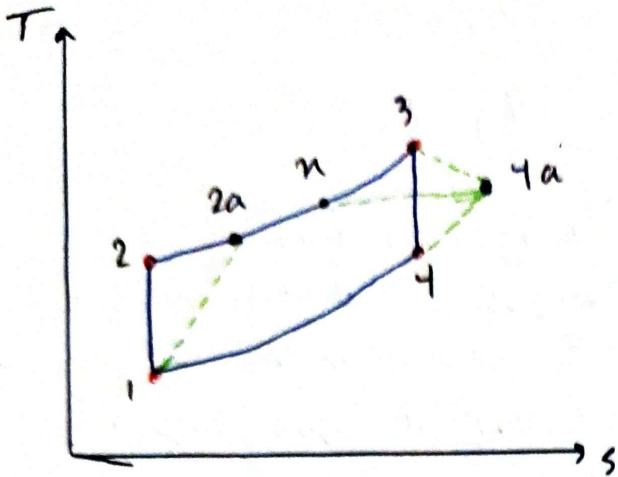
$$= 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_2 (1 - T_1/T_2)}{T_3 (1 - T_4/T_3)} ; \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{T_2}{T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \times \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

استفاده از میل های باز یاب در نسبت فشار های پایین و همچنین نسبت رمای حرارت به حرارت کم موثر است.



صیدل باز یاب رادی باز دهی می باشد زیرا انتقال حرارت صورت می گیرد.
 مثال 9) بازه حرارتی مثال 8 را در صورتی که رادی باز یاب با بازه 80% باشد محاسبه کنید.



$$\begin{cases} h_{2a} = 605.733 \\ h_3 = 1395.892 \\ h_{4a} = 880.352 \end{cases}$$

$$\eta_{reg} = \frac{h_3 - h_{2a}}{h_{4a} - h_{2a}} = 0.8 = \frac{h_n - 605.733}{550.352 - 605.733} \Rightarrow h_n = 825.43$$

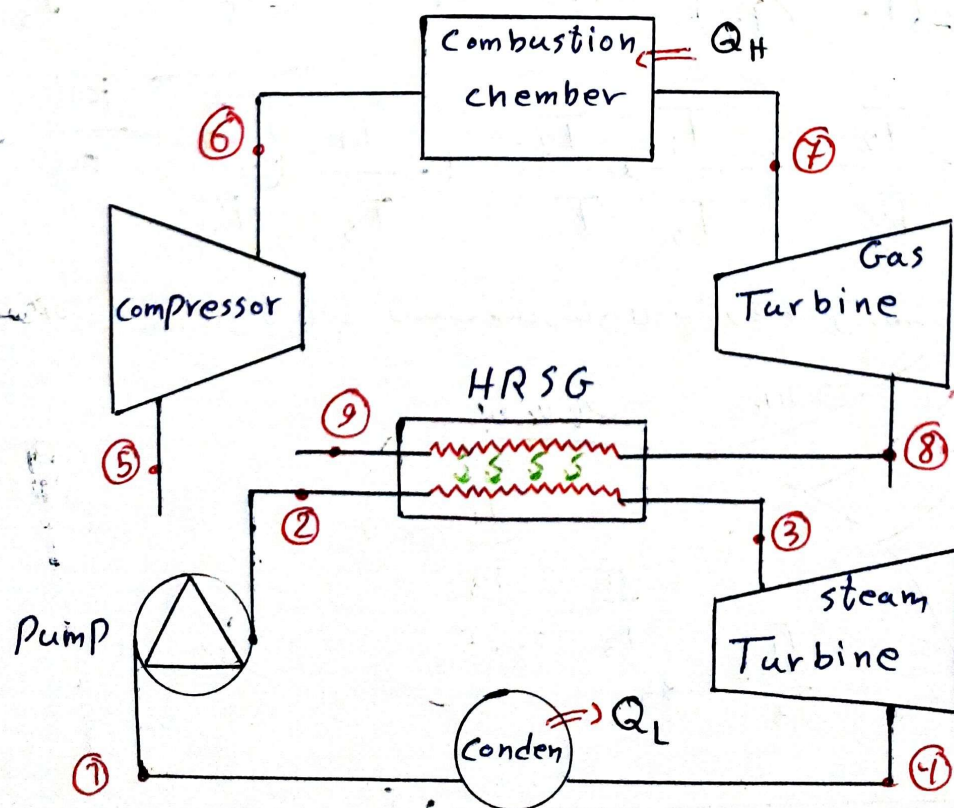
با اضافه کردن بازایا w_{net} تغییری نمی کند \Rightarrow

$$q_H = h_3 - h_n = 570.46 \quad \eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{210.26}{570.46}$$

با اضافه کردن بازایاب راندمان از 26.6% به 36.9% رسیده \Rightarrow

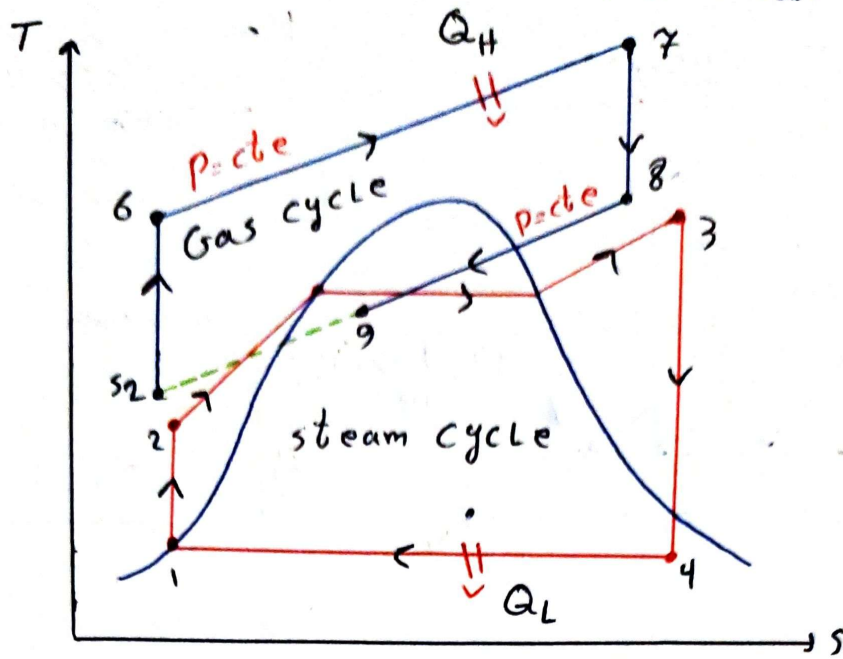
$$\eta_{th} = 0.369 = 36.9\%$$

این مقدار بیان می کند که چه مقدار حرارت از حرارت ورودی صرفه جویی شده است ۱۰



سکین ترکیبی گاز- بخار ::

همچنین به نمودار T-s زیر دقت کنید: ۱۰



ه‌ای هوای ورودی تقریباً گاز ($T_7 = 1150^\circ\text{C}$) و ه‌ای بخار ورودی تقریباً بخار ($T_3 = 600^\circ\text{C}$) و ه‌ای خروجی تقریباً گاز ($T_8 > 600^\circ\text{C}$)، ه‌ای خروجی تقریباً گاز در رادیاتور و انرژی بسیار بالایی است، در سیکل ترکیبی گاز-بخار از این انرژی بالا برای گرم کردن بخار ورودی تقریباً و به عنوان جایگزین یویلر استفاده می‌شود، به این صورت که بجای یویلر یک مبدل حرارتی استفاده می‌شود و به جای سوزاندن سوخت در یویلر از انرژی بالای ه‌ای خروجی از تقریباً گاز برای گرم کردن آب ورودی تقریباً بخار استفاده می‌شود.

از اهداف این سیکل جلوگیری از اتلاف انرژی خروجی از تقریباً گاز و آسیب‌های احتمالی به محیط زیست، افزایش راندمان و افزایش کار تولیدی می‌باشد، برخلاف استفاده از مبدل باز یاب که تنها راندمان را افزایش می‌دهد و از مصرف سوخت بیشتر جلوگیری می‌کند اما بر کار تولیدی اثری نداشت، مبدل‌های حرارتی استفاده شده در این سیکل ترکیبی مبدل‌ها بسیار بزرگی به نام **Heat Recovery steam generator** یا **HRS G** استفاده می‌شود، راندمان سیکل ترکیبی گاز-بخار از هر دو سیکل گازی و بخاری بیشتر است: ۱۱

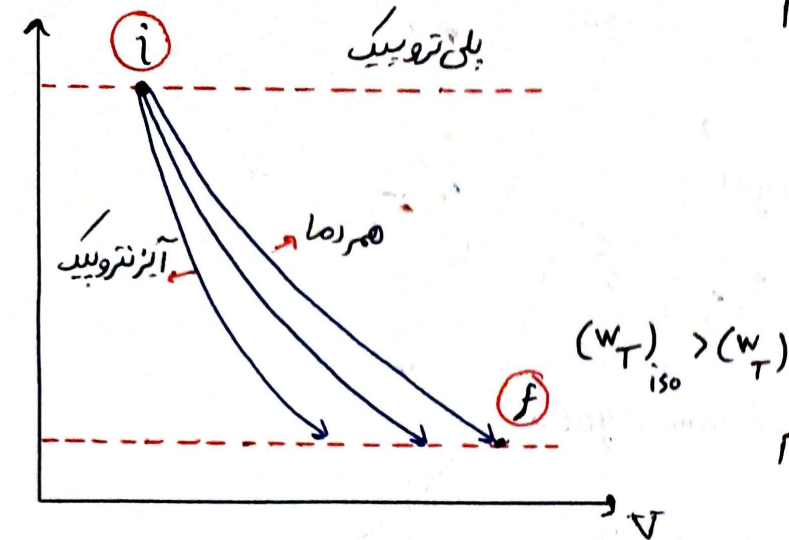
$$\eta_{cc} = \frac{\dot{w}_{net}}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{w}_{GT} + \dot{w}_{ST}}{\dot{Q}_H} = \frac{\eta_{GT} \dot{Q}_H + \eta_{ST} (\dot{Q}_H - \eta_{GT} \dot{Q}_H)}{\dot{Q}_H} \Rightarrow$$

$$\eta_{cc} = \eta_{GT} + \eta_{ST} - \eta_{ST} \eta_{GT} \Rightarrow \eta_{cc} = \eta_{ST} + \eta_{GT} (1 - \eta_{ST}) > \eta_{ST}$$

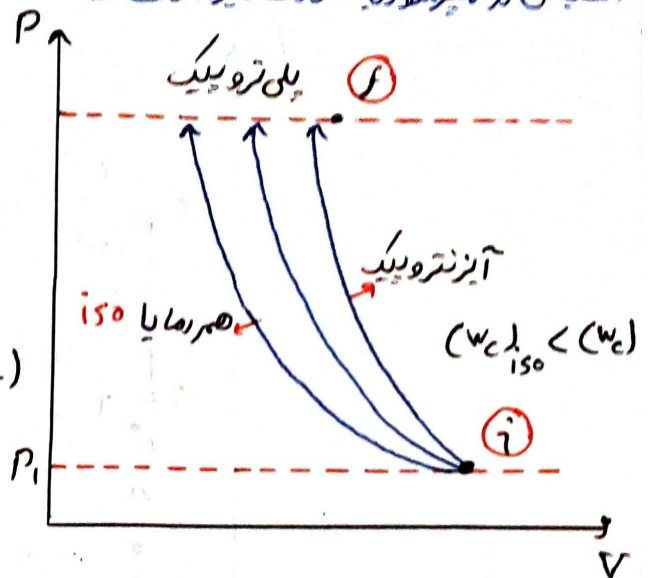
$$\eta_{cc} = \eta_{GT} + \eta_{ST} (1 - \eta_{GT}) > \eta_{GT}$$

اگر فرایند داخلی تقریباً و کمپرسور به جای فرایند آریا یا تیک و برگشت پذیر، فرایند ایزوترم و برگشت پذیر باشد کار تولید تقریباً بیشتر و کار مصرفی کمپرسور کمتر می‌شود و این به نفع ماست: ۱۲

انبساط در توربین نیز به صورت زیر است ۱۱۵

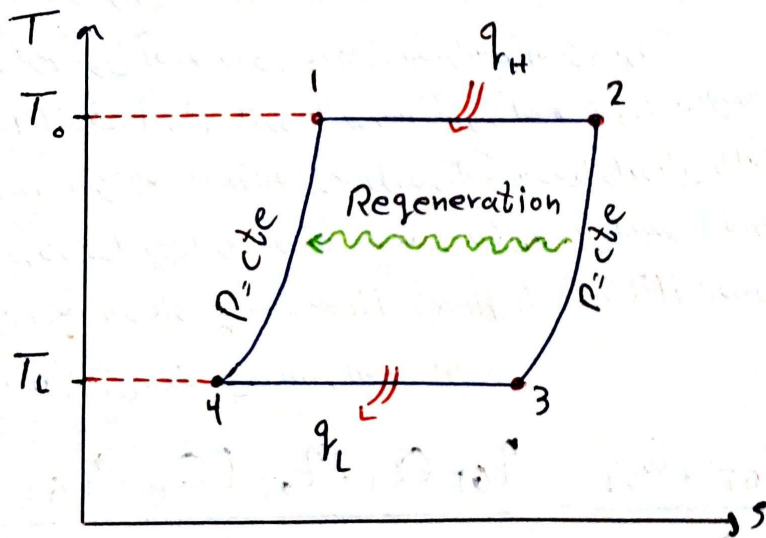


انقباض در کمپرسور به صورت زیر است ۱۱۵



سیکل اریکسون ۱۱۵

سیکل ایره آل کارند می باشد و ایره آل ما این است که به بازدهی سیکل کارنو نزدیک شویم. آقای جان اریکسون در سال ۱۸۹۷ سیکل اریکسون را معرفی کرد که از دو بازایاب و دو فرایند فشار ثابت استفاده می کند. در واقع در این سیکل یک بازایاب میان فرایند تراکم و انبساط وجود دارد. در این سیکل می توان به بازدهی سیکل کارنو نزدیک شد. سیکل اریکسون ۱۱۵



اگر فرایندهای تراکم ۲ → ۱ و انبساط ۴ → ۳ در سیکل برایتون به جای اینکه اریاباتیگ و برگشت پذیر باشند، هم رما و برگشت پذیر باشند سیکل اریکسون حاصل می شود. این سیکل به دلیل فضای بسیار زیاد کار بردی و قابل طرح ریزی نیست از این سیکل بیشتر در ماشین ها استفاده می شود. فرض کنید موتور ماشین بسیار بزرگ که دمای ۱۶۰۰°C را نیز تحمل کند و گنجایش آن ۸ هزار متر مکعب برسد ولی این ماشین کار بردی نمی باشد زیرا باید بدلتین موتور آن را از بدلتین USDT بسیار بزرگ که قیمت آن بسیار بالا خواهد بود.

در این سیکل در هر چهار فرایند انتقال حرارت صورت می گیرد. اگر با استفاده از مبدل بازایابی داخلی با سطوح بزرگ گرمای مورد نیاز فرایند (۴ → ۱) از گرمای تولیدی فرایند (۲ → ۳) تامین شود انتقال گرما با محیط تنها توسط فرایندهای هم رما ۲ → ۱، ۳ → ۴ انجام می شود. در این حالت ایره آل برگشت ناپذیری داخلی و خارجی ناخواسته از بین رفته.

در نتیجه راندمان سیکل برابر راندمان سیکل کارنوی می شود که بین همان دو دما کار می کند

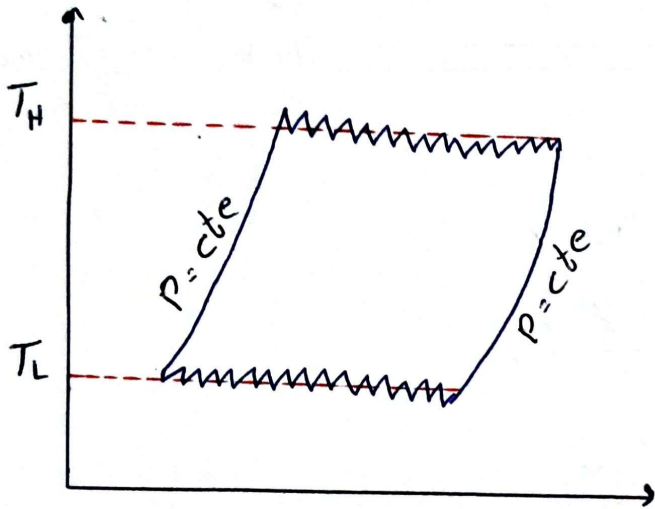
$$\eta_{Ericson} = \eta_{Corno} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

در عمل به دلیل سخت بودن فرایندهای دما ثابت انتقال در ارت از سیکل کارنو، سیکل اریکسون استفاده زیادی نمی شود اما این سیکل به ما ایده ای برای بهبود عملکرد سیکل برای تون توربین گازی می دهد

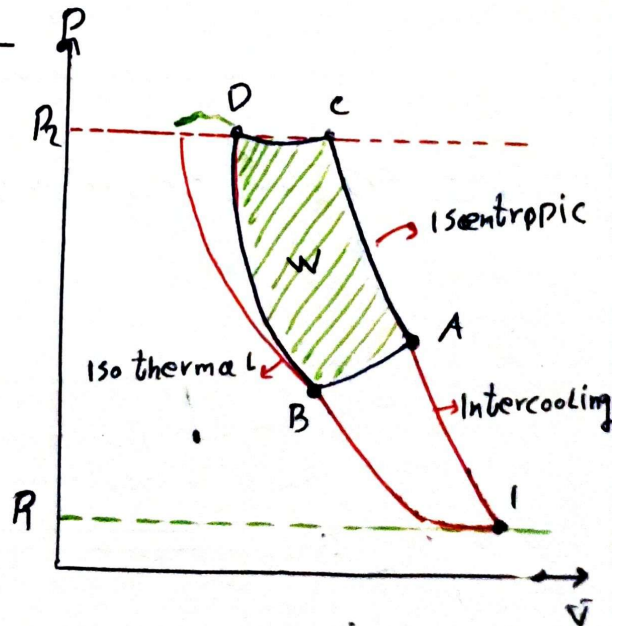
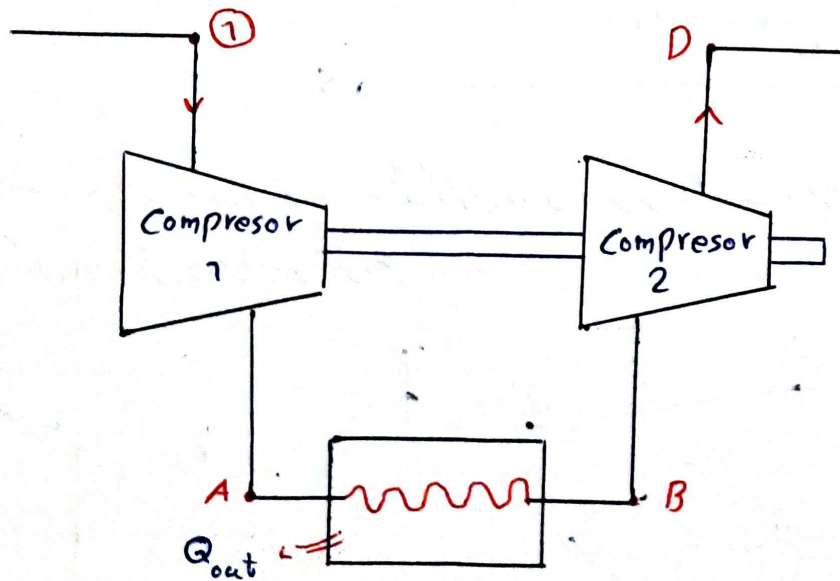
بهبود عملکرد سیکل برای تون با استفاده از روش های زیر باید فرایندهای تراکم کمپرسور و انبساط توربین به فرایندهای دما ثابت نزدیک شوند، با افزایش تعداد مراحل زیر سیکل به سیکل اریکسون میل می کند

(1) انبساط یا گرمایش مجدد در توربین

(2) تراکم چند مرحله ای با خنک کن میانی در کمپرسور



تراکم چند مرحله ای با خنک کن میانی در سیکل برای تون (کمپرسور) یا **Intercooling** به صورت زیر است:

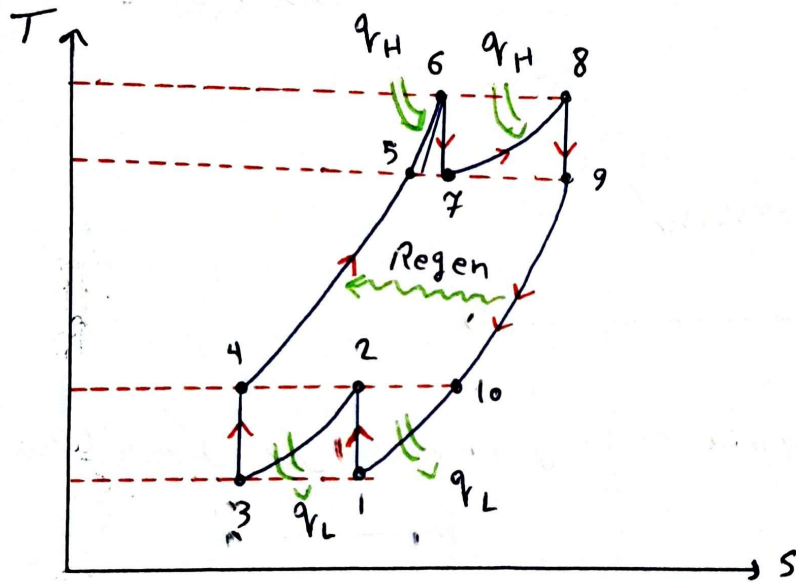
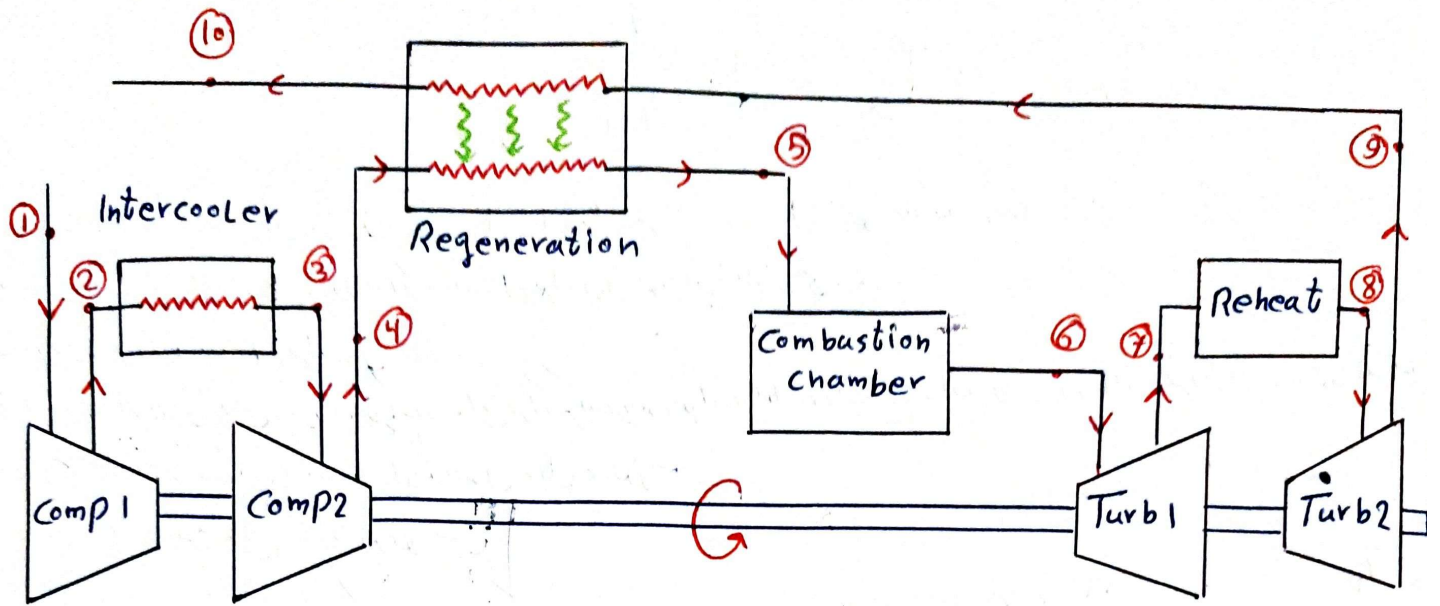


کار مفید اندازه W_{ABCD} صرفه جویی شده و منحنی به منحنی هم دما نزدیک می شود، اگر کار مفید کمپرسور منبسط

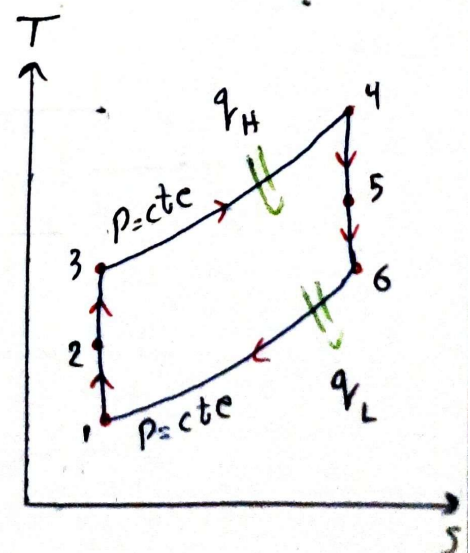
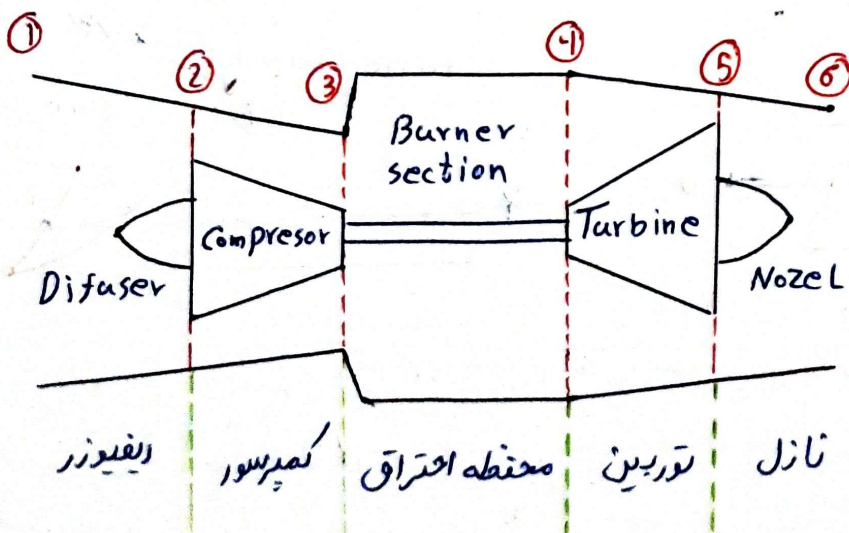
باشد فشار خنک کن میانی از رابطه زیر بدست می آید

$$P_A = \sqrt{P_1 P_2}$$

سیکل توربین گاز برای یکن با تراکم چند مرحله ای یا خنک کن میانی و گرمایش مجدد به صورت زیر است ۱۱



گرمایش مجدد توربین ها مشابه خنک کاری میان کمپرسور هاست و گرمایش مجدد موجب کاهش راندمان می شود ۱۲
 - سیکل استاندارد هوای رانش جیت ۱۳



در نقطه 3 → 2 → 1 تراکم آیزنتروپیک در دیفیوزر و کمپرسور است و همانطور که می دانیم دیفیوزر فشار را افزایش داده و سرعت را کاهش می دهد، در نقطه 6 → 5 → 4 انبساط آیزنتروپیک در توربین و نازل است و نازل فشار را کاهش داده و سرعت را افزایش می دهد، دیفیوزر و نازل برخلاف کمپرسور و توربین کاری مصرف و یا تولید نمی کنند بلکه فقط انرژی جنبشی را به فشار تبدیل می کنند، نکته بسیار مهم این است که کار تولیدی توربین برابر با کار مصرفی کمپرسور است زیرا در این سیکل هدف تولید انرژی الکتریکی نیست و به همین دلیل کمپرسوری قوی نصب شده تا تغییر مومنتم بیشتری ایجاد شود و نیروی بیشتران افزایش یابد، همچنین فرایند مصرفه احتراق فشار ثابت بوده و فرض می کنیم سیکل بردار است و سیال عامل هوا با C_p و C_v ثابت است، نیروی بیشترانش جیت ۱۰

$$f = (m v)_e - (m v)_i = m (v_e - v_i)$$

m به دلیل تزریق سوخت ثابت نیست اما به دلیل فرضیات سیکل آن را ثابت می گیریم، همچنین توان و راندمان بیشترانش به فرح زیر هستند ۱۱

$$\dot{w}_p = F \cdot V_a = m (v_e - v_i) V_a \quad \text{with } V_a = v_i$$

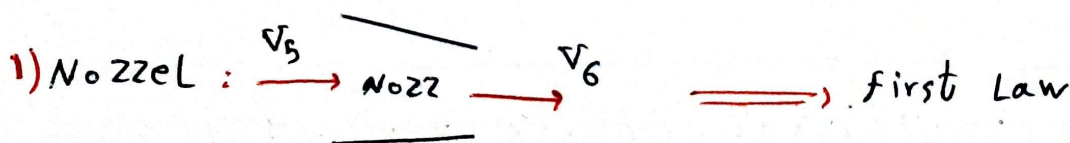
سرعت ورودی هوا برابر سرعت هواپیما

$$\eta_p = \frac{\text{Pr. Pulsive Power}}{\text{Energy Input}} = \frac{\dot{w}_p}{Q_H}$$

مثال ۱۰) هوا در فشار 80 kPa و در دمای 260 K و سرعت 1000 km/h یا 278 m/s وارد موتور جیت ایره آل می شود، نسبت فشار کمپرسور 8 به 1 می باشد و دمای ورودی توربین 1200 K و فشار خروجی نازل 80 kPa است، فشار در همه حالت ها و سرعت خروجی نازل را محاسبه کنید؟

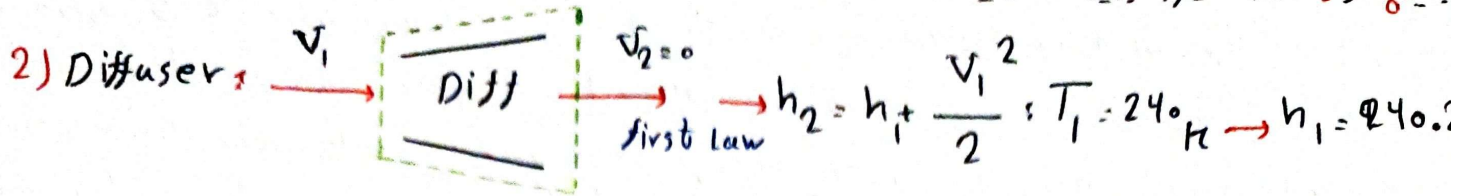
فرضیات حل: سیکل ایره آل +
- از انرژی جنبشی تمام نقاط ورودی و خروجی صرف نظر می شود.
- از تغییرات انرژی پتانسیل صرف نظر می شود.

همچنین معیار نازل و دیفیوزر را محاسبه می کنیم ۱۱



$$s_{f_6} + h_5 + \frac{v_5^2}{2} + q_{z_5} = h_6 + \frac{v_6^2}{2} + q_{z_6} + s_{w_6} \quad v_6 = \sqrt{2(h_5 - h_6)}$$

باید h_5 و h_6 را بدانیم بنابراین از دیتایز شروع کرده و به ترتیب جلوی روئیر !!



$P_{r1} = 0.51088 \rightarrow h_2 = 240 \cdot 267 + \frac{(278)^2}{2 \times 1000} = 278.9$

=> isentropic: Diff: $\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \Rightarrow P_2 = 134.7 \text{ kPa}$

3) Compressor: $\frac{P_3}{P_2} = 8 \rightarrow P_3 = 1077.6 \text{ kPa}$

=> isentropic: comp: $\frac{P_3}{P_2} = \frac{P_{r3}}{P_{r2}} \rightarrow P_{r3} = 6.8856 \xrightarrow{A7} h_3 = 505.500$

4) combustion chamber: $P_4 = P_3 = 1077.6 \rightarrow T_4 = 1200 \text{ K} \xrightarrow{A7}$

$h_4 = 1277.805 \rightarrow P_{r4} = 191.1736 \text{ kPa}$

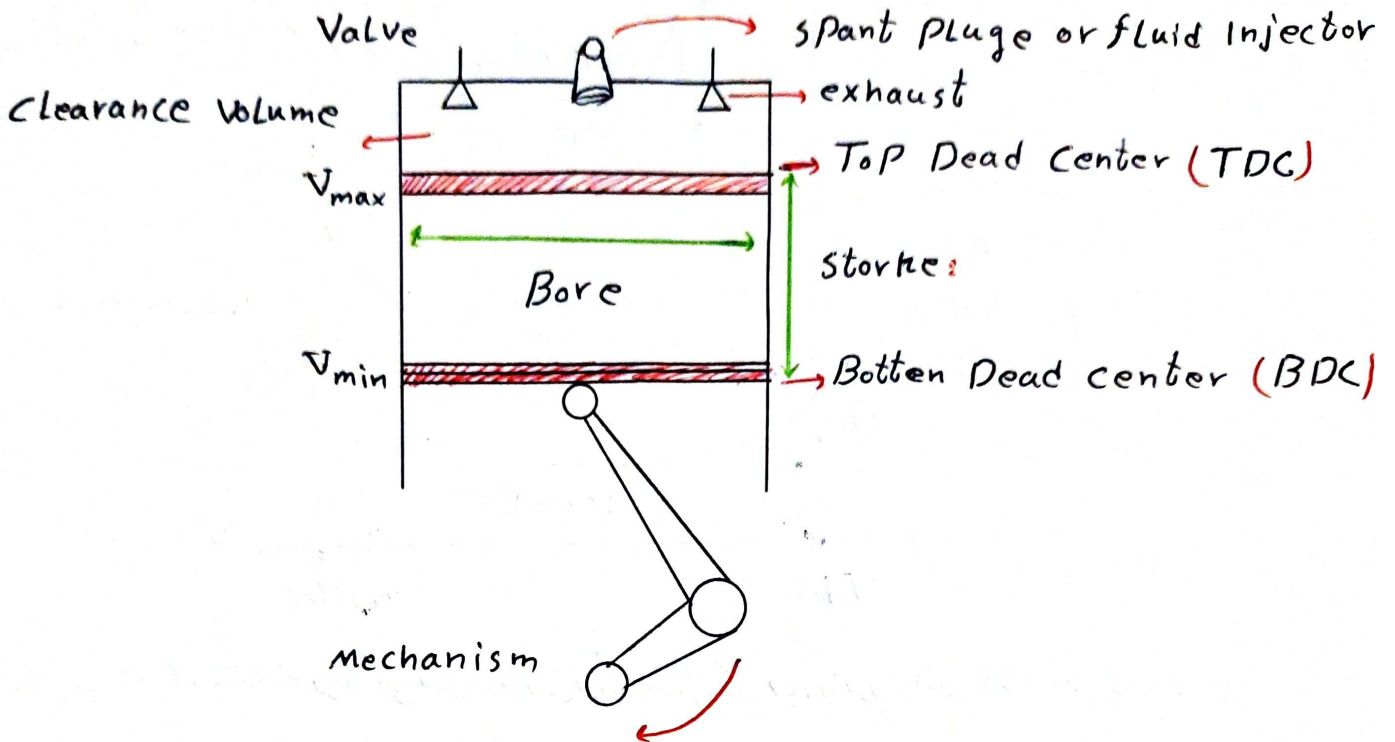
$w_T = w_C \rightarrow h_4 - h_5 = h_3 - h_2 \rightarrow h_5 = 1051.2 \xrightarrow{A7} P_{r5} = 9336.35$

=> Isentropic Turbine: $\frac{P_5}{P_4} = \frac{P_{r5}}{P_{r4}} \rightarrow P_5 = P_4 \cdot \frac{P_{r5}}{P_{r4}} = 526.2 \text{ kPa}$

=> Isentropic Nozzle: $\frac{P_6}{P_5} = \frac{P_{r6}}{P_{r5}} \rightarrow P_{r6} = 14.194 \xrightarrow{A7} h_6 = 621.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$v_6 = \sqrt{2(h_5 - h_6)} = \sqrt{2(1051.2 - 621.18) \times 1000} = 927.38 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

- موتورهای احتراق داخلی: سیکل یک موتور احتراق داخلی به این صورت است که ابتدا گاز وارد سیلندر پیستون شده و از نقطه یک به نقطه دو می رسد سپس مخلوط هواگاز را فشرده می کند و برقی می زند. احتراق صورت گرفته و به سمت پایین می رود و بار تولید می کند. در مرحله بعد سیلندر پیستون به سمت بالا حرکت کرده و گازهای سوخته شده را خارج می کند.



موتورهای احتراق داخلی به دو دسته چرخه ای مانند موتور بنزینی (تولید توان تا 225 kw) و احتراق تراکمی مانند موتور دیزل تقسیم می شوند.

حجم جبارو شده: $V = S \times A_p$ نسبت تراکم: $r_v = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}}$

فشار متوسط موثر در موتور احتراق داخلی، فشار تئوری مقدار ثابتی است که اگر در مرحله انبساط پیستون وارد شود کار خالصی معادل کار واقعی سیکل تولید می کند.

$$M_{EP} = \frac{w_{net}}{V_{max} - V_{min}}$$

- مراحل طی شده در موتور چهار زمانه: مراحل طی شده به شرح زیر است که در صفحه بعدی می توانید نمودار آن را مشاهده کنید.

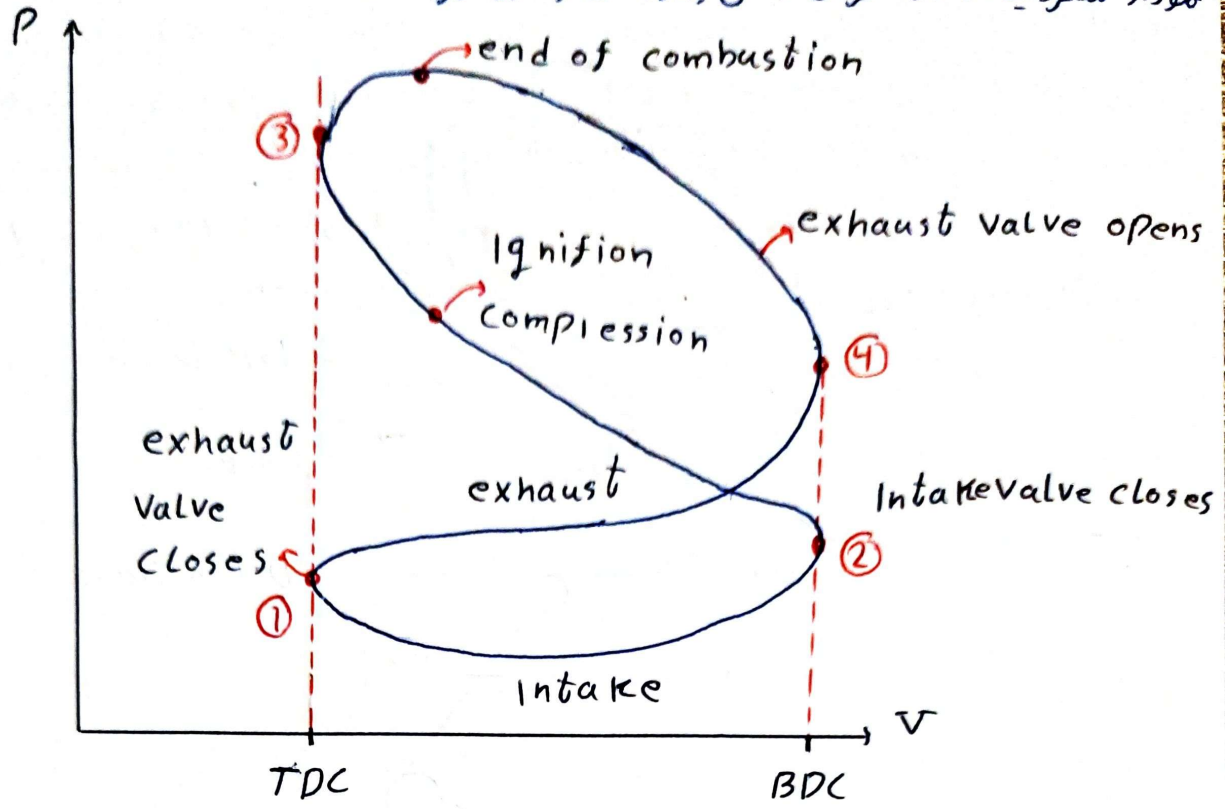
تراکم 2 → 3

مکش 1 → 2

تفصیح 4 → 1

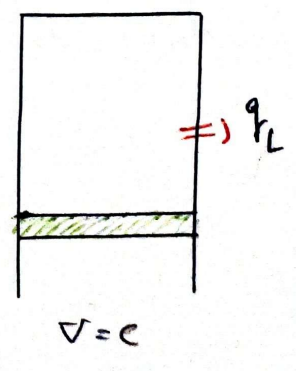
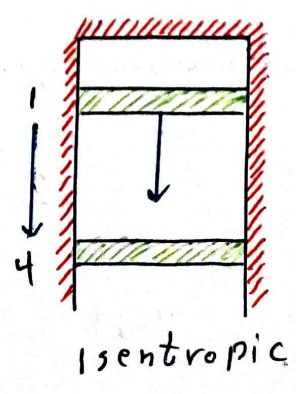
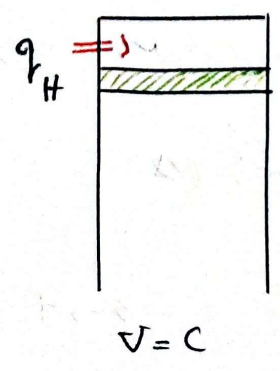
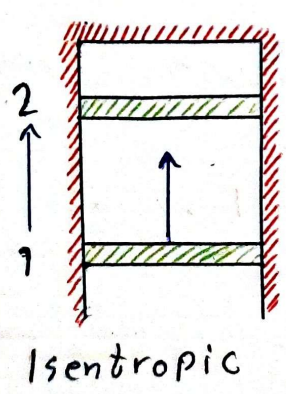
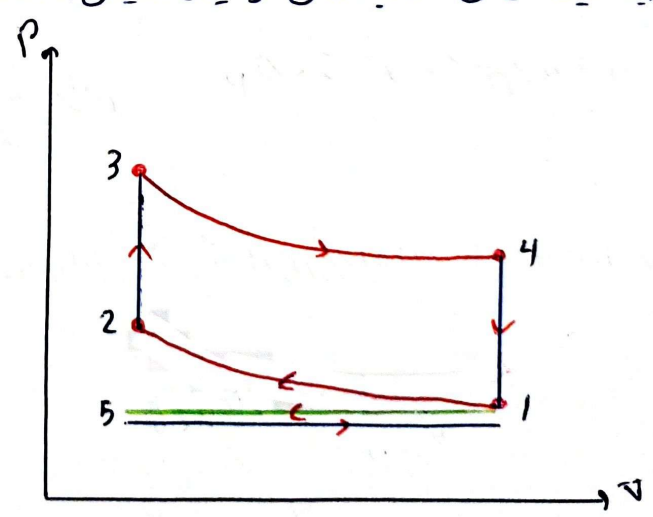
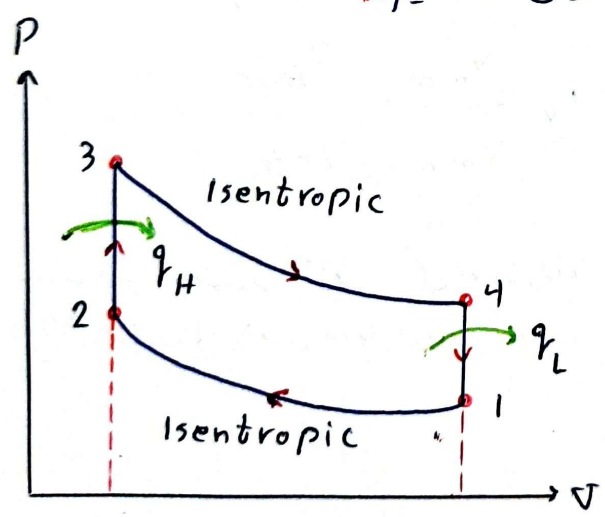
انبساط یا تولید توان 3 → 4

موتور در عملکرد یک موتور احتراق داخلی چهار زمانه به شرح زیر است:

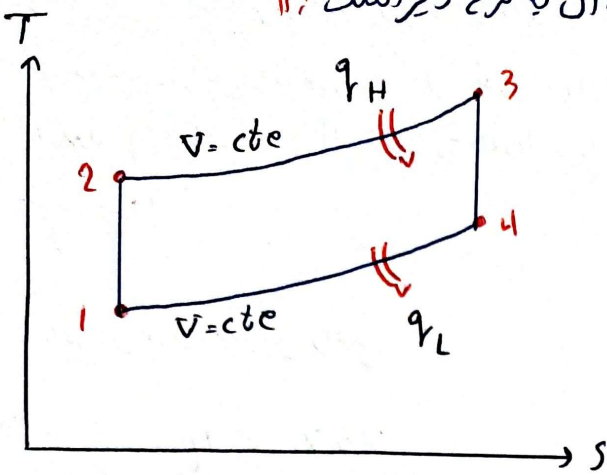


نقطه مهمی است که احتراق کمی قبل از پایان تراکم آغاز و کمی بعد از شروع انبساط پایان می یابد.
 - سیکل اتو یا Otto cycle:

سیکل اتو یک سیکل ایده آل برای موتور دیزل می باشد و همچنین سیکل ایده آلی برای موتورهای احتراق بیرقه ای است برای پی ریزی سیکل اتو با اجهال فرضیات سیکل استاندارد توانی هوا داریم:



در سیکل اتو فرض می‌کنیم که فقط هوا فشرده می‌شود و پیرخه آن به شرح زیر است:



1 → 2 تراکم آیزنتروپیک - تراکم

2 → 3 گرمایش حجم ثابت - احتراق

3 → 4 انبساط آیزنتروپیک - انبساط

4 → 1 دفع گرمای حجم ثابت - تخلیه و مکش

بنابراین سیکل اتو به مجموع فرایندهای اقلادق می‌شود (فرایندهای ایره ال) که مبنای کار موتورهای احتراق داخلی هستند در اکثر وسایل نقلیه همومی از این سیکل استفاده می‌شود. در این سیکل گاز به عنوان سیال کاری در نظر گرفته می‌شود. در سیکل برابری دو فرایند فشار ثابت و دو فرایند آیزنتروپیک را اشتباه نگذارید. اگر در همان سیکل به جای دو فرایند فشار ثابت از دو فرایند حجم ثابت استفاده شود سیکل اتو بدست می‌آید.

در سیکل اتو ابتدا مخلوط هوا و سوخت به شکل فشار ثابت به سیلندر تزریق می‌شود (این فرایند را مکش نیز نامند) پس از آن گاز به صورت آیزنتروپیک فشرده شده و زمانی که افزایش می‌یابد، در مرحله بعد زمانی که پیستون به بالاترین نقطه (نقطه مرگ یا لا) می‌رسد احتراق رخ داده و متعجب به پایین آمدن پیستون و در نتیجه تولید کار می‌شود. در مرحله آخر و فشار گاز به صورت آیزنتروپیک کاهش می‌یابد و دوباره مخلوط سوخت و هوا مکیده شده و پیرخه تکرار می‌گردد. روابط مربوطه به شرح زیر است:

$$q_H = u_3 - u_2 = C_v (T_3 - T_2) \quad , \quad q_L = u_4 - u_1 = C_v (T_4 - T_1)$$

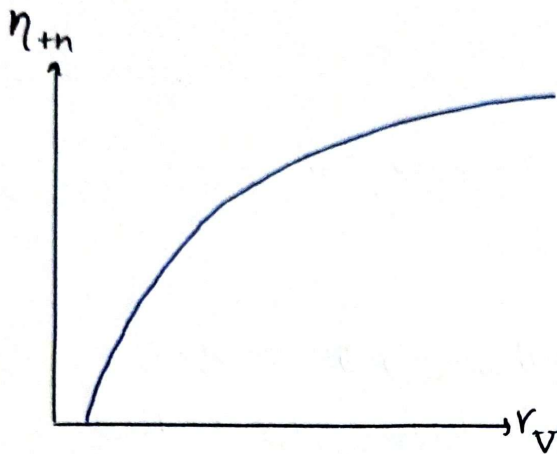
$$\eta_{th,otto} = \frac{w_{net}}{q_H} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_v (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 (T_4/T_1 - 1)}{T_2 (T_3/T_2 - 1)}$$

با اعمال شرط $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_4}{T_3} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$

$$\eta_{th,otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r_v^{\kappa-1}} \quad , \quad r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3} \quad ; \quad \text{نسبت تراکم}$$

- اثر افزایش نسبت تراکم بر راندمان سیکل اتو //

با افزایش نسبت تراکم راندمان سیکل افزایش می یابد اما نمی توان γ_v را تا هر اندازه ای افزایش داد زیرا ممکن است با پدیده **knocking** (ا انفجار مخلوط هوا و سوخت قبل از رسیدن به نقطه مرگ بالا) احتراق از اختیار ما خارج بشود //

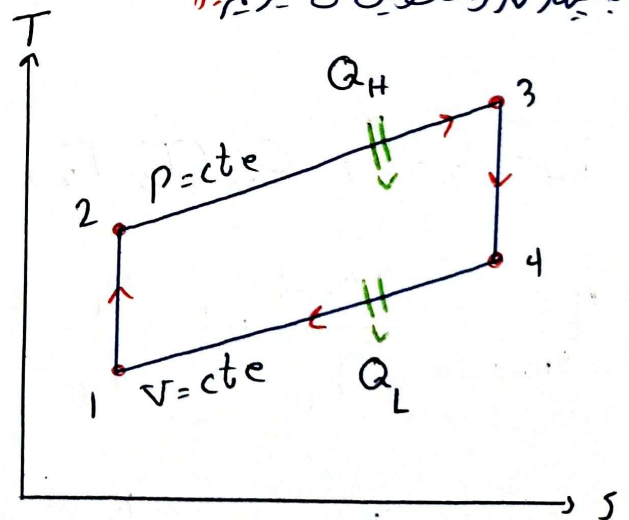
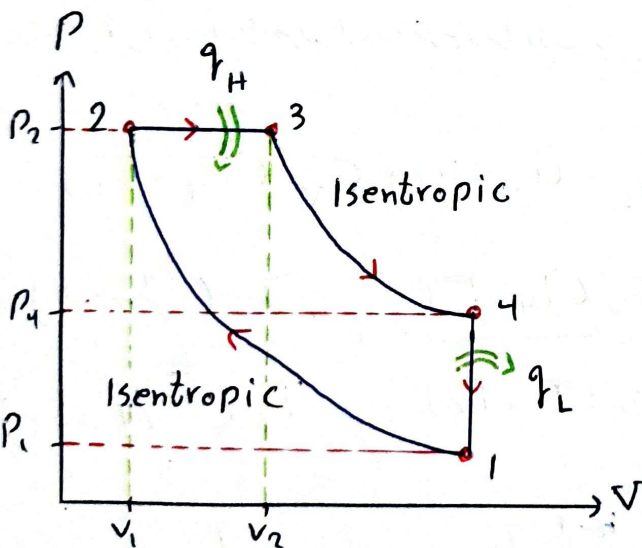


راندمان موتور بنزینی واقعی

$$25\% < \eta_{th,otto} < 30\%$$

- سیکل استاندارد دیزل //

سیکل موتورهای دیزل که در موتورهای گازوئیلی بسیار مورد استفاده قرار می گیرد، ابتدا در مرحله اول در نقطه یک به دو هوا را فشرده می کنیم و از آنجا که تراکم نسبت به تراکم در این سیکل بالاست و همچنین مانند سیکل اتو نیست که مخلوط هوا و گاز را فشرده کرده و سپس جرقه بزنیم بلکه در این سیکل فقط مخلوط هوا را فشرده کرده تا در نقطه دو بر اثر فشردگی بالا دیگر نیازی به جرقه برای احتراق نیست و در نقطه دو مخلوط فشرده شده شروع به سوختن می کند و در نقطه سه به چهار کار را تبدیل می گیریم //



بنابراین سیکل استاندارد هوای دیزل مشابه سیکل اتو می باشد با این تفاوت که فرایند گرمادهی به جای حجم ثابت در فشار ثابت رخ می دهد، بقیه فرایندها مشابه اتو است .

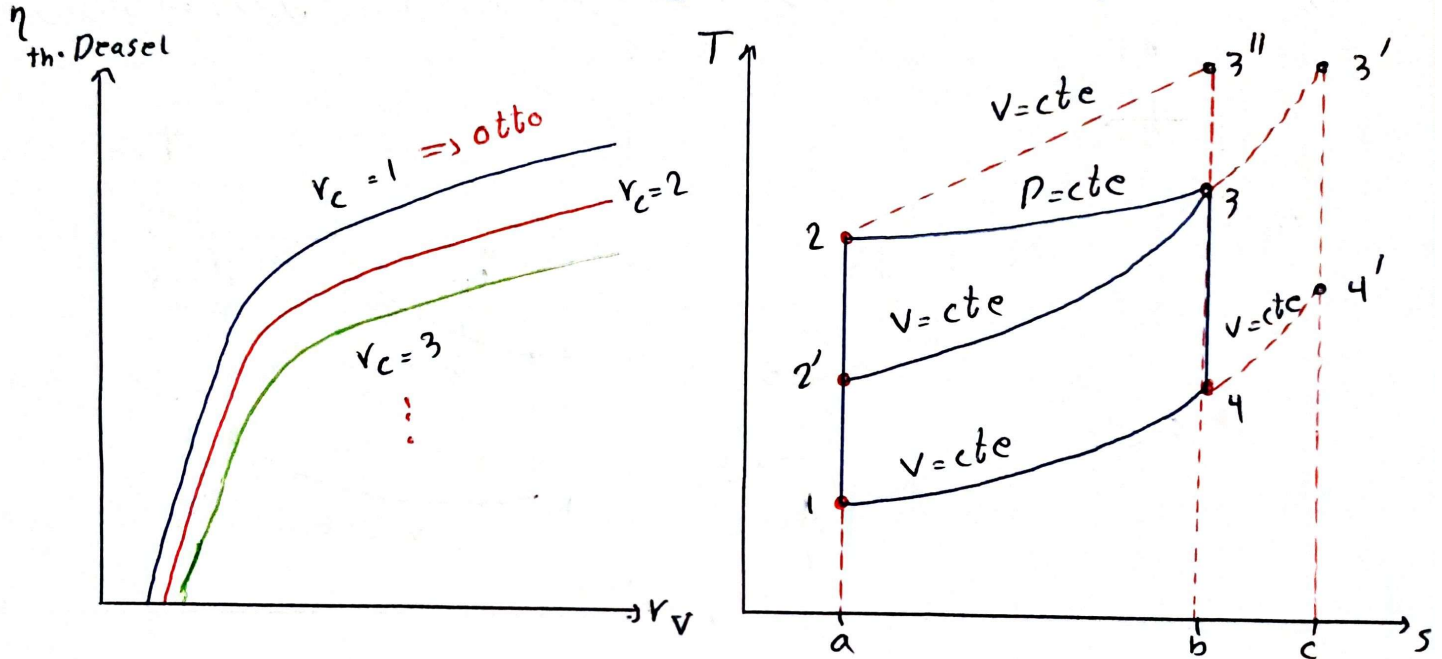
$$q_H = w_{bount} + (u_3 - u_2) = p(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_L = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1) \quad \text{و} \quad r_c = \frac{v_3}{v_2}$$

نسبت برم سیلندر بعد از احتراق به حجم سیلندر قبل از احتراق: نسبت جبرایی

$$\eta_{th-Diesel} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \left(\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right)$$

اگر نسبت جریبی یا **separation Ratio** به یک میل کند سیکل دیزل به سیکل اتومبیل می‌گردد و راندمان آن ماکزیمم می‌شود، عبارت داخل پرانتز مشابهت است بنابراین بد نظر می‌رسد که راندمان سیکل اتوازی دیزل بیشتر است ولی نسبت تراکم سیکل اتوازی کمتر از سیکل دیزل می‌باشد. **۱۱**



راندمان سیکل دیزل بیشتر از سیکل اتوازی و برعکس سیکل اتوازی بیشتر از سیکل دیزل می‌باشد. **۱۲**

$$(r_v)_{otto} = \frac{v_{2'}}{v_1} < \frac{v_2}{v_1} = (r_v)_{Diesel}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\bar{T}_L}{\bar{T}_H} \Rightarrow \begin{cases} (\bar{T}_H)_o < (\bar{T}_H)_D \\ (\bar{T}_L)_o = (\bar{T}_L)_D \end{cases} \Rightarrow (\eta_{th})_{otto} < (\eta_{th})_{Diesel}$$

25% - 30% 35% - 40%

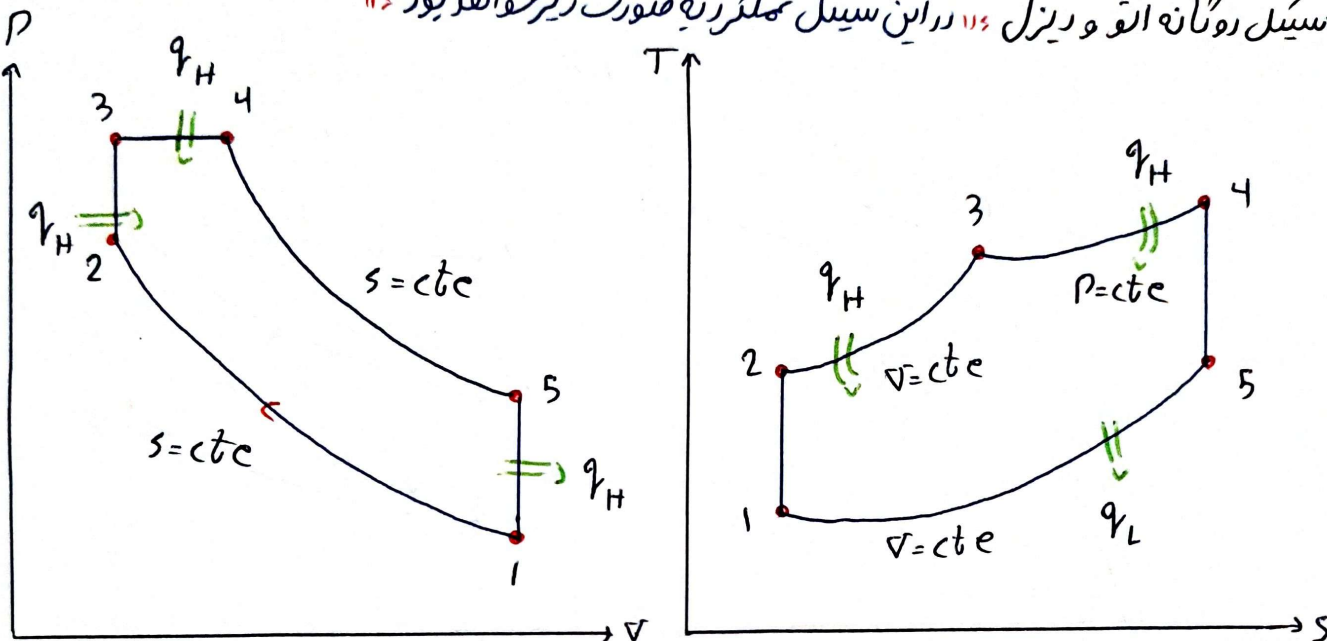
خطوط فشار ثابت $2 \rightarrow 3'$ و خطوط حجم ثابت $1 \rightarrow 4'$ همگرا هستند، با افزایش رمای ماکزیمم سیکل راندمان سیکل دیزل کاهش می‌یابد زیرا افزایش رمای \bar{T}_L بیشتر از افزایش رمای \bar{T}_H است، در صورت دیزل هوای وارد شده سوخت ندارد و هوا کاملاً فشرده شده سپس سوخت به آن تزریق شده و احتراق رخ می‌دهد، گرایی نیز بابت رخ دادن پدیده **knocking** نداریم. **۱۰**

نسبت تراکم در این سیکل می تواند یا بیشتر و تا 24 نیز برسد انگاه رمای هوای داخل سیلندر بسیار بالا می رود و در نتیجه خواهیم داشت ۱۱۰

(1) سوخت های کمتر یا بیشتر شده مثل گازوئیل را می توان استفاده کرد ۱۱۰

(2) موتور حجیم و سنگین خواهد شد ۱۱۰

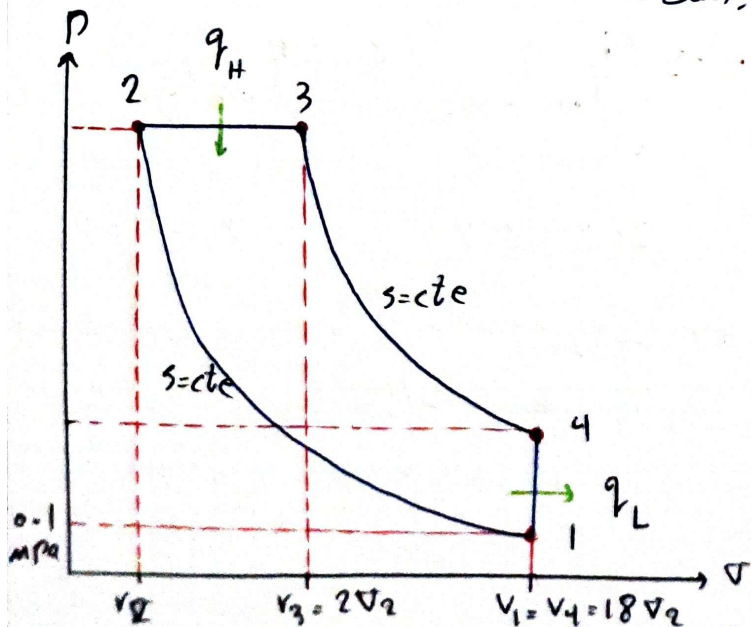
= سیکل روگانه اتو و دیزل ۱۱۰ در این سیکل همگرمی صورت زیر خواهد بود ۱۱۰



$$q_H = (q_H)_{v=c} + (q_H)_{p=c} = (u_3 - u_2) + (h_4 - h_3)$$

$$q_H = C_v (T_3 - T_2) + C_p (T_4 - T_3) \quad ; \quad \text{Dual cycle}$$

مثال ۱۱) در یک چرخه استاندارد هوای دیزل در شروع فرایند تراکم در 300°K و فشار 0.1 mpa می باشد نسبت تراکم برابر با 18 و نسبت جابجایی برابر 2 می باشد مطلوب است ۱۱۰



الف) محاسبه اما و فشار هوا در پایان هر فرایند ۱۱۰

$$T_2, T_3, T_4 = ? \quad P_2, P_3, P_4 = ?$$

ب) محاسبه بازده حرارتی چرخه ۱۱۰

ج) فشار متوسط و موثر محاسبه کرد ۱۱۰

برای حل این مثال فرضیات زیر را اعمال می‌کنیم:

(1) هوای داخل سیلندر - بیستون در یک سیستم بسته عمل می‌کند.

(2) فرایندهای تراکم و انبساط اریبا باتیک هستند.

(3) تمام فرایندها برگشت پذیر داخلی می‌باشند.

(4) هوا سیکل گاز ایده آل است.

(5) از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می‌شود.

الف) محاسبه دما و فشار هوا در حالت‌های مختلف.

$$T_1 = 300 \text{ K} \xrightarrow{A.7} u_1 = 214.364 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad v_{r1} = 179.491$$

- فرایند آیزنتروپیک 1-2:

$$v_{r2} = 179.491 \times \frac{1}{18} = 9.972 \xrightarrow{A.7} T_2 = 898.3 \text{ K}, \quad h_2 = 930.98 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{فشار ایده آل: } \frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_1 v_1}{T_1} \rightarrow P_2 = P_1 \frac{v_1}{v_2} \frac{T_2}{T_1} = 0.1 (18) \left(\frac{898.3}{300} \right), \quad P_2 = 5.39 \text{ MPa}$$

- فرایند فشار ثابت 2-3:

$$\frac{P_3 v_3}{T_3} = \frac{P_2 v_2}{T_2} \rightarrow T_3 = T_2 \frac{v_3}{v_2} = 898.3 (2) \rightarrow T_3 = 1796.6 \text{ K}$$

$$P_3 = P_2 \rightarrow P_3 = 5.39 \text{ MPa}$$

$$T_3 = 1796.6 \text{ K} \xrightarrow{A.7} h_3 = 1998.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad v_{r3} = 1.15$$

- فرایند آیزنتروپیک 3-4:

$$\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{v_4}{v_3} = \frac{v_1}{v_3} = \frac{v_1}{v_2} \times \frac{v_2}{v_3} = 18 \cdot \frac{1}{2} = 9 \rightarrow v_{r4} = 9 v_{r3} = 10.35$$

$$v_{r4} = 10.35 \xrightarrow{A.7} T_4 = 887.8 \text{ K}, \quad u_4 = 664.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- فرایند حجم ثابت 1-4 گاز ایده آل: //

$$\frac{P_4 V_4}{T_4} = \frac{P_1 V_1}{T_1} \rightarrow P_4 = P_1 \frac{T_4}{T_1} = 0.1 \left(\frac{887.8}{300} \right) \rightarrow P_4 = 0.296 \text{ MPa}$$

(ب) مناسبه گاز: //

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H}$$

- فرایند حجم ثابت 4-1: //

$$q_L = u_4 - u_1 = 664.7 - 214.364 = 450.336 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- فرایندهای فشار ثابت 2-3: //

$$q_H = h_3 - h_2 = 1998.8 - 930.98 = 1067.82 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{450.336}{1067.82} \rightarrow \eta_{th} = 0.578 = 57.8 \%$$

= مناسبه فشار متوسط و موثر: //

$$MEP = \frac{w_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{w_{net}}{V_1 - V_2} = \frac{w_{net}}{V_1 \left(1 - \frac{1}{r_2} \right)}$$

$$w_{net} = q_H - q_L = 1067.82 - 450.336 = 617.484 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_1 V_1 = RT_1 \rightarrow V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0.287 (300 \text{ K})}{0.1 \times 10^3} = 0.861 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$mep = \frac{617.484}{0.861 \left(1 - \frac{1}{18} \right)} \rightarrow mep = 760 \text{ kPa} = 0.76 \text{ MPa}$$

در حل این مثال از جدول هوا A.7 استفاده شده بدین ترتیب تغییرات گرما و ویژه هوا با اماره نظر فرستاده

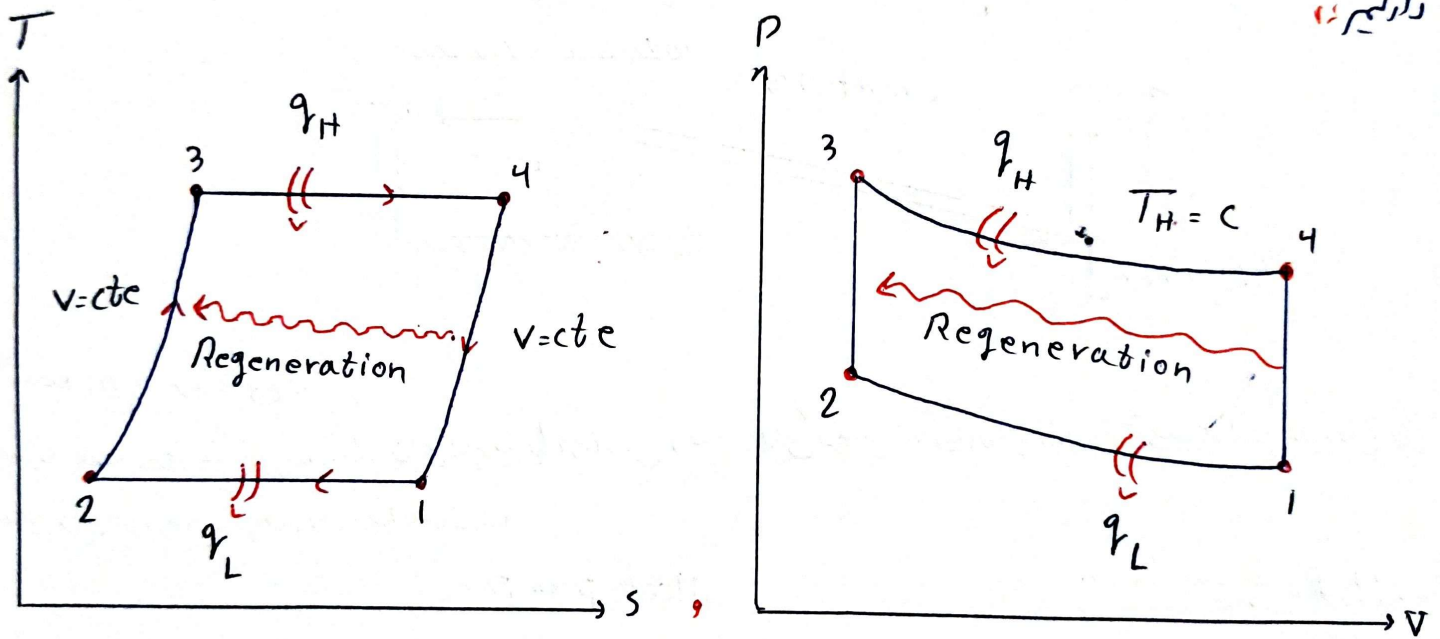
سیکل استرلینگ یا *stirling cycle* «

اگر در سیکل اتو فرایندهای تراکم و انبساط آیزنتروپیک را با فرایندهای ایزانتایب و برگشت پذیر جایگزین کنیم به سیکل استرلینگ خواهیم رسید مانند سیکل اریکسون و برایتون « در این سیکل در هر چهار فرایند انتقال حرارت صورت می گیرد مانند سیکل اریکسون اگر از میل باز یاب داخلی استفاده شود در حالت ایده آل برگشت ناپذیری داخلی و خارجی کاملاً از بین می رود « پس راندمان آن با سیکل کارنو برابر می شود «

$$\eta_{th-stirling} = \eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

عیب سیکل استرلینگ کم یون *Medium-effective pressure* یا *MEP* است پس کار تولیدی یا w_{net} آن کم است و اگر بخواهیم کار زیادی تولید شود باید اختلاف حجم بسیار زیادی داشته باشیم یعنی

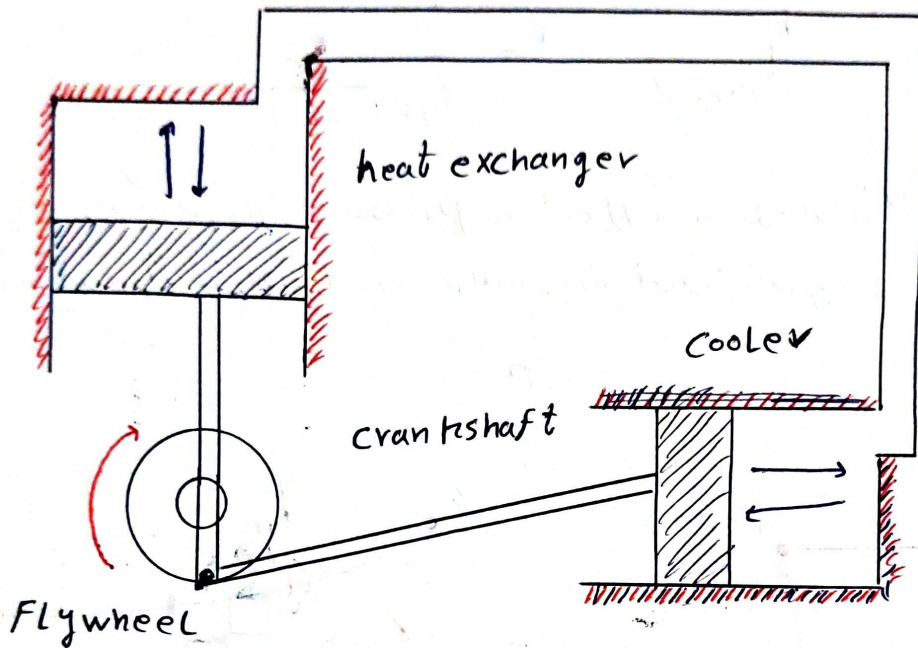
در رسم «



از این سیکل در موتورهای استرلینگ استفاده می شود « در سیکل استرلینگ داریم «

- 1) انبساط ایزانتایب: در مرحله اول فضای سیلندر به صورت ایزانتایب منبسط می شود « همچنین گاز در این فرایند به صورت ایزانتایب از منبسطی انرژی دریافت می کند «
- 2) کاهش فشار در حجم ثابت « در این مرحله گاز از باز یاب عبور کرده و در فرایندی حجم ثابت فشار آن کم می شود «
- 3) تراکم ایزانتایب « در این مرحله گاز در دمای ثابت حرارت از دست می دهد « جهت ثابت ماندن دما حجم گاز نیز باید بایستی کاهش یابد «
- 4) گرفتن حرارت در حجم ثابت « در این مرحله نیز همانند مرحله دو گاز از میل باز یاب عبور کرده و بخشی از حرارت منتقل شده در مرحله دو را جذب می کند « بنابراین در این مرحله فشار و دمای گاز در حجم ثابت زیاد می شود «

موتور استرلینگ همانند بقده موتورهای گرمایی انرژی مکانیکی را به انرژی حرارتی تبدیل می کند. دلیل اصلی - اختراع این موتور جاگزینی آن با موتورهای بخار بود زیرا به دلیل فشار یا در درج بخار احتمال انفجار آنها وجود داشت. ویژگی منحصر به فرد این موتور ثابت بودن مقدار سیال کاری در سیکل آن است. گاز در بخش سردتر موتور متراکمتر شده و در بخش رانج تر آن منبسط می شود و تولید کار می کند. معمولاً از بازایاب حرارتی هوایی در این موتور به منظور افزایش راندمان حرارتی استفاده می شود. یک موتور استرلینگ به صورت زیر است:



- سیکل های گرمایشی: از سیکل های گرمایشی در دستگاه های تبرید یا گرمایش و پمپ های گرمایی استفاده می شود. خرید پمپ گرمایشی تبرید و پمپ گرمایی به صورت زیر است:

=> Refrigeration:

=> Heat pump:

$$\beta = \frac{Q_L}{w_{net}}$$

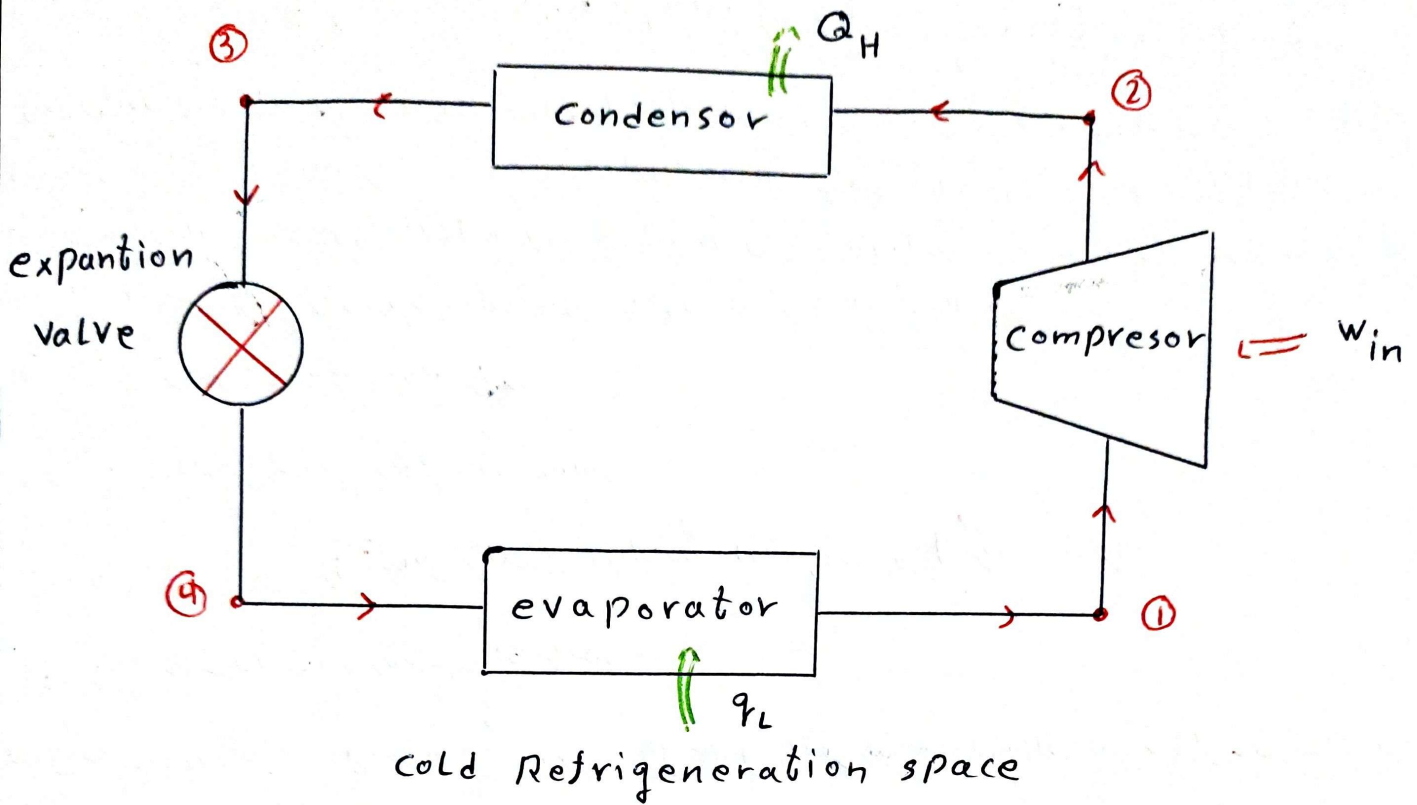
$$\beta' = \frac{Q_H}{w_{net}}$$

$$\beta' - \beta = \frac{Q_H - Q_L}{w_{net}} = \frac{w_{net}}{w_{net}} = 1, \quad \beta, \beta' \geq 0$$

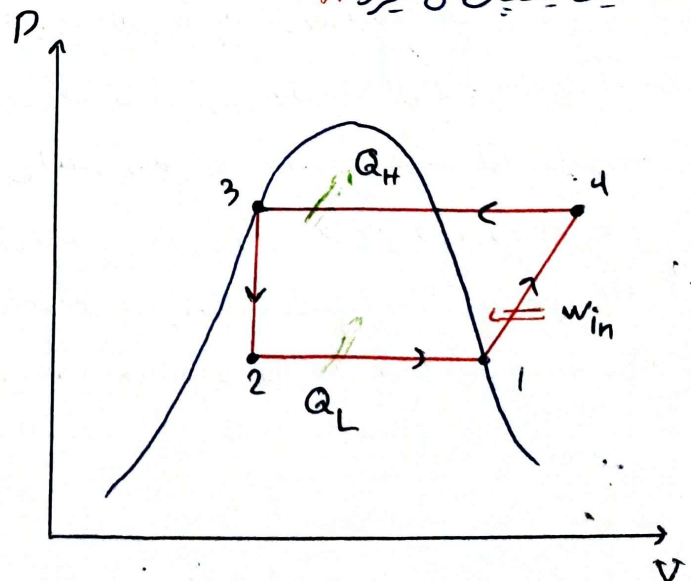
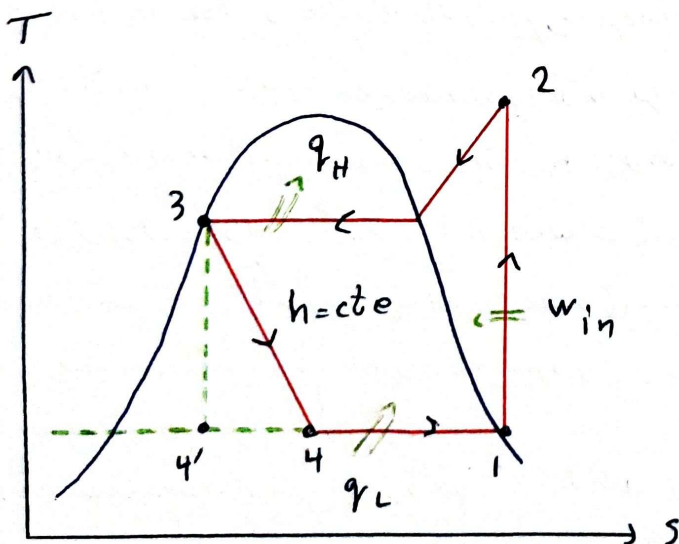
=> β برای گرمایش یک اتاق پمپ الکتریکی از هیتر الکتریکی بهتر است زیرا به ازای هر واحد کار به پمپ گرمایشی بیش از یک واحد گرما دریافت می شود در حالی که در هیتر نهایتاً یک واحد گرما دریافت می شود یا فرض بآره ۱۰۰٪

به سیکل منقسمه بعدی وقت کنید

- سیکل تبرید تراکمی بخار ۱۱
این سیکل از پرکاربردترین سیکل های تبریدی باشد، به بیگنم زیر رقت کنید ۱۱۴



در این سیکل از ۱ تراکم تراکم و یک خواهم داشت، هوا در مبرد فشرده شده و دمای آن افزایش می یابد و وارد کندانسور که پشت یخچال می باشد می شود و انرژی را به محیط اطراف منتقل می کند، در ۳ به پدیده خفکان صورت می گیرد سپس وارد اواپراتور که درون یخچال قرار دارد شده و انرژی آن کاهش می یابد، یعنی حرارت را از محیط یخچال می گیرد ۱۱۴



خواهم داشت ۱۱۴

$$\dot{W}_{in} = \dot{m} (h_2 - h_1)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_{in}}$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m} (h_2 - h_3)$$

$h_1 = h_2$ و $h_3 = h_4$: تعول خفکان

$$\dot{Q}_E = \dot{m} (h_4 - h_1)$$

تحول خفکان یا در یخچالی تحولی می باشد که در آن اگر بتوانیم قانون اول ترمودینامیک را در بیاریم

$$Q - W = m_1 \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + g z_1 \right) - m_2 \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + g z_2 \right)$$

در تحول خفکان کار انجام نمی گیرد، تبادل حرارتی نیز ندارد و سرعت ورودی و خروجی در آن فاکتور گرفته می شود و تغییر ارتفاع در آن ناچیز است. میردها انواع مختلفی نظیر R11 و R22 که به دلیل زیست محیطی منسوخ شده اند R134 و R247 مدل هایی هستند که همچنان استفاده می شوند. امروزه در بسیاری از مقارات از میردهای زکو تروپیک استفاده می شود، به طور خلاصه در این سیکل

2-1 تراکم آیزنتروپیک در کمپرسور

3-2 رفع حرارت فشار ثابت در کندانسور

4-3 فرایند خفگی (در آن تپایی ناچیز است) آریا باتیک در شیر انبساط (اگر گشت پذیرا)

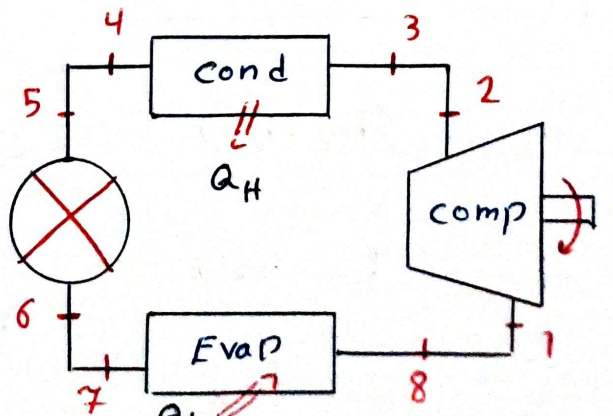
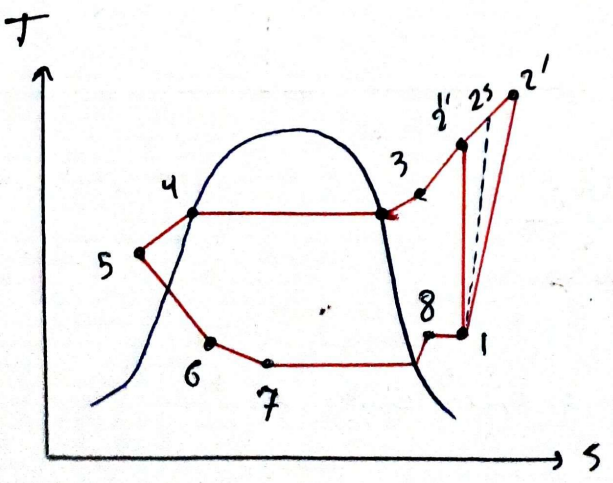
1-4 جذب حرارت فشار ثابت در اواپراتور

تعش کمپرسور در این سیکل این است که دمای سیال عامل را افزایش می دهد با افزایش فشار، تا بتواند گرما را به منبع دما یا محیط بدهد، سوال اساسی این است که چرا به جای شیر انبساط از توربین استفاده نمی شود؟ می رانیم که

$$W_{turb} = - \int v dp$$

باتوجه به اینکه در نقطه 3 مایع اشباع داریم و حجم مخصوص آن v_3 بسیار کم است کار بسیار کمی تولید می شود و استفاده از توربین به بیخیدگی سیستم اضافه کرده و مرفه اقتصادی ندارد، در یخچال های خانگی و آب سردکن ها به دلیل گرانی و بیخیدگی به جای شیر انبساط از لوله موگین استفاده می شود، لوله موگین یک لوله دارای قطر بسیار کم و طول زیاد است که مانند شیر انبساط باعث افت فشار می شود (با افزایش طول و کاهش قطر لوله افت فشار اصطلاحاً بیشتری ایجاد می شود) عمیق لوله موگین عمده امکان تنظیم است که به همین دلیل فقط در سیستم های کوچک استفاده می شود، نکته مهم این است که استفاده از شیر فشار شکن در هر سیالی لزوماً سبب کاهش دما نمی شود.

- اندراف سیکل تبرید تراکمی بخار واقعی از سیکل ایده آل:



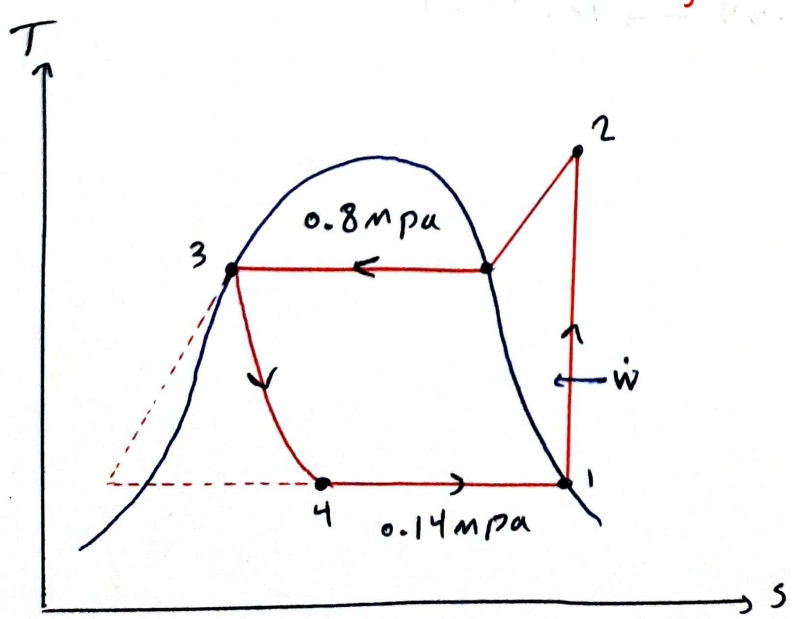
در $2'' \rightarrow 2'$ افزایش انتروپی به دلیل اصطکاک را خواهیم داشت و در کمپرسور به دلیل انتقال حرارت به محیط کاهش انتروپی داریم. ولی انتروپی کل حاصل صکن است افزایش $(2')$ یا کاهش $(2'')$ پیدا کند.

در $2 \rightarrow 5$ افت فشار و انتقال گرما به محیط از لوله را داریم که اثری مثبت است. در $4 \rightarrow 3$ افت فشار و سایکولینگ مایع در خروجی کندانسور داریم که یعنی مایع اشباع نیست. در $5 \rightarrow 4$ افت فشار و دفع گرما در لوله را داریم. در $6 \rightarrow 5$ تحول خفکان. در $6 \rightarrow 7$ افت فشار و جذب حرارت از محیط در لوله را داریم که اثری منفی می باشد. در $7 \rightarrow 8$ افت فشار و سوپرهیت شدن بخار در ورودی کمپرسور رخ می دهد که الزامی و اثر مثبت است زیرا اگر سوپرهیت نشود صکن است قطرات بخار به پره های کمپرسور اسید بزنند. در $8 \rightarrow 1$ افت فشار و جذب گرما در لوله رخ می دهد که اثری منفی است.

در خصوص میرد ها موارد زیر باید باشد:

- 1) فشار اشباع میرد در رمای کندانسور خیلی یا را نباشد. اگر باشد برای اینکه به آن فشار برسیم کمپرسور باید کار بیشتری بکند و مرتبه هم لگد پایین می آید.
- 2) سی، خوردنده، قابل اشتعال و انفجار نباشد.
- 3) قابلیت امیخته شدن با روغن کمپرسور بیرون از دست دادن خواص را داشته باشد.
- 4) ارزان و در دسترس باشد.
- 5) لایه اوزون راغنی را تفریب نکند. حفاظت در برابر اشعه ماورای بنفش و ترکیبات کلردار داشته باشد.
- 6) پتانسیل گرمایش زمین پایینی داشته باشد.

مثال 12) در یک ماشین تبرید برکن، این برکن بین فشار 0.8 mpa و 0.14 mpa و بر اساس چرخه تبرید تراشمی بخار عمل می نماید. اگر رسی جرمی میرد یا سیال عامل برابر 0.05 kg/s باشد محاسبه کنید:



- الف) نرخ حرارت گرفته شده از محیط سرد (\dot{Q}_L)
 - ب) توان ورودی کمپرسور (\dot{w})
 - ج) نرخ انتقال حرارت به محیط گرم (\dot{Q}_H)
 - د) ضریب عملکرد برکن (β)
- $\dot{m} = 0.05 \text{ kg/s}$

برای حل ابتدا التایی را در نقاط مختلف محاسبه می کنیم.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 0.14 \text{ mpa} \\ \eta_1 = 1 \end{array} \right. \xrightarrow[\text{B.3.1}]{\text{فریون 12 اشباع}} h_1 = h_g = 177.87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad s_1 = s_g = 0.7102 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_1 = -22^\circ\text{C}$$

$$s_2 = s_1 = 0.7102 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

== فریون 2-1 آیزنٹروپک ==

$$\left\{ \begin{array}{l} P_2 = 0.8 \text{ mpa} \\ s_2 = 0.7102 \end{array} \right. \xrightarrow[\text{B.3.2}]{\text{فریون 2 اشباع}} h_2 = 208.65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad T_2 = 43.5^\circ\text{C}$$

$$P_3 = 0.8 \text{ mpa}, \quad \eta_3 = 0 \xrightarrow{\text{B.3.1}} h_3 - h_f = 67.3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 \longrightarrow h_4 = 67.3 \text{ kJ/kg} \implies \text{فریون 3-4 خفقاں}$$

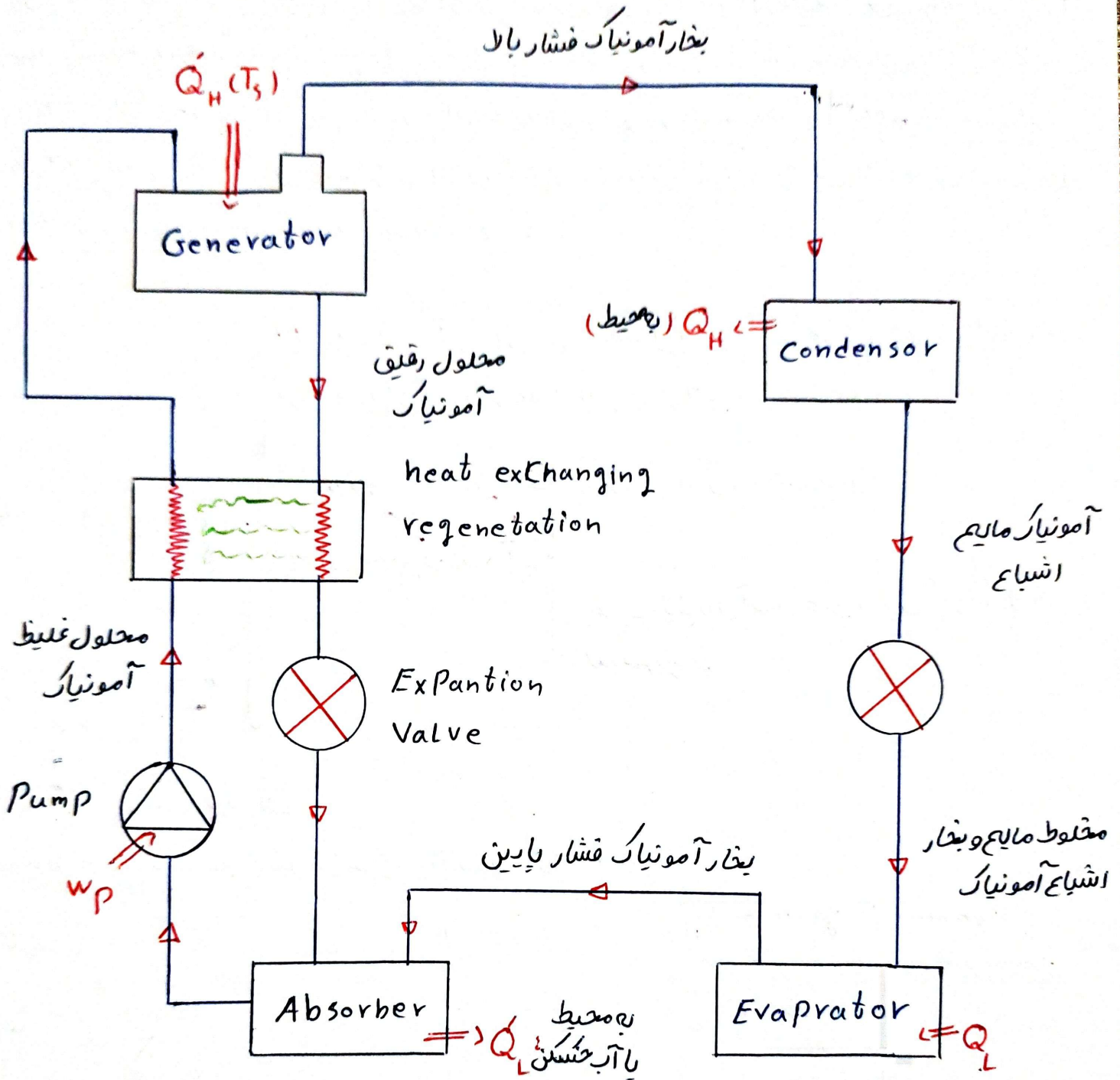
$$\dot{Q}_L = \dot{m} (h_1 - h_4) \longrightarrow \dot{Q}_L = 5.53 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} (\text{kW})$$

$$\dot{w} = \dot{m} (h_2 - h_1) \longrightarrow \dot{w} = 1.54 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m} (h_2 - h_3) \longrightarrow \dot{Q}_H = 7.07 \text{ kW}$$

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{w}} = 5.53 / 1.54 \longrightarrow \beta = 3.54$$

- سیکل تبرید جذبی: «دیگر از این سیکل به صورت زیر است»



نوعه سملکرد این سیکل به این صورت است که، در محفظه جذبی و در دمای پایین جذب گاز صورت می گیرد و با کاهش دما انحلال پذیری گازها در مایع افزایش می یابد، فشار مخلوط توسط پمپ افزایش یافته و با حرارت دادن در ژنراتور تولید بخار آمونیاک گاز فشار بالا از مخلوط خارج می شود، با افزایش دما انحلال پذیری گاز در مایع کاهش می یابد، عمیق این سیکل فریب سملکرد پایین آن است»

$$\Rightarrow \beta = \frac{Q_L}{Q_{gen} + w_p} \approx \frac{Q_L}{Q_{gen}}$$

کارایی بسیار کوچک است اما گرمای ورودی ژنراتور بسیار بالاست و باعث می شود فریب عملکرد بسیار پایین باشد یعنی $\beta \leq 1$ همچنین هزینه آن بالاست، مزیت این سیکل مصرف برق کم آن است، در مقایسه با سیکل تبرید تراکمی بخار به جای کمپرسور از ژنراتور، با زیادهای محفوظه جاذب و پمپ استفاده شده که به دلیل کار مصرفی بسیار کمتر پمپ در برابر کمپرسور کار و برق مصرفی به شدت کاهش می یابد، انرژی مصرفی اصلی گرمایی است، اگر منابع حرارتی ارزان قیمت در دسترس باشد مثل انرژی خورشیدی یا بخار در نیروگاه حرارتی کاربرد این سیکل به بحث گذاشته می شود.

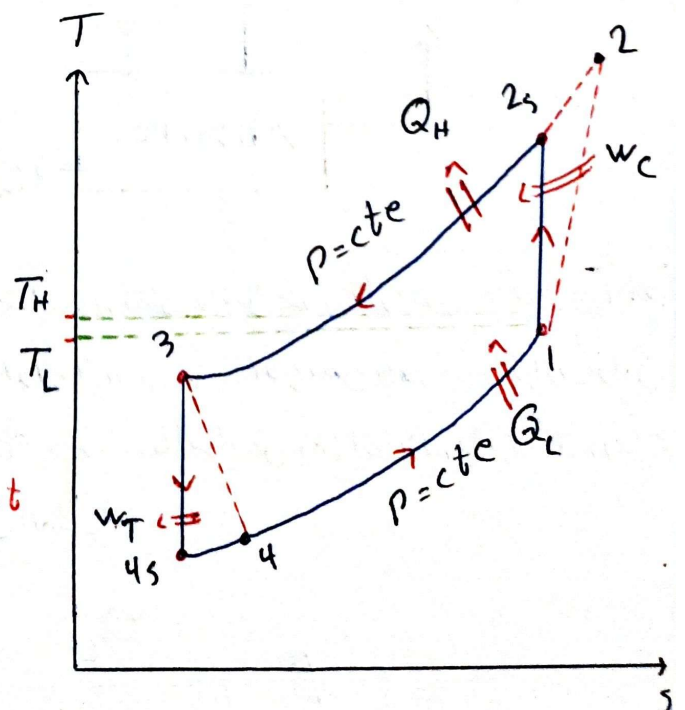
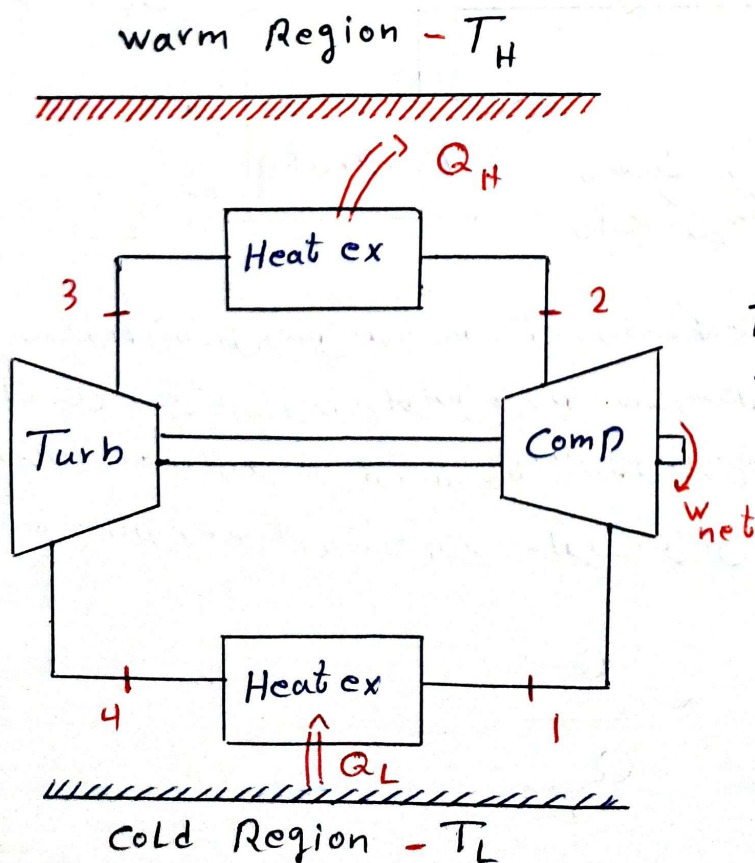
انواع سیکل تبرید جذبی

(1) جذبی آب - آمونیاک: در این سیکل آب جاذب و آمونیاک مبرد می باشد، مزیت آن ایجاد دامی پایین و عمیق آن می بودن آمونیاک است.

(2) جذبی لیتیم برماید - آب: مزیت: ازان وی خطر بودن عمیق: یخ زدن آب در دامی پایین و کریستال شدن لیتیم برماید.

- سیکل استاندارد تبرید هوا

این سیکل درست برعکس سیکل برایتون می باشد به صورت زیر:



در این سیکل در حالت واقعی داریم

$$\begin{cases} T_3 > T_H \\ T_1 < T_C \end{cases}$$

اگر بخواهیم به صورت زیر داشته باشیم که

$$\begin{cases} T_3 = T_H \\ T_1 = T_C \end{cases}$$

باید انتقال حرارت به صورت کامل و *Perfect* انجام گیرد که نیازمند سطوح انتقال حرارت بی نهایت است و عملاً امکان پذیر نیست. مزایای این سیکل این است که نسبت به میزان تولید هر ما اجزای ساده و سبک دارد و در صنایعی که وزن اهمیت دارد استفاده می شود. از معایب این سیکل فریب همگردد پایین آن است زیرا کمپرسورها را خنجره سازی می کند و کار مصرفی زیار است. از کاربرد های این سیکل نیز می توان به برمایش هواپیما و مایع سازی گازها اشاره کرد.

سوال آیا می توان در این سیکل به جای توربین از شیر فشار شکن استفاده کرد؟

خیر اگر از شیر فشار شکن فرایند خفگی $h = cte$ استفاده شود سیکل کار نمی کند زیرا ما کاهش نیافته است. به این دلیل که سیال عملی در سیکل هوا گاز ایده ال است و می رانیم در گاز ایده آل تغییرات آنتالپی فقط تابع دما است و در نتیجه فریب **ژول-تامسون** هوا برابر صفر می شود. یعنی با کاهش فشار در آنتالپی ثابت دما تغییری نمی کند و در نتیجه سیکل کار نمی کند و نمی توان از شیر فشار شکن استفاده کرد.

یادآوری ترمودینامیک 1

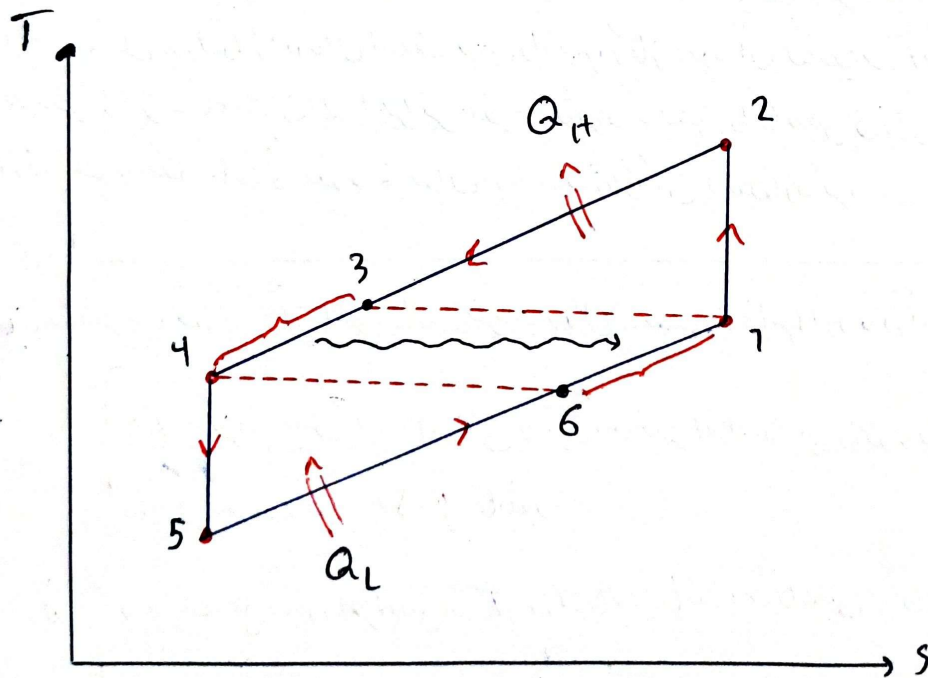
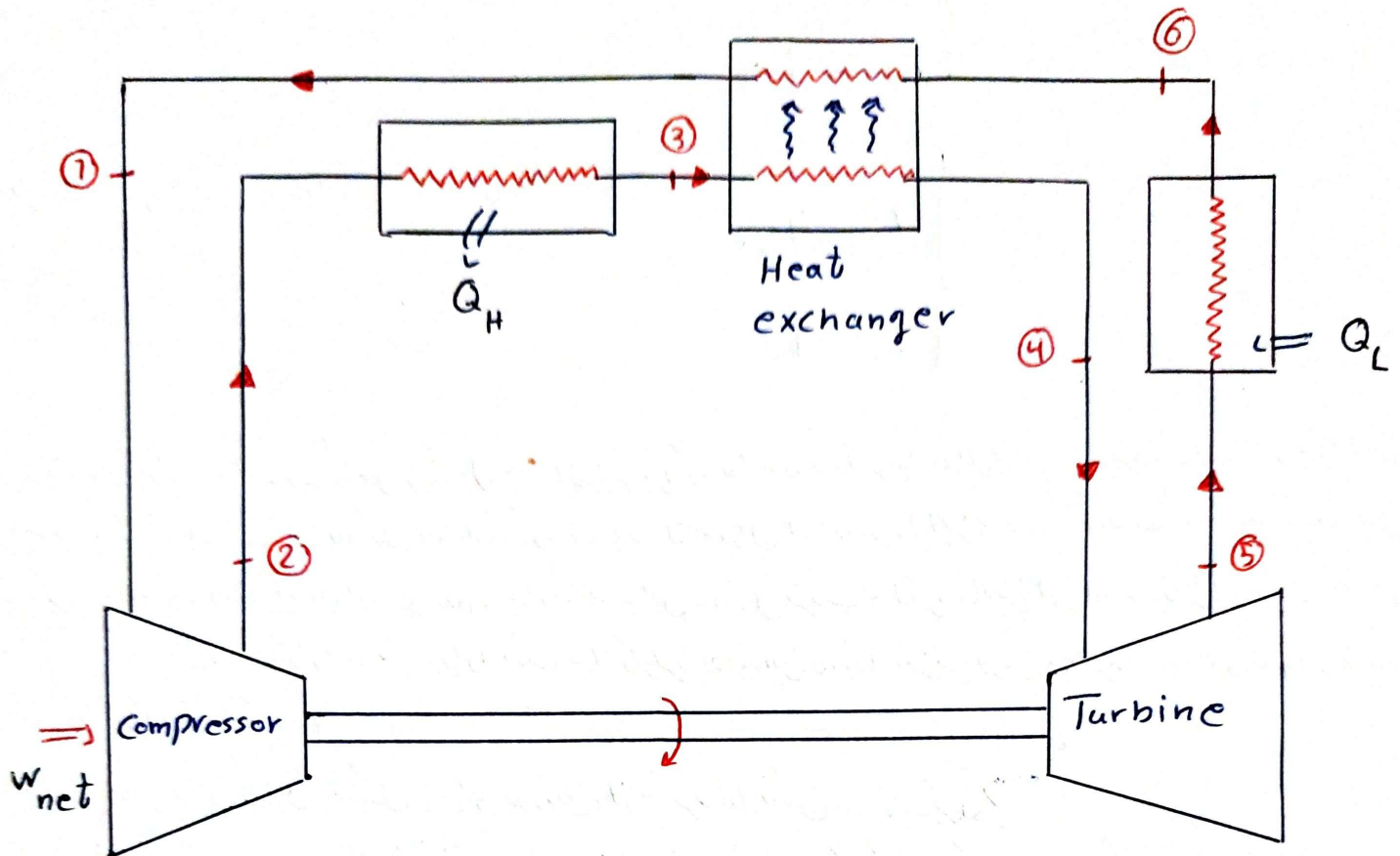
نسبت تغییرات دما به تغییرات فشار در آنتالپی ثابت فریب ژول تامسون نام دارد و در آن

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

- (1) با افزایش فشار در آنتالپی ثابت دما نیز افزایش می یابد و برعکس و سیال عامل سیکل تبرید باید $\mu > 0$ باشد.
- (2) با افزایش فشار در آنتالپی ثابت دما کاهش می یابد و برعکس.
- (3) با افزایش یا کاهش فشار در آنتالپی ثابت دما تغییری نمی کند.

سیکل خنک کننده هواپیما: مهو را از کمپرسور خروجی برای تراکم هوا استفاده می شود در واقع از طبقات میانی کمپرسور مو توربنت، مقداری هوای خنجره برای سیکل تبرید زیر کش می شود. کار تولیدی توربین برق مصرفی هواپیما را تامین می کند و ربطی به کمپرسور ندارد.

- سیکل تبرید استاندارد ها با بازتاب ۱۱۵

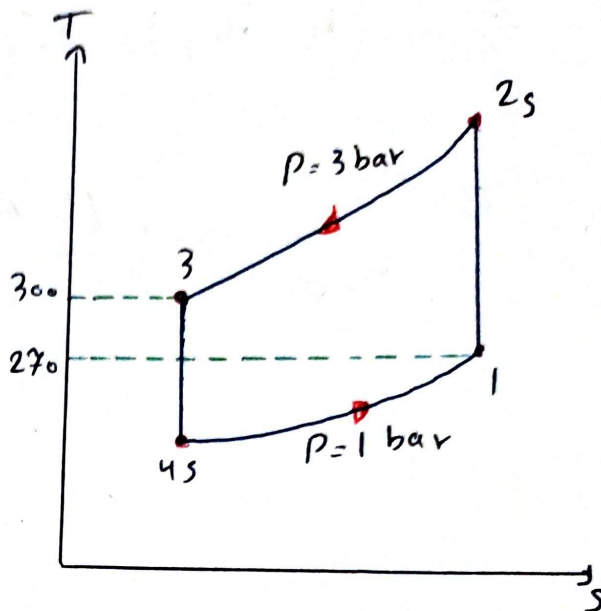
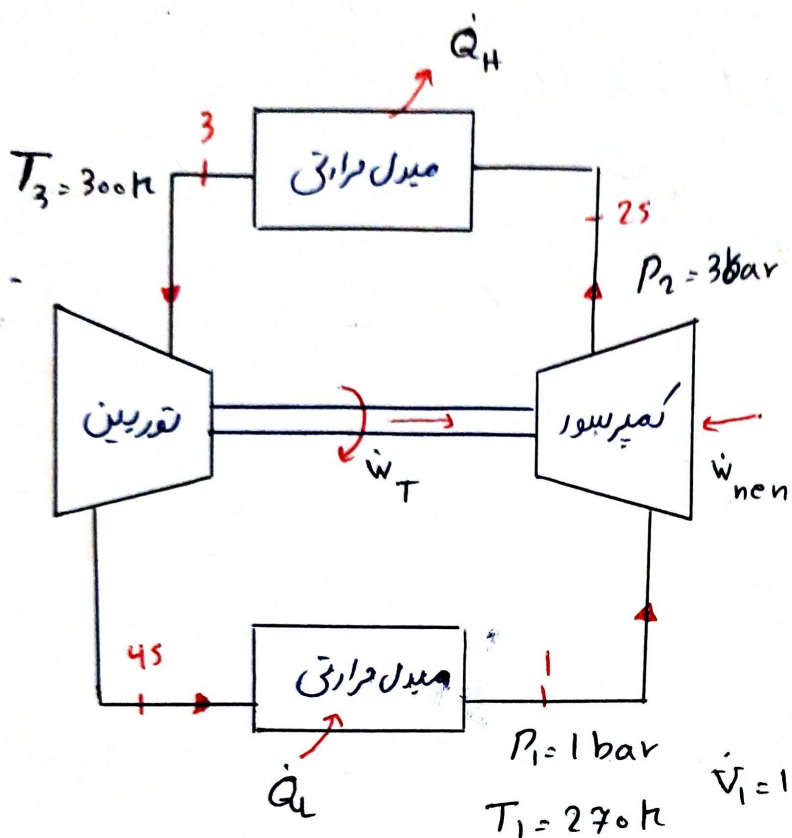


این سیکل جهت رسیدن به دماهای پایین مناسب است.

این سیکل موجب کاهش اثر تبرید می شود.

مثال 13) در یک چرخه تبرید استاندارد هوا تبرید برای یکن هوا با فشار 1 bar و دمای 270 K و دبی جرمی 1.4 m³/s وارد کمپرسور می شود. نسبت فشار کمپرسور 3 بوده و دمای هوا در ورودی توربین 300 K می باشد.

الف) توان خالص ورودی (W_{net}) ب) ظرفیت تبرید بر حسب kW ج) فریب عملکرد



چون چرخه ایده آل است و فرایندهای 1-2 و 3-4 آیزنتروپیک هستند بنابراین خروجی کمپرسور و توربین را به ترتیب با 2s و 4s مشخص می کنیم، چنانچه می دانیم P_{2s} = P₃ ، P_{4s} = P₁ ، s_{2s} = s₁ ، s_{4s} = s₃ بنابراین برای هر کدام از نقطه ها B خاصیت را داریم، می توانیم انتالپی را از جدول A.7 ویست می آوریم.

$$h_1 = 270.11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow h_{2s} = 370.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow h_3 = 300.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

میانگین دبی جرمی یا \dot{m} را:

با استفاده از $P_1 \dot{V}_1 = \dot{m} R T_1 \rightarrow \dot{m} = \frac{P_1 \dot{V}_1}{R T_1}$

$$\dot{m} = \frac{(1 \times 10^5 \text{ N/m}^2) (1.4 \text{ m}^3/\text{s})}{0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} (270 \text{ K})} \left(\frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N}\cdot\text{m}} \right)$$

$$\dot{m} = 1.807 \text{ kg/s} \rightarrow \Delta PE = \Delta KE = 0$$

الف) توان خالص ورودی یا \dot{w}_{net} و

$$\dot{w}_{net} = \dot{m}(h_{2s} - h_1) - \dot{m}(h_3 - h_{4s}) \rightarrow \dot{w}_{net} = 33.97 \text{ kW}$$

ب) ظرفیت بر مایه سیستم یا \dot{Q}_L و

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_{4s}) \rightarrow \dot{Q}_L = 92.36 \text{ kW}$$

ج) ظرفیت عملکرد β و

$$\beta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{w}_{net}} \rightarrow \beta = 2.72$$

تا به اینجا بیشتر ماره خالص را مورد بررسی قرار داده ایم، مخلوط گازها یعنی به فرض مثال یک ای سه گاز را در یک محیط بسته داشته باشیم، لازم به ذکر است که مخلوطها واکنش شیمیایی انجام نمی دهند، ماره خالص ماره ای هگن با ترکیبات شیمیایی ثابت است و نکته مهم این است که هوا ماره خالص نیست اما رفتار ماره خاص را نشان می دهد زیرا ترکیب هوا به جا تقریباً یکسان است، هدف ما در این فصل تعیین خواص - ترمودینامیکی مخلوطها بر حسب خواص اجزای تشکیل دهنده آنهاست، همه مخلوطهای گازی این فصل گازهای ایده آل فرض می شوند، حال فرض کنید مخلوطی با n جزء داریم: ۱۱

$$m_t = m_1 + m_2 + \dots + m_n = \sum_{i=1}^n m_i, \quad n_t = n_1 + n_2 + \dots + n_n = \sum_{i=1}^n n_i$$

$$y_i = \frac{n_i}{n_t} \quad \text{جزء مولی} \quad , \quad C_i = \frac{m_i}{m_t} \quad \text{جزء جرمی}$$

حال برای بدست آوردن جرم مولکولی مخلوط خواهیم داشت: ۱۱

$$m_i = n_i M_i \Rightarrow C_i = \frac{m_i}{m_t} = \frac{n_i M_i}{\sum n_j m_j} = \frac{n_i / n_t M_i}{\sum \frac{n_j}{n_t} m_j} = \frac{y_i M_i}{\sum y_j M_j}$$

$$\Rightarrow y_i = \frac{n_i}{n_t} = \frac{\frac{m_i}{M_i}}{\sum \frac{m_j}{M_j}} = \frac{\frac{m_i}{(M_i m_t)}}{\sum \frac{m_j}{(M_j m_t)}} = \frac{C_i}{\sum \frac{C_j}{M_j}}$$

جرم مولکولی مخلوط: $M_{min} = \frac{m_t}{n_t} = \frac{\sum n_i M_i}{n_t} = \sum y_i M_i$

مثال ۱۴) آنالیز مولی محصولات احتراق گازی یک سوخت را به شرحه: ۱۱

الف) جرم مولکولی مخلوط؟

ب) ثابت گاز مخلوط؟

ج) جزء جرمی هر کدام از اجزاء تشکیل دهنده مخلوط؟

آنالیز موی محصولات احتراق گازی نیز طبق جدول زیر است:

Component	y_i
CO_2	0.08
H_2O	0.11
O_2	0.07
N_2	0.74

=> الف: $M_{min} = \sum y_i M_i = 0.08(44) + 0.11(18) + 0.07(32) + 0.74(28)$
 $= 28.46$

=> ب: $R_{min} = \frac{\bar{R}}{M_{min}} = \frac{8.3145}{28.46} = 292 \frac{kJ}{kg \cdot K}$

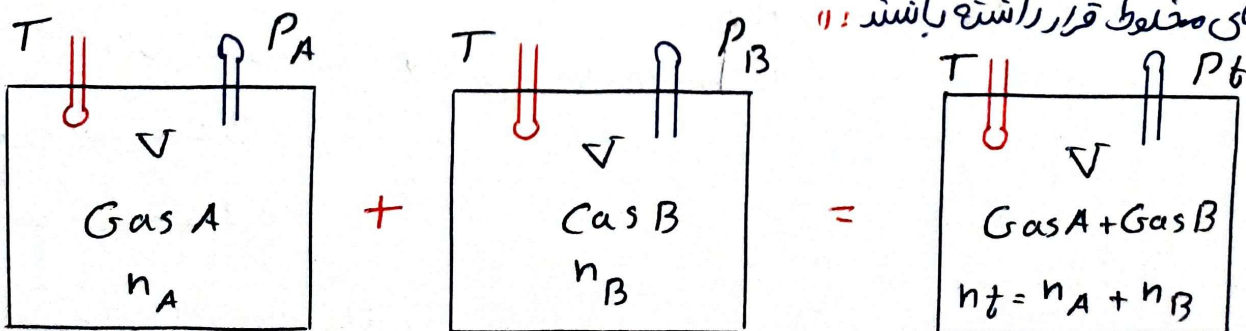
=> ج: $c_i = \frac{y_i M_i}{\sum y_i M_i} = \frac{y_i M_i}{M_{min}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{CO_2} = 7.87\% \\ C_{N_2} = 72.8\% \\ C_{O_2} = 12.37\% \\ C_{H_2O} = 6.96\% \end{array} \right.$$

آنالیز مخلوط گازها: برای آنالیز مخلوط گازها دو مدل از زیری داریم:

= مدل رالتون: فرض می‌شود خواص گاز در مخلوط برابر خواص آن گاز باشد هنگامی که آن گاز به تنهایی در

حجم و دمای مخلوط قرار داشته باشند:



در این مدل دو گاز A و B را با حجم های n_A و n_B داریم که مخلوط آنها را درای یک حجم خواهد بود به نام n_t یعنی به عبارتی فرض کنید یک اتاق و یک جعبه داریم که درون اتاق گاز A و درون جعبه گاز B قرار دارد. با برابر کردن حجم این دو گاز آنها را مخلوط می کنیم. قطعاً گاز درون جعبه فشار بیشتری نسبت به گاز درون اتاق دارد بنابراین با افزایش فشار گاز اتاق، این گاز هم حجم گاز درون جعبه می شود یا بالعکس با کاهش فشار گاز درون جعبه آن را هم حجم گاز درون اتاق می کنیم. لازمه ذکر است که فرض می کنیم فرایند ما را ثابت می باشد. یا هم حجم سازی گازها مولکول های یکدیگر قرار گرفته اند

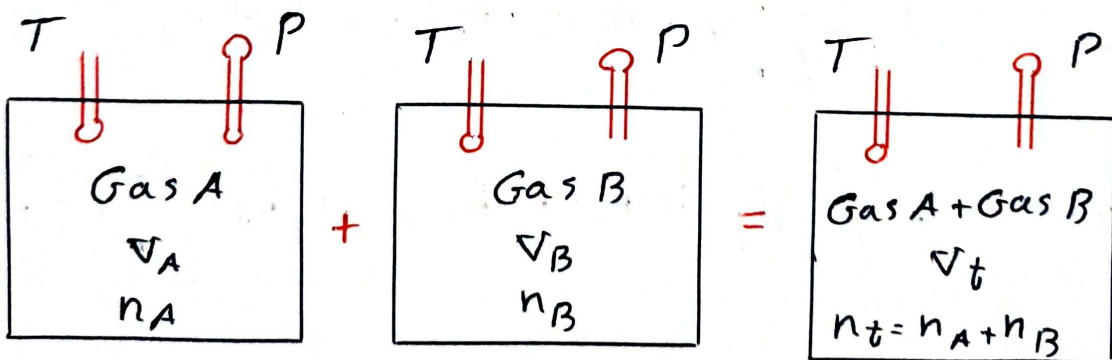
$$P_A V = n_A \bar{R} T, \quad P_B V = n_B \bar{R} T \xrightarrow{A+B} P_t V = n_t \bar{R} T$$

$$n_t = n_A + n_B \rightarrow \frac{P_t V}{\bar{R} T} = \frac{P_A V}{\bar{R} T} + \frac{P_B V}{\bar{R} T} \Rightarrow P_t = P_A + P_B$$

= فشار جزئی گازها: فشاری که اگر گاز به تنهایی در حجم و دمای مخلوط قرار داشته باشد را خواهد بود

$$\Rightarrow \frac{A}{A+B} = \frac{P_A}{P_t} = \frac{n_A}{n} = y_A, \quad \frac{B}{A+B} = \frac{P_B}{P_t} = \frac{n_B}{n_t} = y_B$$

2) مدل آمالگامات: در این مدل فرض می شود خواص گاز در مخلوط برابر خواص آن گاز باشد هنگامی که آن گاز به تنهایی در فشار و دمای مخلوط قرار داشته باشند



در این مدل فشارها را با هم برابر کرده ایم و خواهیم داشت

$$P_A V_A = n \bar{R} T, \quad P V_B = n \bar{R} T \xrightarrow{} P V_t = n \bar{R} T$$

$$n_t = n_A + n_B \Rightarrow \frac{P V_t}{\bar{R} T} = \frac{P V_A}{\bar{R} T} + \frac{P V_B}{\bar{R} T} \Rightarrow V_t = V_A + V_B$$

$$\Rightarrow \frac{V_A}{V_t} + \frac{V_B}{V_t} = 1$$

جزء حجم گاز B

$$\Rightarrow \frac{A}{A+B} ; \frac{V_A}{V_t} = \frac{n_A}{n_t} = y_A$$

$$\frac{V_B}{V_t} = \frac{n_B}{n_t} = y_B$$

گاز ایزوآل نازی می باشد که خواص بین مولکولی ها از قطر آنها بیشتر باشد، برای آنکه از طرف راهم فشار کنیم کافی است یکی مخازنی که فشار بیشتری دارد را اجازه دهیم مقداری گاز تخلیه شود و پس از برابری فشار بیشتر رایسته و تعداد مول را اندازه گیری می کنیم.

نکته: برای آنکه فشار در طرف مخلوط برابر دو فشار قبلی شود کافیست آن را مانند سیلندر بیستون فرض کرده و گاز را مخلوط کنیم و حجم سیلندر بیستون را آنقدر تغییر دهیم (مثلا با وزنه های متفاوت روی بیستون) که فشار در طرف مخلوط برابر دو فشار قبلی شود.

لازم به ذکر است که برای گازهای ایزوآل مول های آمات و **دالتون** دقیق یوره و نتایج یکسانی می دهند.

- معادله خواص ترمودینامیکی مخلوط گازهای ایزوآل بر حسب اجزا تشکیل دهنده مخلوط است: برای بیست آوردن روابط از مدل آمات استفاده نکرده بلکه از دالتون استفاده می کنیم زیرا به واقعیت نزدیک است.

$$\bar{h} = \frac{h_j}{m.o.l}$$

$$\Rightarrow U = u_1 + u_2 + \dots + u_n = \sum V_i = n_1 \bar{u}_1 + n_2 \bar{u}_2 + \dots + n_j \bar{u}_j = \sum_{n=1}^j n_i \bar{u}_i$$

$$\Rightarrow H = H_1 + H_2 + \dots + H_n = \sum_{n=1}^j H_i = n_1 \bar{h}_1 + n_2 \bar{h}_2 + \dots + n_j \bar{h}_j = \sum_{n=1}^j n_i \bar{h}_i$$

\bar{h} و \bar{u} فقط تابع اما هستند.

$$S = s_1 + s_2 + \dots + s_j = \sum_{n=1}^j s_i = n_1 \bar{s}_1 + n_2 \bar{s}_2 + \dots + n_j \bar{s}_j = \sum_{n=1}^j n_i \bar{s}_i$$

\bar{h}_i و \bar{u}_i در امای مخلوط قرائت می شوند، \bar{s}_i تابع اما و فشار است و در امای مخلوط و فشار جزئی P_i قرائت می شود.

لازم به ذکر است که U, H, S را اصطلاحاً خواص گسترده یا *extensive* نامند پس می توان مقدار کل را به صورت جمع اجزا تشکیل دهنده محاسبه کرد.
 - تغییر آنتروپی طی فرایند اختلاط گازهای ایده آل:
 می دانیم که آنتروپی یعنی نرخ تغییرات بی نظمی بنابراین اختلاط یکی از دلایل تغییر آنتروپی و ایجاد برگشت ناپذیری است و آنتروپی مولفه اثر مخلوط گازهای ایده آل برابر است با:

$$S_i = S_{T_i}^{\circ} - R_i \ln \left(\frac{y_i P}{P^{\circ}} \right)$$

تغییر آنتروپی اختلاط را ثابت رو گاز A و B به شرح زیر است:

$$S_2 - S_1 = S_{genmix} = M_A (S_2 - S_1)_A + M_B (S_2 - S_1)_B$$

نسبت به معادله بالا
 $\xrightarrow{\text{در } T_i \text{ ها ساده می شوند}}$

$$= M_A \left(0 - R_A \ln \frac{P_A}{P} \right) + M_B \left(0 - R_B \ln \frac{P_B}{P} \right) = -m_A R_A \ln y_A - m_B R_B \ln y_B$$

$$S_{genmix} = -n_A \bar{R} \ln y_A - n_B \bar{R} \ln y_B \quad \text{؟ برای اختلاط } K \text{ گاز ایده آل}$$

$$S_{genmix} = -\bar{R} \sum_k n_k \ln y_k = -n \bar{R} \sum_k y_k \ln y_k$$

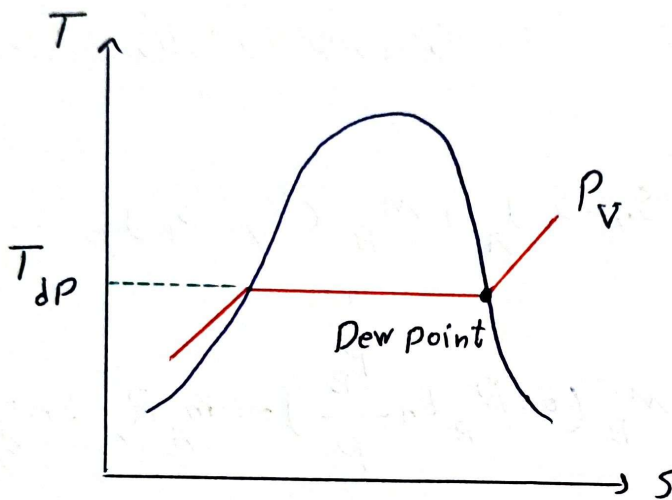
- مخلوط گاز و بخار: «انالیز مخلوط هوا و بخار آب در ستونچه مطبوع کاربرد دارد و جایی که ما باید با بررسی خواص مخلوط هوا و بخار آب بر مبنای میزان هوای خشک و همچنین میزان رطوبت موجود در مخلوط به مخلوط هوا و بخار آبی با کیفیت مطلوب (رطوبت مناسب) برسیم.»
 = فرضیات:

- (1) گاز نامخلول در فاز مایع (که تا هوای روی سطح آب به تعادل ترمودینامیکی رسیده) وجود ندارد.
- (2) هوا و بخار آب هر دو گاز ایده آل هستند.

3) تعادل ترمودینامیکی گذرانسه (مایع) و بخار آب تحت تاثیر سایر مولفه های گازی قرار ندارند و یعنی اگر بین این دو فاز تعادل ترمودینامیکی برقرار باشد فشار جزئی بخار آب برابر با فشار جزئی بخار در دمای مخلوط خواهد بود.

= سه تعریف مهم

7) نقطه شبنم یا Dew point: مایعی است که اگر هوای مرطوب را طی فشار ثابت تا آن دما سرد کنیم اولین قطره شبنم تشکیل خواهد شد. یعنی زمانی که هدا در یک فشار خاص به دمای نقطه شبنم می رسد بخار آب موجود در هوا در حالت تعادل با آب مایع قرار می گیرد. و در این حالت نرخ میعان بخار آب و نرخ تبخیر آب مایع با یکدیگر برابر هستند.

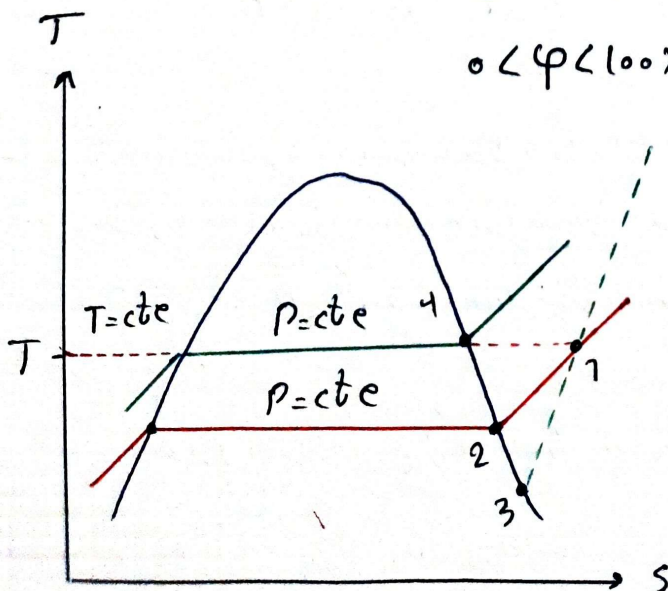


2) حبابش: تغییر فاز بخار به مایع، تقطیر یا میعان.

3) هوای اشباع: هوایی که بخار موجود در آن در دما و فشار اشباع باشد به صورتی که بخار آب جدیدی نمی توان به آن اضافه کرد.

- رطوبت نسبی

نسبت فشار جزئی بخار آب موجود در هوا به فشار بخار آب اشباع در دمای هوا (مخلوط):



$$\phi = \frac{P_v}{P_g} = \frac{P_1}{P_4} \quad \left\{ \begin{array}{l} P_v V_v = RT \\ P_g V_g = RT \end{array} \right.$$

$$\frac{P_v}{P_g} = \frac{V_g}{V_v}$$

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} = \frac{V_g}{V_v} = \frac{P_v}{P_g}$$

- رطوبت مطلق، نسبی رطوبت و رطوبت مخصوص

میزان رطوبت موجود در واحد جرم هوای خشک است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \Rightarrow m_{v,a} = \frac{P_{v,a} V}{R_{v,a} T} = \frac{P_{v,a} V M_{v,a}}{\bar{R} T}$$

$$\Rightarrow \omega = \frac{\frac{P_v}{R_v T}}{\frac{P_a}{R_a T}} = \frac{R_a P_v}{R_v P_a} = \frac{M_v P_v}{M_a P_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_{total} - P_v}$$

مثال 15) اتاقی به ابعاد $5 \times 5 \times 3$ متر حاوی هوای در دمای $25^\circ C$ و فشار 100 kPa و رطوبت نسبی 75%

می باشد مطلوب است:

الف) $T = 25^\circ C \xrightarrow{B.O} P_g = 3.169 \text{ kPa} \rightarrow \phi = \frac{P_v}{P_g}$

ب) محاسبه نسبی رطوبت؟

ج) محاسبه جرم هوای خشک؟

د) محاسبه جرم بخار آب؟

ه) محاسبه دمای نقطه شبنم؟

و) فشار هوای خشک؟

$$\Rightarrow \text{ب: } P_a = P - P_v = 100 - 2.38 = 97.62 \text{ kPa}$$

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} = \frac{0.622 \times 2.38}{(100 - 2.38)} = 0.0152$$

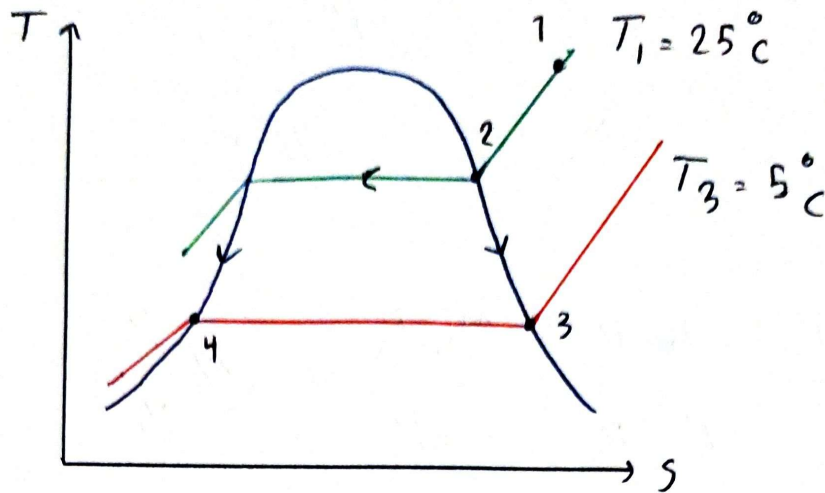
ج) $V_a = V_v = V_{room} = 5 \times 5 \times 3 = 75 \text{ m}^3$ $m_a = \frac{P_a V_a}{R_a T} = \frac{97.62 \times 75}{0.287 \times 298} = 85.61$

د) $m_v = \frac{P_v V_v}{R_v T} = \frac{2.38 \times 75}{0.4615 \times 298} = 1.3 \text{ kg}$

or

$\Rightarrow m_v = \omega m_a = 0.0152 \times 85.61 = 1.3$

مثال 16) مخلوط هوا و بخار آب مثال قبیل را در نظر بگیرید، اگر این مخلوط طی فرایند فشار ثابت تا زمانی سرد شود مقدار بخار میآلیده شده را بدست آورید؟ به صورت زیر خواهیم داشت ۱۴



نقطه ۱ را طی فشار ثابت سرد می‌کنیم و به بخار اشباع در نقطه ۲ رسیدیم، مقداری از بخار آب اشباع به صورت بخار آب اشباع باقی مانده و رطوبت آن تا نقطه ۳ پایین می‌آید، مقداری از آن نیز مایع شده است: ۱۴

$$T_3 = 5^\circ\text{C} \rightarrow P_{v_3} = P_{g_3} = 0.872 \text{ kPa} \rightarrow P_{a_3} + P_{v_3} = 100 \text{ kPa}$$

$$P_{a_3} = (100 - 0.872) \text{ kPa} = 99.128 \text{ kPa} \rightarrow \omega_3 = 0.622 \frac{P_{v_3}}{P_{a_3}} = 0.0055$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1 = 0.0152 \\ \end{array} \right.$$

$$\rightarrow m_d = m_a (\omega_1 - \omega_3) = 85.61 (0.0152 - 0.0055)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_a = 85.61 \\ \end{array} \right.$$

$$\hookrightarrow m_d = 83 \text{ kg}$$

- قانون اول ترمودینامیک برای مخلوط گازها:

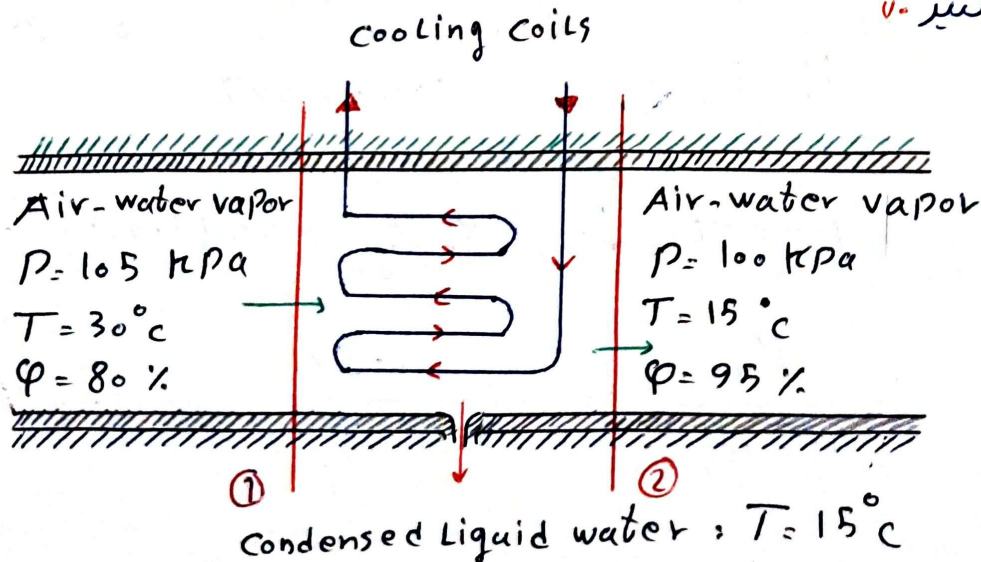
در استفاده از معادله انرژی برای مخلوط های گاز و بخار درک این نکته مفید است که به دلیل این فرض که گاز های ایره آل درگیر هستند، اجزای مختلف را می توان به صورت جداگانه در هنگام محاسبه تغییرات انرژی داخلی و آنتالپی بررسی کرد، بنابراین در برخورد با مخلوط های هوا و بخار آب تغییرات آنتالپی بخار آب را می توان از جداول بخار یافت و روابط گاز ایره آل را روی هوا اعمال کرد، محتوای آب مخلوط معمولاً در مقیاس مطلق کم است بنابراین فشار جزئی بخار آب تنها چند کیلو پاسکال است، یعنی نشان دادن بخار آب به عنوان یک گاز ایره آل یک تقریب عالی است و خواص u و h تابع دما هستند، برای یک موقعیت جریان معادله انرژی:

$$\dot{m}h = \dot{m}_a h_a + \dot{m}_v h_v = \dot{m}_a (h_a + \omega h_v)$$

$$\tilde{h} = h_a + \omega h_v = h_a + \omega h_g \quad \text{آنتالپی}$$

$$\Rightarrow \dot{m}u = \dot{m}_a u_a + \dot{m}_v u_v = \dot{m}_a (u_a + \omega u_g) \quad \text{جای که آنتالپی بخار فوق گرم برابر با مقدار بخار اشباع شده}$$

مثال 17) سیستم ترمودینامیک مطلوب نشان داده شده در شکل زیر را مشاهده کنید، انتقال حرارت بر واحد جرم هوای خشک را محاسبه کنید.



اگر روی سطح coil از دمای شیبمتر مخلوط پایین تر باید مقداری بخار آب کنشانس می شود که همین اتفاق افتاده، همچنین اگر فرایند نامگا ایره آل باشد رطوبت نسبی دو برابر 100% خواهد شد اما چون هوا با سطح کوئل تماس ندارد سرد نمیست.

$$\left. \begin{array}{l} \text{مغایله} \\ \text{بیلوشنی} \end{array} \right\} \begin{cases} \sum \dot{m}_{a_i} = \sum \dot{m}_{a_c} \Rightarrow \dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a \\ \sum \dot{m}_{v_i} = \sum \dot{m}_{v_c} \Rightarrow \dot{m}_{v_1} = \dot{m}_{v_2} + \dot{m}_{e_2} \end{cases} \Rightarrow \dot{m}_v = \omega \dot{m}_a$$

$$\text{first Law: } \dot{Q}_{cv} + \sum \dot{m}_i h_i = \cancel{\dot{W}_{cv}} + \sum \dot{m}_c h_c$$

$$\dot{Q}_{cv} + \dot{m}_a h_{a_1} + \dot{m}_{v_1} h_{v_1} = \dot{m}_a h_{a_2} + \dot{m}_{v_2} h_{v_2} + \dot{m}_{e_2} h_{e_2} \xrightarrow{\div \dot{m}_a}$$

$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}_a} + h_{a_1} + \omega_1 h_{v_1} = h_{a_2} + \omega_2 h_{v_2} + (\omega_1 - \omega_2) h_{e_2}$$

$$\underline{T_1 = 30^\circ\text{C}} \xrightarrow{\text{B11}} P_{g_1} = 4.246 \text{ kPa} \rightarrow P_{v_1} = \varphi_1 P_{g_1} = 0.8 \times 4.246 = 3.397 \text{ kPa}$$

$$\omega_1 = 0.622 \frac{P_{v_1}}{P_{t_1} - P_{v_1}} = 0.622 \frac{3.397}{105 - 3.397} = 0.0208$$

$$\underline{T_2 = 15^\circ\text{C}} \xrightarrow{\text{B11}} P_{g_2} = 1.7051 \text{ kPa} \rightarrow P_{v_2} = \varphi_2 P_{g_2} = 0.95 (1.7051) = 1.62 \text{ kPa}$$

$$\omega_2 = 0.622 \frac{P_{v_2}}{P_{t_2} - P_{v_2}} = 0.622 \frac{1.62}{100 - 1.62} = 0.0102$$

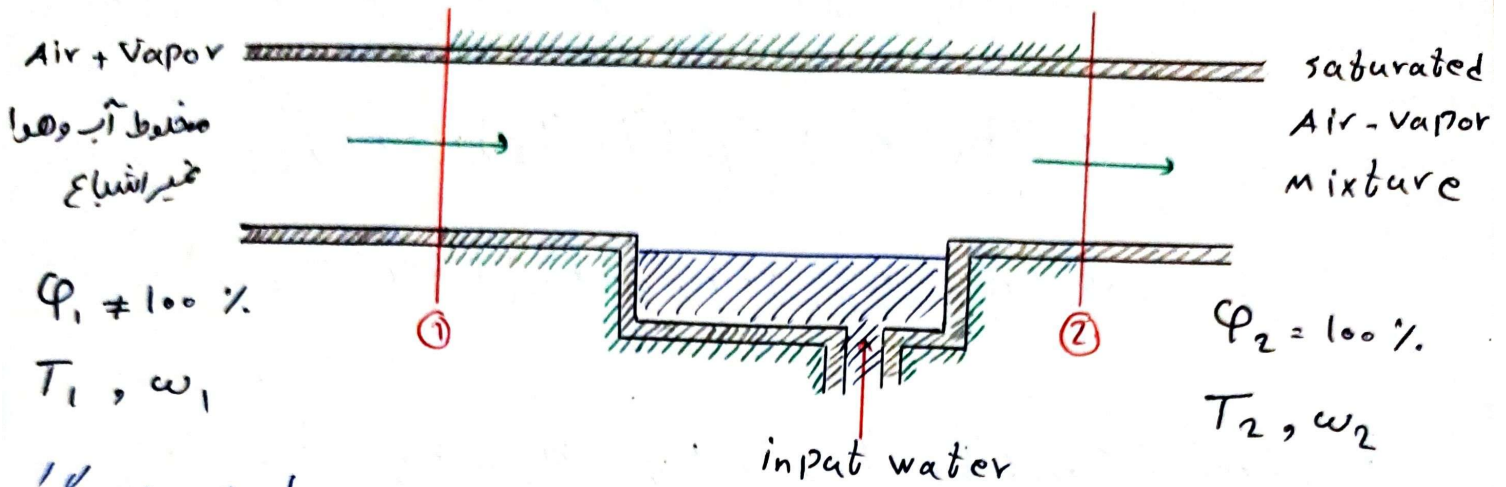
$$h_{e_2} = h_{f@15^\circ\text{C}} = 62.99 \rightarrow h_v = h_g @ T \rightarrow \underline{h_{v_1} = 2528.9}, \underline{h_{v_2} = 2556.3}$$

$$h_{a_2} - h_{a_1} = C_{pa}(T_2 - T_1) = 1.004 (15 - 30)$$

$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{m}_a} = 1.004(15 - 30) + 0.0102(2528.9) - 0.0208(2556.3) + (0.0208 + 0.0102) \rightarrow (62.99) = -41.76$$

فرایند اشباع آریا باتیک

یک فرایند مهم برای مخلوط بخار آب و هوا فرایند اشباع آریا باتیک است. در این فرایند یک مخلوط هوا-بخار در یک محرای عمیق شده با آب در تماس است. طبق شکل زیر



اگر رطوبت اولیه کمتر از ۱۰۰ درصد باشد مقداری از آب تبخیر می شود و رطوبت هوا کاهش می یابد. اگر رطوبت مخلوط خروجی از محرای اشباع باشد و اگر فرایند آریا باتیک باشد رطوبت مخلوط هنگام خروج به عنوان رطوبت اشباع آریا باتیک شناخته می شود. برای اینکه این به عنوان یک فرایند حالت پایدار انجام شود، آب آریا باتی در رطوبت اشباع آریا باتیک یا همان رطوبت آریا تبخیر می شود. اضافه شده و فشار ثابت فرض می شود. برای آنکه هوای خروجی نامدا اشباع باشد می توانیم آب را داخل هوا بپاشیم یا اینکه سطح تبادل هوا و آب انقدر زیاد باشد که هوا فرصت کافی داشته باشد و آب و بخار وارد هوا شود. فرضیات ما در این فرایند:

- (1) هوای خروجی به صورت اشباع
- (2) فرایند آریا باتیک و پایا (به اندازه آب تبخیر شده آب به مخلوط اضافه می شود)
- (3) رطوبت آب اضافه شده برابر رطوبت هوای خروجی (T₂)

به این فرایند، فرایند اشباع آریا باتیک و به رطوبت اشباع خروجی از آن رطوبت اشباع آریا باتیک می گویند. با در نظر گرفتن فرایند اشباع آریا باتیک به عنوان فرایند جریان پایدار و صرف نظر از تغییرات انرژی پتانسیلی و جنبشی قانون اول به صورت زیر ساده می شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{a_1} = m_{a_2} = m_a \quad \omega = \frac{m_v}{m_a} \\ m_{v_1} + m_e = m_{v_2} \end{array} \right. \rightarrow \omega_1 m_{a_1} + m_e = \omega_2 m_{a_2} = m_{v_2} = (\omega_2 - \omega_1) m_a$$

first Law: $\dot{Q}_{cv} + m_a h_{a_1} + m_{v_1} h_{v_1} + m_e h_{e_2} = \dot{W}_{cv} + m_a h_{a_2} + m_{v_2} h_{v_2}$

$$h_{a1} + \omega_1 h_{v1} + (\omega_2 - \omega_1) h_{12} = h_{a2} + \omega_2 h_{v2}$$

$$\omega_1 (h_{v1} - h_{12}) = C_{pa} (T_2 - T_1) + \omega_2 (h_{v2} - h_{12})$$

$$\omega_1 (h_{v1} - h_{12}) = C_{pa} (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg2}$$

$$\omega_1 (h_{v1} - h_{e2}) = h_{a2} - h_{a1} + \omega_2 (h_{v2} - h_{e2})$$

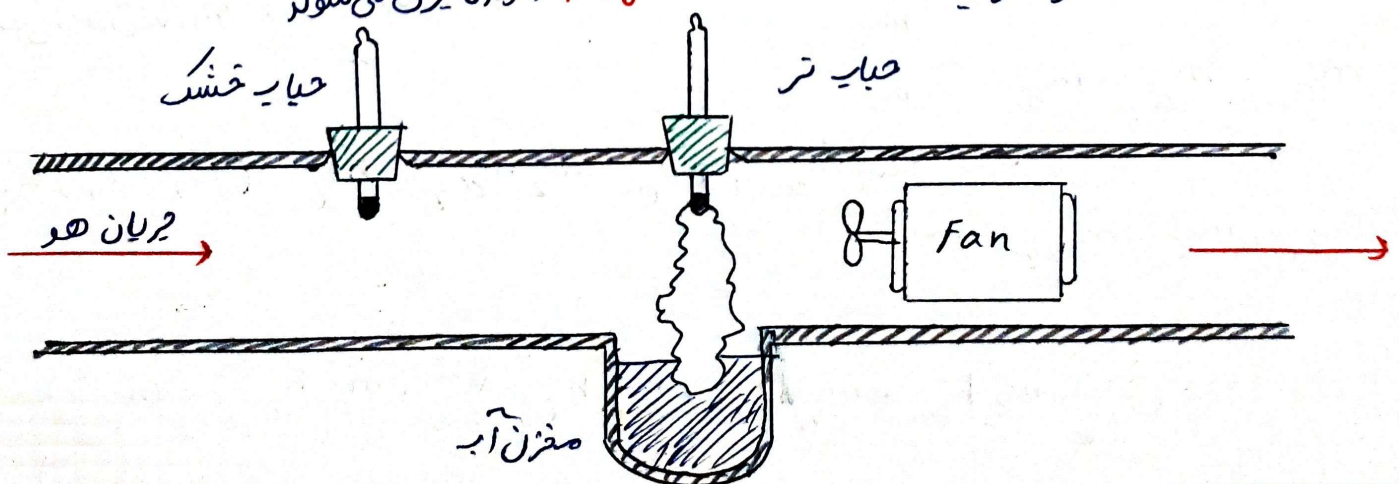
$$h_{a2} - h_{a1} = C_{p0} (T_2 - T_1) \quad , \quad h_{v2} - h_{e2} = h_{g2} - h_{f2} = h_{fg2}$$

$$\omega_1 = \frac{C_{p0} (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg2}}{h_{v1} - h_{e2}} \quad , \quad \omega_2 = 0.622 \frac{P_{v2}}{P_2 - P_{v2}} = 0.622 \frac{P_{g2}}{P_2 - P_{g2}}$$

یا محاسبه رطوبت مطلق ω ، P_{v1} و P_{g1} بدست آمده پس رطوبت نسبی ϕ نیز بدست می آید در واقع هدف از اندازه گیری دما اشباع آریا یا تیک اندازه گیری رطوبت هوا است، مهم ترین نکته در باره فرایند اشباع این است که درجه حرارت اشباع آریا یا تیک یعنی درجه حرارت مخلوط هنگامی که از مجرا خارج می شود تابعی از فشار، درجه حرارت و رطوبت نسبی مخلوط هوا - بخار آب و فشار فروبی است، «
 $L =$ دمای خنک دمایی است که در مسیح معمولی اندازه گیری می کنند.»

- دمای خنک تر یا مرطوب: «

رطوبت مخلوط هوا بخار آب را معمولاً از راه های خنک مرطوب و خنک بدست می آوریم که این راه ها با استفاده از دستگاه سایکرومتر یا **Psychrometer** اندازه گیری می شوند



حباب یک ماسنج را با پدیده خیس می‌پوشانیم و در معرض جریان هوای محیط قرار می‌دهیم، اگر هوا اشباع نباشد در ابتدا مقداری آب با جذب حرارت از بقیه آب تبخیر شده رهای آب پایین می‌آید، با ایجاد اختلاف دما بین آب و هوای عبوری گرما از هوا به صورت جابجایی به آب منتقل می‌شود، در این حالت گرمای نهان لازم برای تبخیر آب از بقیه آب و هوای عبوری تعیین می‌شود، با ادامه این فرایند آب سردتر شده و در نتیجه اختلاف دمای آب و هوا در نتیجه انتقال حرارت از هوا به آب افزایش می‌یابد، انقدر دمای آب پایین می‌آید که حرارت جذب شده از هوای گرمای صرف شده جهت تبخیر آب برابری شود، از این لحظه به بعد دما تغییر نمی‌کند، دمای که - ماسنج در این لحظه نشان می‌دهد همان دمای حباب تر است.

دمای حباب تر همواره از دمای حباب خشک کمتر است زیرا در اثر تبخیر آب دمای آب پایین تر خواهد شد، مگر اینکه هوا از همان ابتدا اشباع باشد که در این صورت آبی تبخیر نشده و دما برابر دمای حباب خشک می‌شود.

$$\omega = \frac{C_{p_o} (T_{wb} - T_{db}) + \omega_{wb} (h_{fg})_{wb}}{(h_v)_{db} - (h_f)_{wb}}$$

یادداشتن دمای حباب خشک و تر می‌توان رطوبت هوا را اندازه گرفت، دمای حباب خشک، دمای حباب تر و دمای شبنم همواره اشباع و یا یکدیگر برابرند.

مثال 18) دمای حباب خشک و تر هوا با فشار 1 atm به ترتیب 25°C و 15°C اندازه گیری شده، رطوبت مخصوص

و رطوبت نسبی هوا را محاسبه کنید؟

$$T_{wb} = 15^\circ C \xrightarrow{B11} P_{gwb} = 1.705 \text{ kPa}$$

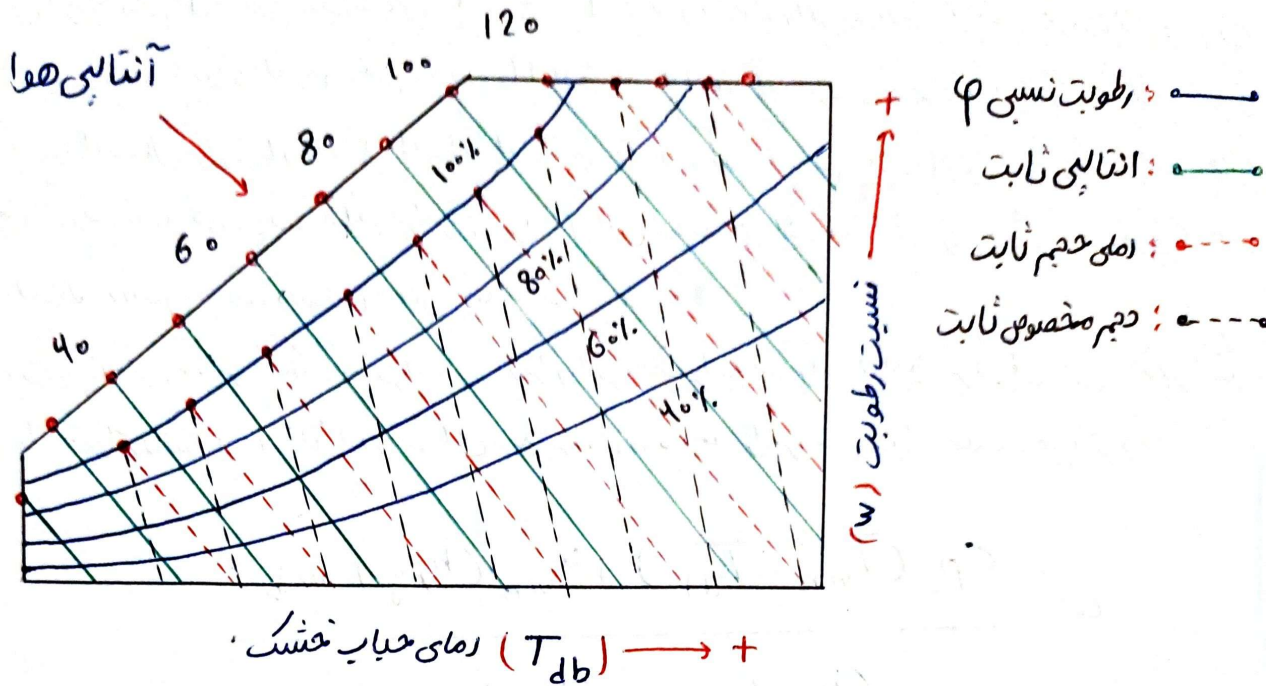
$$\omega_{wb} = 0.622 \frac{P_{gwb}}{P_2 - P_{gwb}} = 0.622 \frac{1.705}{101.325 - 1.705} = 0.01068$$

$$T_{db} = 25^\circ C \Rightarrow \left. \begin{aligned} (h_v)_{wb} &= 2528.91 \\ (h_{fg})_{wb} &= 2465.93 \\ (h_e)_{wb} &= 62.98 \end{aligned} \right\}$$

$$\omega = \frac{C_{p_o} (T_{wb} - T_{db}) + \omega_{wb} (h_{fg})_{wb}}{(h_v)_{db} - (h_e)_{wb}} = 0.00653$$

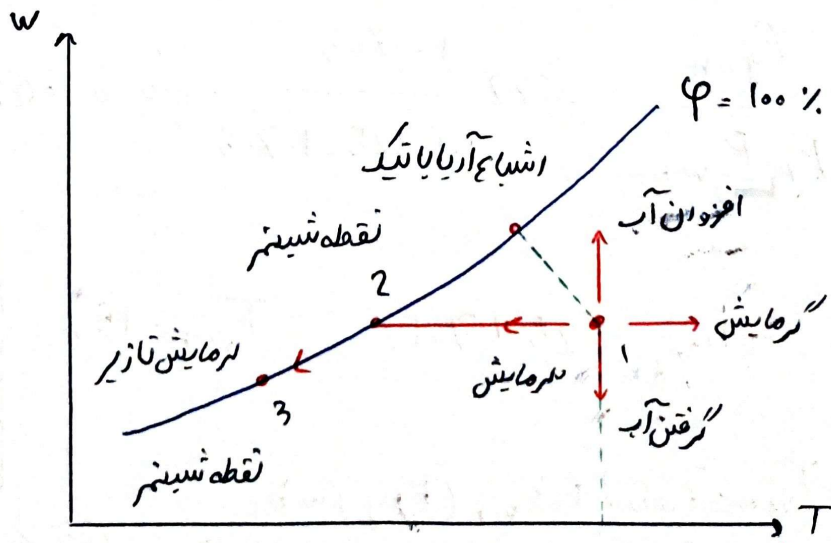
$$\omega = 0.622 \frac{P_{vdp}}{P - (P_v)_{dp}} \Rightarrow (P_v)_{db} = 1.053 \text{ kPa} \Rightarrow \varphi = \frac{P_{vdb}}{(P_g)_{dp}} = 33.28\%$$

نمودار سایکرو متریک یا رطوبت سنجی
این نمودار به شکل زیر است



برای هر فشار یک نمودار سایکرو متریک ترسیم شده و با تغییر فشار نمودار تغییر نمی کند ، با داشتن رطوبت و توان سایر خواص را از نمودار بدست آورد ، خطوط انتالی ثابت و رطوبت ثابت تقریباً برابرند کاربرد اصلی این نمودار در تهویه مطبوع می باشد ، همچنین این نمودار نشانگر ناحیه آسایش انسان نیز هست یعنی محدوده شرایطی که امید افراد در آن احساس آسایش می کنند ، یک دستگاه تهویه مطبوع باید بتواند محیط را در ناحیه آسایش تنظیم کند بدون توجه به آنکه شرایط اتمسفر خارج چیست ، حتی که فرایند یک مخلوط هوا - بخار آب طی می کند روی نمودار زیر نشان داده شده

از آنجایی که مربع صفر نمودارهای مختلف فرق دارد مقادیر انتالی در نمودارهای مختلف می تواند متفاوت باشد



برمایش خشک ثابت که در حالت یک انماز می شود یا نسبت رطوبت ثابت بیش می رود تا به نقطه شبنم در حالت روبرس برمایش تازیر چه حرارت کمتر از این رجه حرارت با حرکت در روی خط اشباع تا حالت سونر ادامه می یابد

- فرایند های سایکروتریک «

(1) **برمایش تیغیری**: دمای مرطوب ثابت و آنتالپی نیز تقریباً ثابت، اگر رطوبت نسبی هوای محیط فوهی بالا یا بلند برمایش تیغیری همداکار ساز نیست، زیرا پس از طی فرایندی کوتاه هوا اشباع شده و دیگر خنک کاری تیغیری انجام می شود «

(2) **برمایش محسوس**: رطوبت ثابت و دمای شیب نیز ثابت، اگر رطوبت نسبی هوای محیط خیلی بالا باشد تا قبل از رسیدن به هوای اشباع برمایش محسوس را بر و پس از آن برمایش همراه **رطوبت گیری** خواهد بود، در برمایش مخصوص رطوبت نسبی افزایش می یابد «

(3) **گرمایش محسوس**: رطوبت مطلق ثابت، دمای شیب نیز ثابت و در این فرایند رطوبت نسبی کاهش می یابد «



روابط ترمودینامیکی

فصل سوم

برخی از خواص را نظیر انرژی داخلی و آنترپی را نمی توان مستقیماً اندازه گیری کرد و باید با استفاده از راه های تجربی آنها را محاسبه کرد، اما تنها چهار خاصیت را می توان مستقیماً اندازه گیری کرد مثل فشار، دما، حرارت و حجم. هدف در این فصل یافتن روابطی برای تعیین خواص غیر قابل اندازه گیری مثل آنتالپی و آنترپی است و نکته مهم این است که برخی از روابط برای تغییر فاز و برخی فقط برای یک فاز مشخص کاربرد دارند «

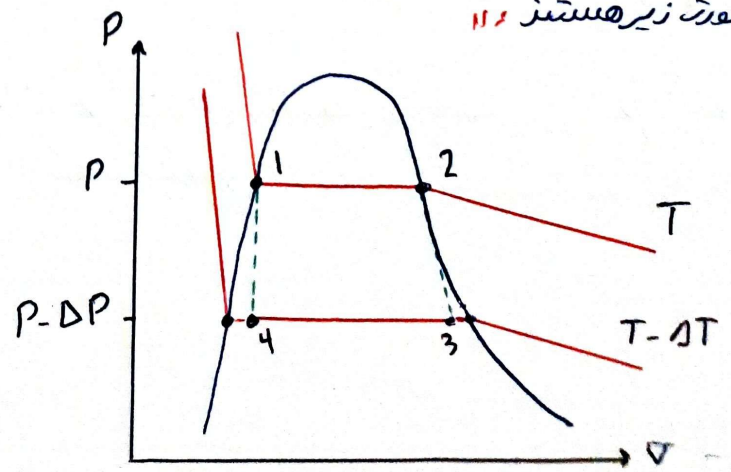
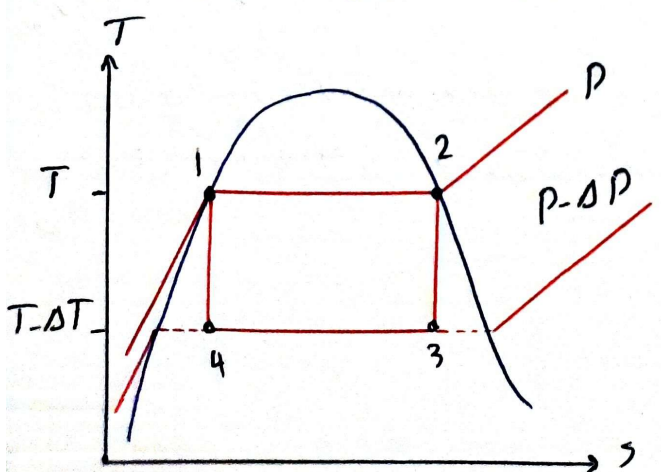
- معادله کلا پیرون «

در محاسبه خواص ترمودینامیکی نظیر آنتالپی یا آنترپی بر حسب دیگر خواص که می توان اندازه گرفت محاسبات به دو گروه وسیع تقسیم می شود که عبارتند از «

(1) اختلاف خواص بین فاز های مختلف «

(2) تغییرات در یک فاز همگن منفرد «

یک سیکل کارنو موقود حرارتی را در نظر بگیرید که با اختلاف ناچیز درجه حرارت بین دو منبع T و $T - \Delta T$ کار می کند فشار اشباع مربوط به هر درجه حرارت P و $P - \Delta P$ است، سیکل کارنو یا وسیله حالت پایدار کار می کند، در فرایندهای انتقال حرارت درجه حرارت بالا، سیال مایع از حالت مایع اشباع در 1 به بخار اشباع در 2 تغییر می کند که به صورت زیر هستند «



برای انتقال حرارت بازگشت پذیر را ببینیم ۱۱۶

$$q_H = T s_{fg} \quad , \quad q_L = (T - \Delta T) s_{fg}$$

$$W_{net} = q_H - q_L = \Delta T s_{fg} = h_{fg} \rightarrow s_{fg} = \frac{h_{fg}}{\Delta T}$$

$$w = - \int v dp$$

$$W_{net} = 0 - \int_2^3 v dp + 0 - \int_4^1 v dp = - \left(\frac{v_2 + v_3}{2} \right) (P - \Delta P - P) - \left(\frac{v_1 + v_4}{2} \right) (P - P + \Delta P)$$

$$\approx \Delta P \left[\left(\frac{v_2 + v_3}{2} \right) - \left(\frac{v_1 + v_4}{2} \right) \right]$$

به دلیل کوچک بودن v یک مقدار متوسط در نظر گرفته و از انتگرال خارج می‌کنیم ۱۱۷

هر قدر که ΔP کوچکتر باشد تقریب بهتر است ۱۱۸

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} \approx \frac{s_{fg}}{\left(\frac{v_2 + v_3}{2} \right) - \left(\frac{v_1 + v_4}{2} \right)} \quad , \quad \Delta T \rightarrow 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} v_3 \rightarrow v_2 = v_g \\ v_4 \rightarrow v_1 = v_f \end{array} \right.$$

$$\lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{dP_{sat}}{dT} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}} \rightarrow q_H = h_{fg} = T s_{fg} \rightarrow \frac{dP_{sat}}{dT} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}} = \frac{h_{fg}}{T v_{fg}}$$

این معادله به معادله کلایپرون موسور است و برای اندازه گیری انتالپی و انترالپی استفاده می‌شود. T, P و v خواص هستند که به راحتی می‌توان اندازه گرفت و با استفاده از آنها می‌توان مقادیر انتالپی و انترالپی را بدست آورد ۱۱۹

مثال 19) فشار اشباع بخار آب در $F = 70$ - را از راه های موجود در جدول های بخار بدست آورید. جهت کنترل آب می باشد. \therefore
 جدول 4-7-F فشار اشباع برای درجه حرارت های کمتر از $400^\circ C$ درجه نشده است. \therefore

$$\int_1^2 \frac{dP}{P} = \int_1^2 \frac{h_{ig}}{R} \frac{dT}{T^2} = \frac{h_{ig}}{R} \int_1^2 \frac{dT}{T^2}$$

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{h_{ig}}{R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

$$P_2 = 0.00019 \frac{\text{bf}}{\text{in}^2}, \quad T_2 = 419.7 R, \quad T_1 = 389.7 R$$

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{1218 \times 778}{85.76} \left(\frac{419.7 - 389.7}{419.7 \times 389.7} \right) = 2.0279$$

$$P_1 = 0.000025 \frac{\text{bf}}{\text{in}^2}$$

- روابط ریاضی برای یک فاز هگن \therefore

در انجمن که در یک فاز هگن هر خاصیت تابعی از خاصیت شش است \therefore

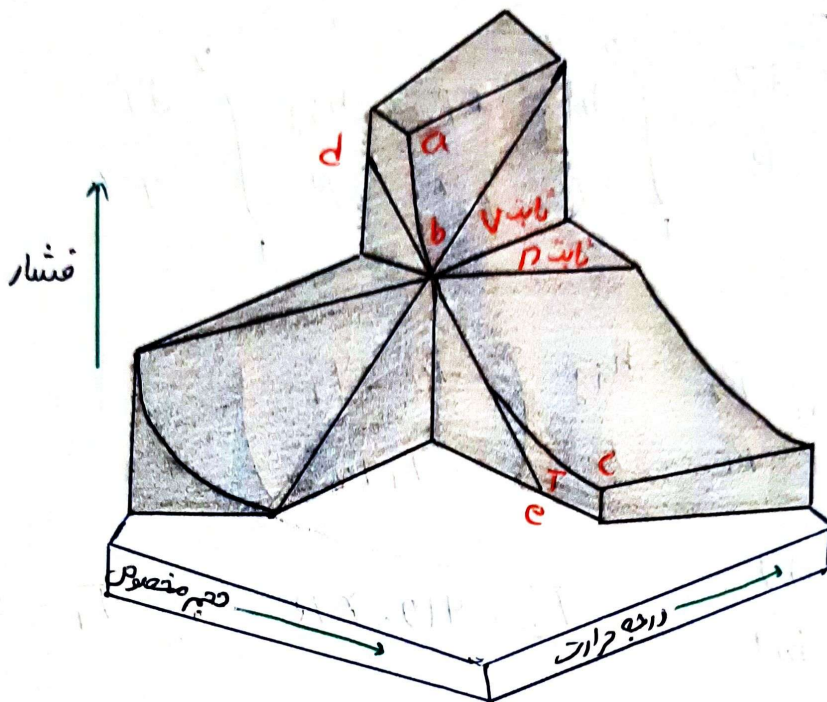
$$z = f(n, y) \Rightarrow dz = \left(\frac{\partial z}{\partial n} \right)_y dn + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_n dy$$

$$\rightarrow dz = M dn + N dy$$

$$\left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)_n = \left[\frac{\partial \left(\frac{\partial z}{\partial n} \right)_y}{\partial y} \right]_n = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial n}, \quad \left(\frac{\partial N}{\partial n} \right)_y = \left[\frac{\partial \left[\frac{\partial z}{\partial y} \right]_n}{\partial n} \right]_y = \frac{\partial^2 z}{\partial n \partial y}$$

مشتقات جزئی در تعادل روابط ترمودینامیکی فاز های هگن از طریق رفرانسیل کامل بینبار مفید هستند \therefore

اهمیت فیزیکی مشتقات جزئی را در زمانی که به خواص ماده خالص مربوط می گردند می توان با مراجعه به شکل زیر تشریح کرد:



سطح $P-V-T$ بالا ناحیه بخار مافوق گرم یک ماده خالص است و سطوح درجه حرارت ثابت، فشار ثابت و حجم مخصوص ثابت را که در نقطه b روی سطح با هم تقاطع می کنند، نمایش می دهد. لذا مشتق جزئی $(\frac{\partial P}{\partial V})_T$ شبیه منحنی abc در نقطه b می باشد و خط de نمایانگر محاس بر منحنی abc در نقطه b است. «
 حال اگر n و y و z همگی توابع نقطه ای باشند (یعنی کمپای که فقط بستگی به حالت دارند و مستقل از مسیر هستند) آنگاه دیفرانسیل ها رقیق هستند و داریم:»

$$\frac{\partial^2 z}{\partial n \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial n} \longrightarrow \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_n = \left(\frac{\partial n}{\partial n} \right)_y$$

$$n = n(y, z) \longrightarrow dn = \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_z dy + \left(\frac{\partial n}{\partial z} \right)_y dz$$

$$y = y(n, z) \longrightarrow dy = \left(\frac{\partial y}{\partial n} \right)_z dn + \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)_n dz$$

$$dn = \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial n} \right)_z dn + \left[\left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)_n + \left(\frac{\partial n}{\partial z} \right)_y \right] dz$$

$$\left[1 - \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial n} \right)_z \right] dn = \left[\left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)_n + \left(\frac{\partial n}{\partial z} \right)_y \right] dz$$

نکته حائز اهمیت این است که n و 2 مستقل هستند پس می توان یکی را ثابت نگه داشت در حالی که پارامتر دیگر تغییر می کند، حال در اینم n

$$\Rightarrow dz = 0, dn \neq 0 : \left(\frac{\partial n}{\partial y}\right)_2 \left(\frac{\partial y}{\partial n}\right)_2 = 1 \Rightarrow \left(\frac{\partial n}{\partial y}\right)_2 = \frac{1}{\left(\frac{\partial y}{\partial n}\right)_2}$$

$$\Rightarrow dn, dz \neq 0 : \left(\frac{\partial n}{\partial y}\right)_2 \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_n = - \left(\frac{\partial n}{\partial z}\right)_y = \frac{-1}{\left(\frac{\partial z}{\partial n}\right)_y}$$

رابطه سیبکی : $\left(\frac{\partial n}{\partial y}\right)_2 \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_n \left(\frac{\partial z}{\partial n}\right)_y = -1$

- روابط ماکسول ۱۱

یک چرخ کنترل تراکم پذیر ساده با ترکیب شیمیایی ثابت را در نظر بگیریم، روابط ماکسول را می توان برای چنین سیستمی به صورت چهار معادله نوشت که خواص s, T, v, p را به هم مرتبط می سازند، این معادلات برای محاسبه انترپی بر حسب سایر خواص قابل اندازه گیری مفید هستند، روابط زیر را به روابط گیبس موسوم هستند به شرح زیر هستند n

$$du = T ds - p dv, \quad dh = T ds + v dp$$

انترپی را به عنوان خاصیت مستقل با معرفی دو خاصیت جدید حذف می کنیم و تابع هامیبولتز را بدست می آوریم n

$$a = u - Ts \rightarrow da = du - T ds - s dT = -p dv - s dT$$

دومین خاصیت جدید تابع گیبس است n

$$g = h - Ts \rightarrow dg = dh - T ds - s dT = -s dT + v dp$$

حال روابط ماکسول را بدست می آوریم n

$$dz = m dn + n dy, \quad \left(\frac{\partial m}{\partial y}\right)_n = \left(\frac{\partial n}{\partial m}\right)_y$$

$$1) \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s = - \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_v \quad 2) \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p$$

$$3) \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T \quad 4) \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = - \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T$$

این چهار معادله موسوم به معادلات مکسول برای سیستم تراکم پذیر ساده می باشند. باید توجه داشت که فشار درجه حرارت و حجم مخصوص را می توان با روش های تجربی اندازه گرفت ولی انتروپی را نمی توان به صورت تجربی نمی توان اندازه گرفت. با استفاده از روابط مکسول امکان تعیین تغییرات انتروپی به کمک کمیت های قابل اندازه گیری یعنی فشار، درجه حرارت و حجم مخصوص فراهم می گردد. روابط سوم و چهارم مکسول از اهمیت بیشتری برخوردار است زیرا در این روابط S یک طرف و T, V, P کمیت هایی که اندازه گیری آنها راحت تر است در سمت دیگر قرار دارند. رابطه سوم از چهارم بهتر است زیرا در بیشتر موارد تغییرات فشار بر حسب دما و وجه راه می شود. چند رابطه کمکی به شرح زیر است: //

$$M = \left(\frac{\partial z}{\partial n} \right)_y \longleftrightarrow N = \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_n$$

$$1) T = \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v, P = - \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_s \quad 2) T = \left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_p, v = \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_s$$

$$3) P = - \left(\frac{\partial a}{\partial v} \right)_T, s = - \left(\frac{\partial a}{\partial T} \right)_v \quad 4) v = \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right)_T, s = - \left(\frac{\partial y}{\partial T} \right)_p$$

مثال 20) اعتبار آخرین رابطه مکسول را برای بخار آب در $25^\circ C$ و 300 kPa نشان دهید؟

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = - \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T \Rightarrow \left(\frac{\Delta v}{\Delta T} \right)_{300 \text{ kPa}} = - \left(\frac{\Delta s}{\Delta p} \right)_{25^\circ C}$$

$$\left(\frac{\Delta v}{\Delta T} \right)_{300 \text{ kPa}} = \left[\frac{v_{300^\circ C} - v_{200^\circ C}}{(300 - 200)^\circ C} \right]_{300 \text{ kPa}} = \frac{0.87529 - 0.71692}{100} = 0.00159 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\left(\frac{\Delta s}{\Delta p} \right)_{25^\circ C} = \left[\frac{s_{400 \text{ k}} - s_{200 \text{ k}}}{(400 - 200) \text{ kPa}} \right]_{25^\circ C} = \frac{7.3788 - 7.2085}{200} = -0.00165 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$0.00159 \approx 0.00165 \Rightarrow 4\% \text{ Error}$$

- رابطه‌ی کلی برای محاسبه تغییرات انرژی داخلی، انتالی و انترپولی

= تغییرات انرژی داخلی

$$u(T, v) = u \Rightarrow du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv$$

$$\Rightarrow du = c_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv$$

$$s = s(T, v) \rightarrow ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T dv \rightarrow du = T ds - p dv$$

$$du = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v dT + \left[T \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T - p \right] dv$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v = \frac{c_v}{T} \rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T - p$$

رابطه‌ی سوم
ماکسول

$$du = c_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv \Rightarrow du = c_v dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$$

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT + \int_{v_1}^{v_2} \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$$

= تغییرات انتالی

$$h = h(T, p) \Rightarrow dh = c_p dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp$$

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT + \int_{p_1}^{p_2} \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp$$

زیرا معمولاً ابتدا تغییرات انتالی را بدست آورده سپس انرژی داخلی را محاسبه می‌کنیم

$$h_2 - h_1 = u_2 - u_1 + (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$s = s(T, v) \rightarrow ds = \frac{c_v}{T} dT + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \quad \text{تغییرات انتروپی}$$

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v}{T} dT + \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$$

$$s = s(T, p) \rightarrow ds = \frac{c_p}{T} dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT + \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

مثال (2) در محدوده کوچک و مشخصی از فشار و دما معادله حالت یک ماده خاص با رقت خوبی توسط رابطه $v = \frac{RT}{p} - \frac{c}{T^3}$ داده شده که در آن c ثابت است، عبارتی برای محاسبه تغییرات انتالپی و انتروپی این ماده را در فرایندی دما ثابت بیابید؟

$$T = c \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = 0$$

$$(h_2 - h_1)_T = 0 + \int_{p_1}^{p_2} \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp_T \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p} + \frac{3c}{T^4}$$

$$(h_2 - h_1)_T = \int_{p_1}^{p_2} -\frac{4c}{T^3} dp_T = \frac{-4c}{T^3} (p_2 - p_1)_T$$

$$(h_2 - h_1)_T = \int_{p_1}^{p_2} \left[v - T \left(\frac{R}{p} + \frac{3c}{T^4} \right) \right] dp_T = \int_{p_1}^{p_2} \left[\frac{RT}{p} - \frac{c}{T^3} - \frac{RT}{p} - \frac{3c}{T^3} \right] dp_T$$

$$(s_2 - s_1)_T = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp_T = - \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{R}{p} + \frac{3c}{T^4} \right) dp_T$$

$$(s_2 - s_1)_T = -R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_T - \frac{3c}{T^4} (p_2 - p_1)_T$$

- انبساط پذیری حجمی و تراکم پذیری آدیاباتیک و هم‌رما //

ضریب انبساط طولی جامدات یا اصطلاحاً ضریب انبساط خطی نشان می‌دهد که طول یک جسم جامد چگونه در حین ثابت بودن فشار، تحت تاثیر تغییر درجه حرارت قرار می‌گیرد. بر اساس مشتقات جزئی **ضریب انبساط طولی جامدات** به صورت زیر تعریف می‌شود: //

$$\delta_T = \frac{1}{L} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_P$$

ضریب مشابهی برای تغییرات حجمی تعریف می‌توان به دست آورد که این ضریب را **انبساط پذیری حجمی** برای مایعات و گازها می‌نامند که نهایتاً اثر تغییر حجمی به دلیل تغییر درجه حرارت در حین ثابت ماندن فشار است که عبارت است از: //

$$\alpha_P = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = 3 \delta_T$$

قابلیت تراکم پذیری هم‌رما β_T بیانگر تغییر حجم ناشی از تغییر فشار در درجه حرارت ثابت است که تعریف - **تراکم پذیری هم‌رما یا ثابت** به صورت زیر است: //

$$\beta_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad \text{و} \quad \beta_T = -V \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T$$

ضریب **تراکم پذیری آدیاباتیک** نمایش دهنده تغییر حجم نمایش از تغییر فشار در انترپوی ثابت می‌باشد و به شکل زیر تعریف می‌گردد: //

$$\beta_S = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_S$$

مدول حجمی آدیاباتیک عکس تراکم پذیری آدیاباتیک است: //

$$\beta_S = -V \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_S$$

هم‌انبساط حجمی و هم‌تراکم پذیری هم‌رما، از خواص ترمودینامیکی مایه‌اند و برای مواد تراکم پذیر ساده تابعی از هر دو خاصیت مستقل هستند. //

به مثال صفحه بعدی وقت کنید //

مثال 22) فشار وارد بر یک مکعب مسی به گرم 1 kg طی فرایندی برگشت پذیر از فشار 0.1 تا 100 MPa افزایش می دهد. وی درجه حرارت در 15°C ثابت نگه داشته می شود، کار انجام شده بر مس تغییر انتروپی به ازای هر کیلوگرم مس، تغییر انتروپی به ازای هر کیلوگرم مس، انتقال حرارت تغییر انرژی داخلی در هر کیلوگرم را برای این فرایند تعیین کنید؟

$$\alpha_p = 0.5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}, \quad \beta_T = 8.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}, \quad \nu = 0.000114 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\beta_T = -\frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial p} \right)_T \rightarrow d\nu_T = -\nu \beta_T dp_T \Rightarrow w = \int_1^2 p d\nu$$

$$w = - \int_1^2 \nu \beta_T p dp_T = \frac{-\nu \beta_T}{2} (p_2^2 - p_1^2)$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T = - \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right) = - \frac{\nu}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_p = -\nu \alpha_p$$

$$ds_T = -\nu \alpha_p dp_T, \quad (s_2 - s_1) = -\nu \alpha_p (p_2 - p_1)$$

$$q = \int T dp_T = T (s_2 - s_1)_T \quad q = T (-\nu \alpha_p) (p_2 - p_1)$$

$$(u_2 - u_1) = q - w$$

$$w = - \frac{0.000114 \times 0.5 \times 10^{-5} (100 - 0.1) \times 10^6}{2} = -0.5694 \text{ J/kg}$$

$$(s_2 - s_1)_T = -0.000114 \times 0.5 \times 10^{-5} (100 - 0.1) \times 10^6 = -0.5694$$

$$q = T (s_2 - s_1) = -288.2 \times 0.5694 = -164.1$$

$$(u_2 - u_1) = q - w = -164.1 - (-4.9) = -159.2$$

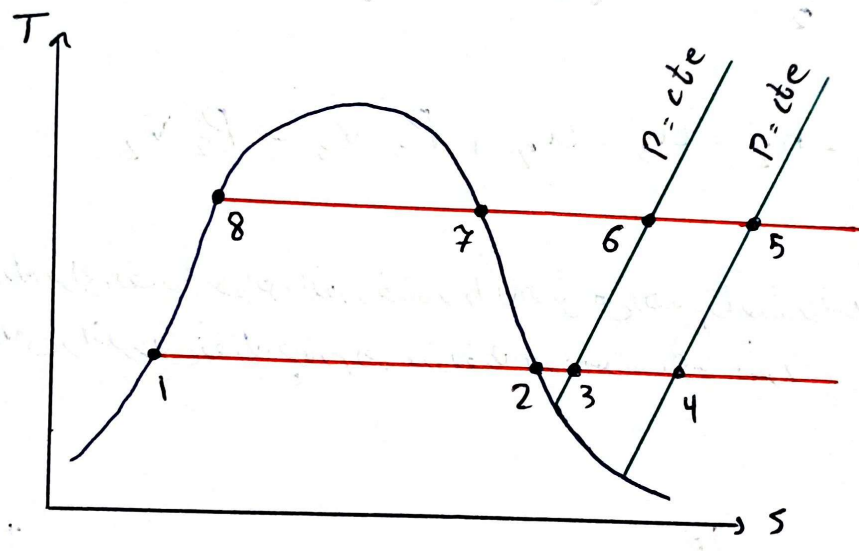
نحوه تکمیل جدول خواص ترمودینامیکی

اطلاعات موجود برای بدست آوردن جدول خواص عبارت است از: اطلاعات منحنی فشار بخار (منحنی به سمت راست) یا به فشار اشباع تبدیل می کنند، فشار، حجم مخصوص و سایر ناحیه بخار، جثالی مایع اشباع یا ما و فشار بحرانی، گرمای ویژه فشار صفر بخار، یعنی فشار گاز مورد نظر تا جایی کاهش دهیم که نزدیک صفر برسد و رفتار گاز مشابه گاز ایده آل می شود. نام های تکمیل جدول عبارتند از:

1) نام اول: بدست آوردن معادله فشار بخار با برآزش منحنی از راه های تجربی

2) نام دوم: پیدا کردن معادله حالت برای ناحیه بخار بر اساس راه های P-v-T، لازم به ذکر است که کمیت هایی که اندازه گیری می کنیم می توانند چند ضابطه ای باشند

3) نام سوم: در این نام باید انتروپی و انتالپی را محاسبه کنیم، به شکل زیر وقت کنید:



= نقطه رمای مرجع؛ نقطه ای که در آن انتالپی و انتروپی برابر صفر در نظر گرفته شده و s و h و سایر نقاط نسبت به آن نقطه سنجیده می شود، که در اینجا نقطه یک می باشد، برای آب معمولا نقطه مرجع نقطه سه گانه یا C° = 0.01 است.

=> state 2 :

$$\frac{dP_{sat}}{dT} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}} = \frac{h_{fg}}{T v_{fg}} \Rightarrow h_2 - h_1 = T_1 (v_2 - v_1) \left(\frac{dP}{dT} \right)_{sat}$$

$$\frac{dP_{sat}}{dT} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}} = \frac{h_{fg}}{T v_{fg}} \Rightarrow s_2 - s_1 = \frac{h_2 - h_1}{T_1}$$

=> state 3 :

$$dh = c_p dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \Rightarrow h_3 - h_2 = \int_{P_2}^{P_3} \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp$$

$$ds = \frac{c_p}{T} dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp \Rightarrow s_3 - s_2 = - \int_{P_2}^{P_3} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

$$u_3 - u_2 = \int_2^3 \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv_T \Rightarrow s_3 - s_2 = \int_2^3 \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$$

$$h_3 - h_2 = u_3 - u_2 + P_3 v_3 - P_2 v_2$$

= state 4 : در این نقطه برای تعیین خواص انحراف فشار را کاهش می‌دهیم تا فشار نزدیک صفر رسیده و رفتار گاز ایده‌آل شود. انتالپی و انترالپی نقطه چهارم همانند نقطه سه حساب می‌شود.

=> state 5 :

$$(h_5 - h_4) = \int_{T_4}^{T_5} c_{p_0} dT \quad , \quad (s_5 - s_4) = \int_{T_4}^{T_5} c_{p_0} \frac{dT}{T}$$

خواص نقاط 6 و 7 را همانند نقاط 4 و 5 حساب می‌کنیم. برای محاسبه خواص نقطه 8 مسابحه حالت 4 و 5 معادله کلاسیک استوار می‌کنیم.

- معادله حالت و گاز ایده آل ۱۱

معادله حالت معادله ای است که فشار، دما و حجم مخصوص یک ماده را به هم ربط می دهد. پیش تر رفتار $P-V-T$ گازها را بررسی کردیم و فریب تراکم پذیری را به صورت زیر تعریف کردیم ۱۱

معادله حالت گاز ایده آل: $PV = RT$ ، معادله حالت گاز واقعی: $PV = ZRT$ ، $Z = \frac{PV}{RT}$

فریب تراکم پذیری Z تابع دما و فشار گاز است اما چنانچه آن را بر حسب دما و فشار تبدیل یافته P_r و T_r بیان کنیم، تابعیت جنس آن برای سیالات ماده تقریباً از بین می آید ۱۱

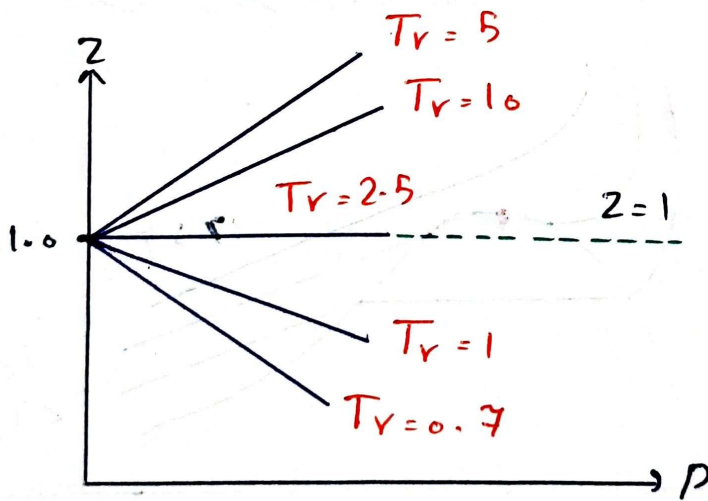
$T_r = \frac{T}{T_c}$ ، $P_r = \frac{P}{P_c} \Rightarrow Z = f(T_r, P_r)$

نمودار ۱- D تغییرات فریب تراکم پذیری Z با دما و فشار کاهش یافته را نشان می دهد که در آن ۱۱

(۱) اگر $P_r \ll 1$ ، $Z \approx 1$ ، اگر فشار خیلی کوچک باشد رفتار گاز ایده آل است ۱۱

(۲) اگر $T_r > 2$ و $P_r < 1$ ، $Z \approx 1$ ، رفتاری مشابه رفتار گاز ایده آل داریم ۱۱

به منظور یافتن انبساط بیشتر از رفتار گازهای ایده آل در حیاتی کمتر بخش کمتر فشار نمودار تراکم پذیری را بزرگنمایی می کنیم و در ادامه ۱۱



= ، دمای بویل یا $T_r = 2.5$ ، خطوط همما اساساً در این ناحیه خطوط مستقیم هستند و شیب آنها اهمیت خاصی دارد، توجه داشته باشید که شیب خطوط با افزایش T_r تا رسیدن T_r به مقدار حداکثر خود در حدود 5 افزایش می یابد، و سپس شیب خط به سمت خط $Z = 1$ برای درجه حرارت های بالاتر کمتر می شود، برای این درجه حرارت منفرد که حدود 2.5 برابر درجه حرارت بحرانی است شیب خط صفر است ۱۱

$\lim_{P \rightarrow 0} \left(\frac{\partial Z}{\partial P} \right)_T = 0$

که به عنوان درجه حرارت بویل ماده تعریف می شود ۱۱

درجه حرارت پویل تنها درجه حرارتی است که در آن گاز واقعاً رفتاری مشابه گاز ایده آل (در فشارهای محدودی که پایین هستند) از خود نشان می دهد. فریب ژول-تامسون در دمای پویل صفر نیست در حالی که برای گازهای ایده آل برابر صفر است. برای تقویت این نکته خصم یا قیما نه α را به صورت زیر تقریب می کنیم. ۱۱

$$\alpha = \frac{\bar{R}T}{P} - \bar{V}$$

معادله را در P ضرب می کنیم و داریم: ۱۱

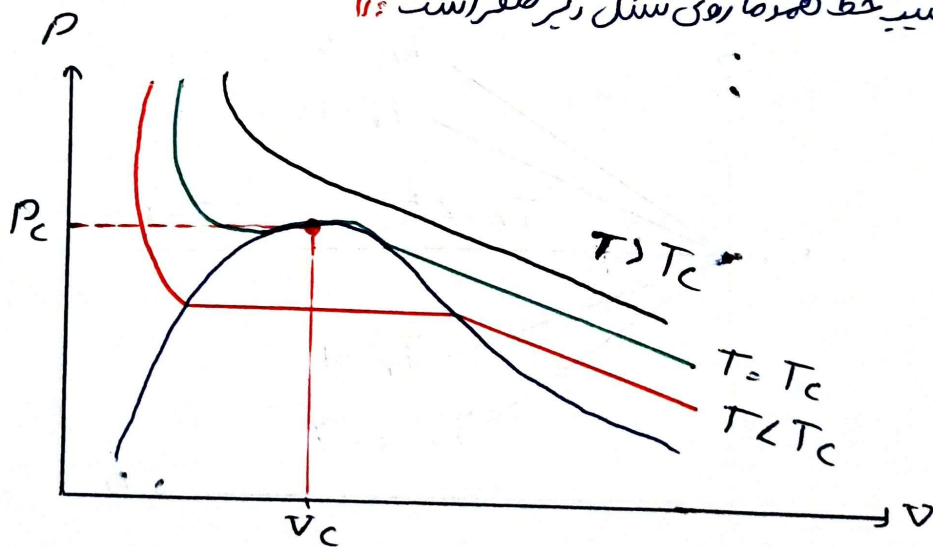
$$\alpha P = \bar{R}T - P\bar{V}$$

بنابراین کمیت αP اختلاف بین $\bar{R}T$ و $P\bar{V}$ است. حال وقتی $P \rightarrow 0$ ، $P\bar{V} \rightarrow \bar{R}T$ ، گرچه این الزامی این معنی نیست که وقتی $P \rightarrow 0$ و $\alpha \rightarrow 0$ در عوض لازم است α در مقادیر معین باقی بماند. مشتق معادله بالا به صورت زیر است: ۱۱

$$\lim_{P \rightarrow 0} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial P} \right)_T = \lim_{P \rightarrow 0} \left(\frac{Z-1}{P-0} \right)$$

$$= \lim_{P \rightarrow 0} \frac{1}{RT} \left(\bar{V} - \frac{\bar{R}T}{P} \right) = - \frac{1}{RT} \lim_{P \rightarrow 0} (\alpha)$$

این معادله بیان می دارد که تنها در درجه حرارت پویل وقتی $P \rightarrow 0$ معادله صفر خواهد شد زیرا این تنها درجه حرارتی است که برای آن شیب خط همدمار روی شکل زیر صفر است. ۱۱



یکی دیگر از جنبه های رفتار کلی گازها رفتار همدمار در مجاورت نقطه بحرانی است. اگر ما راه های تجربی را روی مختصات $P-V$ رسم کنیم روی یا بلیسم که فرایند همدمای بحرانی منحصراً فرادست زیرا به سمت خط افقی میل می کند که در نقطه بحرانی دارای نقطه انحنای است. به صورت شکل بالا، از نظر ریاضی این نکته یعنی مشتق اول در نقطه بحرانی صفر است. ۱۱

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

این شرط در بیشتر معادلات حالت رعایت می شود. ۱۱

= معادله حالت واندروالس « این معادله عبارت است از »

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}, \quad a = \frac{27R^2 T_c^2}{64 P_c}, \quad b = \frac{RT_c}{8 P_c}$$

همانطور که در مورد معادلات عمومی انتظاری بود مقادیر ثابت a و b از رفتار عمومی گازها بدست آمده اند. به طور خاص این مقادیر ثابت با توجه به این نکته تعیین می شوند که فرایندهای همدمای بحرانی در نقطه تغییر انحنای نقطه بحرانی عبور می کنند و شیب در این نقطه صفر است. لذا برای این معادله در لیم «

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = - \frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3}$$

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2} \right)_T = \frac{2RT}{(v-b)^3} - \frac{6a}{v^4}$$

نکته مهم این است که در گاز ایده آل حجم مولکول نسبت به فواصل مولکول ها قابل صرف نظر کردن است و نیروی جاذبه بین مولکولی صفر است. حال در گاز واقعی a/v^2 مربوط به نیروی جاذبه مولکولی است و b مربوط به حجم اشغالی مولکول ها است. فریب تراکم پذیری در نقطه بحرانی برای معادله واندروالس عبارت است از «

$$Z_c = \frac{P_c v_c}{RT_c} = \frac{3}{8}$$

= معادله ردلیش - کوانگ یا Redlich - kwong « این یک معادله ساده ولی تا حد قابل توجهی از معادله واندروالس دقیق تر است که در سال 1949 پیشنهاد شد »

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)T^{1/2}}$$

$$a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^{5/2}}{P_c}, \quad b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c}$$

بر دلیل سادگی این معادله وقت کافی در کنار برد و محاسبه پیش بین جدول ترمودینامیکی را ندارد «

از معادله ردلیش - کوانت در همه محاسبات مربوط به مخلوط ها و روابط همبسته تعادل فازها با موفقیت استفاده می شود ۱۰

= معادله بندیک - وب - روبین یا BWR: این معادله یکی از معروف ترین معادلات تجربی حالت است که برای اولین بار در سال ۱۹۴۰ ارائه شده و به صورت زیر است ۱۱

$$P = \frac{\bar{R}T}{\bar{v}} + \left(B\bar{R}T - A - \frac{C}{T^2} \right) \cdot \frac{1}{\bar{v}^2} + \frac{b\bar{R}T - a}{\bar{v}^3} + \frac{aa}{\bar{v}^6} + \frac{c}{\bar{v}^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2} \right) c_p \left(\frac{\gamma}{\bar{v}^2} \right)$$

این معادله به ویژه رفتار هیدروکربن های سبک را به خوبی پیش بینی می کند. این معادله هشت ثابت تجربی دارد که تابعی و از جنس گاز هستند ۱۰

= معادله حالت لی - کسلر یا Lee - Kesler: این معادله یک گونه تعامل یافته از معادله ی بازا است که در سال ۱۹۷۵ ارائه گردید. دانشمندان لی و کسلر تعداد ثابت های معادله بازا را از ۸ به ۱۲ تغییر دادند و این معادله ۱۲ ثابت دارد که عبارت های آن بر اساس خواص عمومی به شکل زیر نوشته شده است ۱۱

$$Z = \frac{P_r \bar{v}_r'}{T_r} = 1 + \frac{B}{\bar{v}_r'} + \frac{C}{\bar{v}_r'^2} + \frac{D}{\bar{v}_r'^5} + \frac{C_4}{T_r^3 \bar{v}_r'^2} \left(\beta + \frac{\gamma}{\bar{v}_r'^2} \right) e^{\left(-\frac{\gamma}{\bar{v}_r'^2} \right)}$$

$$B = b_1 = \frac{b_2}{T_r} - \frac{b_3}{T_r^2} - \frac{b_4}{T_r^3}, \quad C = c_1 - \frac{c_2}{T_r} + \frac{c_3}{T_r^3}, \quad D = d_1 + \frac{d_2}{T_r}$$

که در آن متغیر \bar{v}_r' حجم مخصوص کاهش یافته حقیقی نیست و به صورت زیر تعریف شده است ۱۱

$$\bar{v}_r' = \frac{\bar{v}}{RT_c} \cdot P_c$$

مقادیر ثابت تجربی برای سیالات ساده در جدول D-3 ضمیمه ارائه شده است ۱۰

- نمودار فرآیند تغییرات انتالپی باز و وقتی در درجه حرارت ثابت است
 معادله برای تغییر انتالپی در درجه حرارت ثابت را به صورت زیر بدست آوریم

$$(h_2 - h_1) = \int_1^2 \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P - v \right] dP_T$$

این معادله اختصاصاً در زمانی که معادله حالت حجم مشخصی را دارا باشد کاربرد دارد. به عبارت دیگر جهت ^{سه} تغییر در انرژی داخلی در یک فرایند هم امدار داریم

$$(u_2 - u_1) = \int_1^2 \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dV_T$$

باتوجه به اینکه معمولاً فشار را به صورت تابعی از بقیه پارامترها داریم بیشتر از معادله دوم استفاده می‌کنیم
 می‌توان تغییرات انتالپی را از طریق رابطه زیر بدست آورد

$$(h_2 - h_1) = (u_2 - u_1) + (P_2 v_2 - P_1 v_1) = (u_2 - u_1) + RT(z_2 - z_1)$$

جهت تغییر در رفتار انتالپی سازگار با معنی 1-D از معادله عمومی کسلس در فشار معلوم بر حسب درجه حرارت و حجم مخصوص تبعیت می‌کنیم. چون معادلات ما بر اساس فریب تراکم پذیری 2 بیان می‌شوند را داریم

$$P = \frac{zRT}{v} \Rightarrow \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v = \frac{zR}{v} + \frac{RT}{v} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_v$$

$$du = \frac{RT^2}{v} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_v dT = \frac{dv}{v} = \frac{dv_r}{v_r} \Rightarrow \frac{dT}{T} = \frac{dv_r}{v_r}$$

$$du = \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dv$$

لذا می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\frac{1}{RTc} du = \frac{T_r^2}{v_r^2} \left(\frac{\partial z}{\partial T_r} \right)_{v_r} dv_r^2$$

از این معادله در درجه حرارت ثابت در فشار و حجم مخصوص معین (P_r, V_r) و حد $P_r \rightarrow P_r^*$ و $V_r \rightarrow V_r^*$ انتگرال گرفته و برای انحراف از حالت گاز ایده آل برای تغییر انرژی داخلی خواهیم داشت ۱۱

$$\frac{u^* - u}{RT_c} = \int_{V_r}^{\infty} \frac{T_r^2}{V_r^2} \left(\frac{\partial z}{\partial T_r} \right)_{V_r} dV_r$$

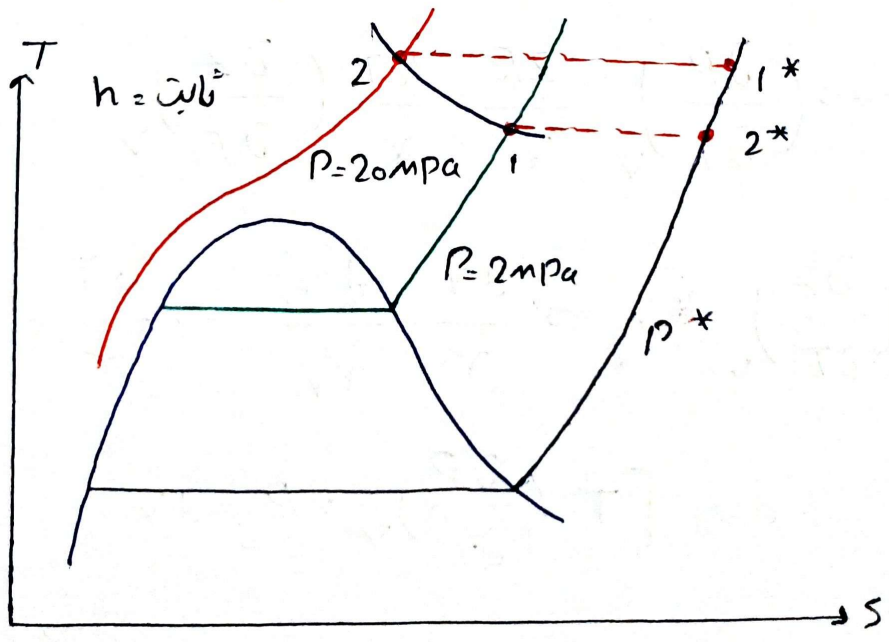
۱) عدمت * برای حالت با خاصیت گاز ایده آل به کار برده می شود. انتگرال به سمت راست معادله بالا را می توان از معادله لی-کسلیر بدست آورد. مقدار انحراف انتالپی مربوط در شرایط معلوم (P_r, V_r) از انتگرال گیری معادله بالا بدست می آید ۱۱

$$f(T_r, P_r) = \frac{h^* - h}{RT_c} = \frac{u^* - u}{RT_c} + T_r (1 - z)$$

این معادله انحراف انتالپی گاز واقعی از گاز ایده آل را می دهد. ما می توانیم معادله بالا را با راسه ثابت های سیال ساده لی-کسلیر با مقادیر انحراف انتالپی سیال ثابت مشخصی ارزیابی کرد ۱۱

مثال 23) نیتروژن از 20 mpa و -70°C تا 2 mpa یک فرایند اریا باتیک حالت پایدار، اختناق یا فشار شکن را طی می کند. درجه حرارت نهایی نیتروژن را تعیین کنید؟

در این مثال حجم کنترل شیر اختناق است. حالت ورودی: T_1, P_1 معلوم و حالت ثابت. حالت خروجی: T_2, P_2 معلوم و حالت ثابت. فرایند حالت پایدار اختناق است و همواره آن به ترم زیر است ۱۱



$$h_1 = h_2$$

در انتگرال گیری؛

با استفاده از مقادیر جدول A-2 داریم

$$P_1 = 20 \text{ MPa} \rightarrow P_{r1} = \frac{20}{3.39} = 5.9$$

$$T_1 = 203.2 \text{ K} \rightarrow T_{r1} = \frac{203.2}{126.2} = 1.61$$

$$P_2 = 2 \text{ MPa} \rightarrow P_{r2} = \frac{2}{3.39} = 0.59$$

برای تغییر انتالی در درجه حرارت ثابت داریم

$$\frac{h_1^* - h_1}{RT_c} = 2.1 \Rightarrow h_1^* - h_1 = 2.1 \times 0.2968 \times 126.2 = 78.7 \text{ kJ/kg}$$

$$\Rightarrow T_2 = 146 \text{ K} \quad h_1^* - h_2^* = C_{p0} (T_1^* - T_2^*) = 1.0416 (203.2 - 146) = 59.6 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{r2} = \frac{146}{126.2} = 1.157, \quad P_{r2} = 0.59$$

با کمک جدول انحراف انتالی و شکل D-2 داریم

$$\frac{h_2^* - h_2}{RT_c} = 0.5 \Rightarrow h_2^* - h_2 = 0.5 \times 0.2968 \times 126.2 = 19.5 \text{ kJ/kg}$$

$$(h_1 - h_2) = 0 = - (h_1^* - h_1) + (h_1^* - h_2^*) + (h_2^* - h_2) \\ = -78.7 + 59.6 + 19.5 \approx 0$$

این امتحان اساسی بوده و نتیجه می گیریم که درجه حرارت نهایی تقریباً 146 K می باشد.

- رابطه $P-v-T$ برای مخلوط گازهای حقیقی در نوروش اسالی برای بدست آوردن روابط وجود دارد که به صورت زیر است ۱۱

(6) استفاده از معادلات حالت فرم مکعبی ۱۱ این روش یک روش تجربی است که در آن مخلوط را یک گاز - فاعل فرض کرده و ثابتهای معادلات حالت را بدست می آوریم. به عنوان مثال برای معادلات واندر والس و ردلیک - کووانگ ثابت های مخلوط a_m و b_m بر حسب ثابت های هر جزء مخلوط a_i و b_i به صورت زیر داریم ۱۱

$$a_m = \left[\sum_{i=1}^N y_i a_i^{1/2} \right]^2, \quad b_m = \sum_{i=1}^N y_i b_i$$

(2) استفاده از نمودار فرآیند ۱۱ در این روش از معادله $Pv = ZRT$ استفاده می شود. برای یافتن فرایند تراکم پذیری باید فشارهای بحرانی مخلوط محاسبه شود. برای این منظور از قاعده $B \cdot hc y$ استفاده می شود ۱۱

$$(T_c)_{mix} = \sum_{i=1}^N y_i T_{ci}, \quad (P_c)_{mix} = \sum_{i=1}^N y_i P_{ci}$$

با بدست آوردن فشار و دمای بحرانی مخلوط اما و فشار کاهش یافته (T_r, P_r) مخلوط را محاسبه کردن و با مراجعه به نمودار بیوست D فرایند تراکم پذیری، انحراف انتالی و انتروپی را می یابیم ۱۱



واکنش های شیمیایی

فصل چهارم

بسیاری از مسائل ترمودینامیکی شامل واکنش های شیمیایی می باشند. از معروف ترین آنها می توان از احتراق سوخت های هیدروکربنی یاد کرد که در اغلب تغییرات توانی به کار برده می شود. ۱۱ سیستم های ما به رو نوع تقسیم بندی می شوند ۱۱

(1) سیستم های واکنشی ۱۱ سیستم هایی که در آن واکنش شیمیایی رخ داده و ماهیت مواد در آنها تغییر می کند. ۱۱

(2) سیستم های غیر واکنشی ۱۱ در این سیستم ها هیچ واکنش شیمیایی صورت نمی گیرد و این سیستم ها سیستم های هستند که تاکنون بررسی کرده ایم.

در این فصل فرایندهای درای واکنش شیمیایی و احتراق به صورت مشروح بررسی می شوند. زیرا این فرایندها در بسیاری از وسایل و دستگاه های مهندسی کاربرد دارند ۱۱

- سوخت ها ۱۱

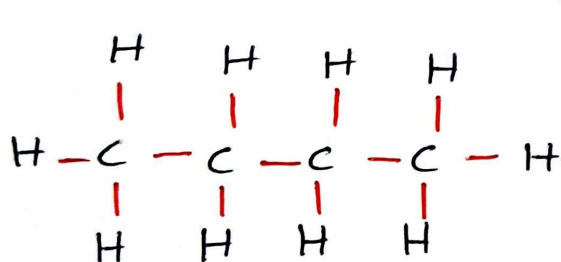
در این بخش بحث مختصری را جمع برقی سوخت های هیدروکربنی ارائه می شود ، اغلب سوخت ها در سه دسته زغال سنگ ها ، هیدروکربن های مایع و هیدروکربن های گازی ، زغال سنگ حاصل انباشته شدن گیاهان در طول دوران اولیه تاریخ است که در اثر واکنش های بیوشیمیایی فشار بالا ، درجه حرارت و باقی ماندن در زیر آب به زغال سنگ تبدیل شده اند ، مشخصه های زغال سنگ تا حد قابل توجهی وابسته به محل آن است و حتی در یک معدن نیز ترکیب آن تغییر می کند ۱۰

تجزیه نمونه های زغال سنگ بر اساس دو مینا صورت می گیرد ۱۱

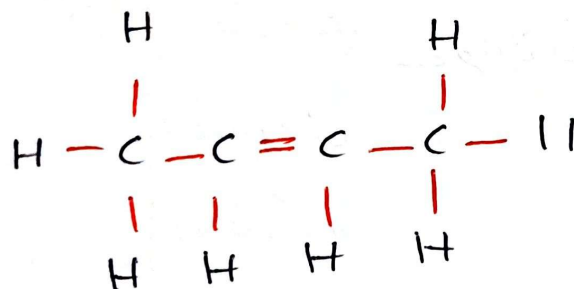
= تجزیه تقریبی بر مبنای جرمی بیانگر نسبی رطوبت ، مواد فرار ، کربن ثابت و خاکستر است ۱۰

= تجزیه نهایی بر مبنای جرمی نشان دهند مقدار نسبی کربن گوگرد هیدروژن اکسیژن و خاکستر است ۱۱

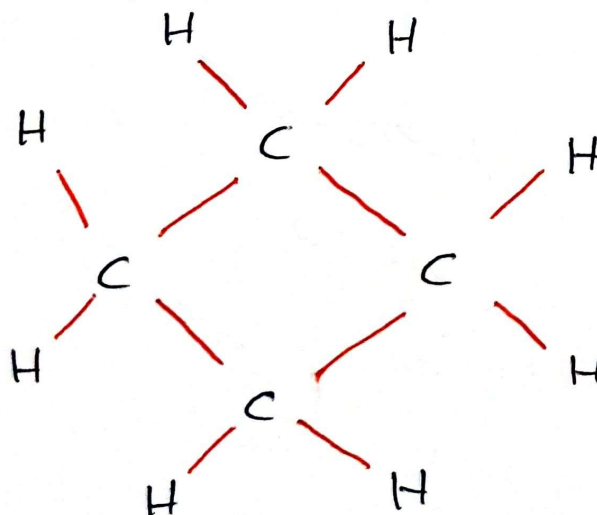
اغلب سوخت های هیدروکربنی مایع و گاز ، مخلوطی از چند هیدروکربن می باشند ، به عنوان مثال بنزین مخلوطی است از چهار هیدروکربن اصلی و برخی هیدروکربن های دیگر نیز به مقدار کم در آن وجود دارند ، سه اصطلاح را تعریف می کنیم که اولی در خصوص **ساختمان مولکولی** است که به سه نوع زیر تقسیم می شوند ۱۲



- ساختمان زنجیری اشباع -



- ساختمان زنجیری غیر اشباع -

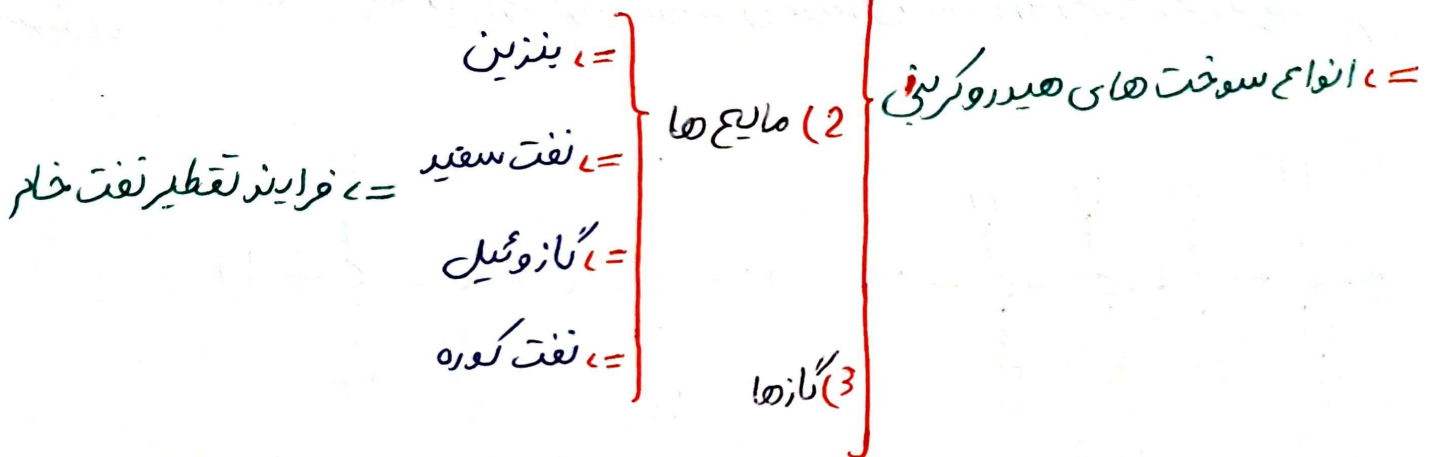


- ساختمان حلقوی اشباع -

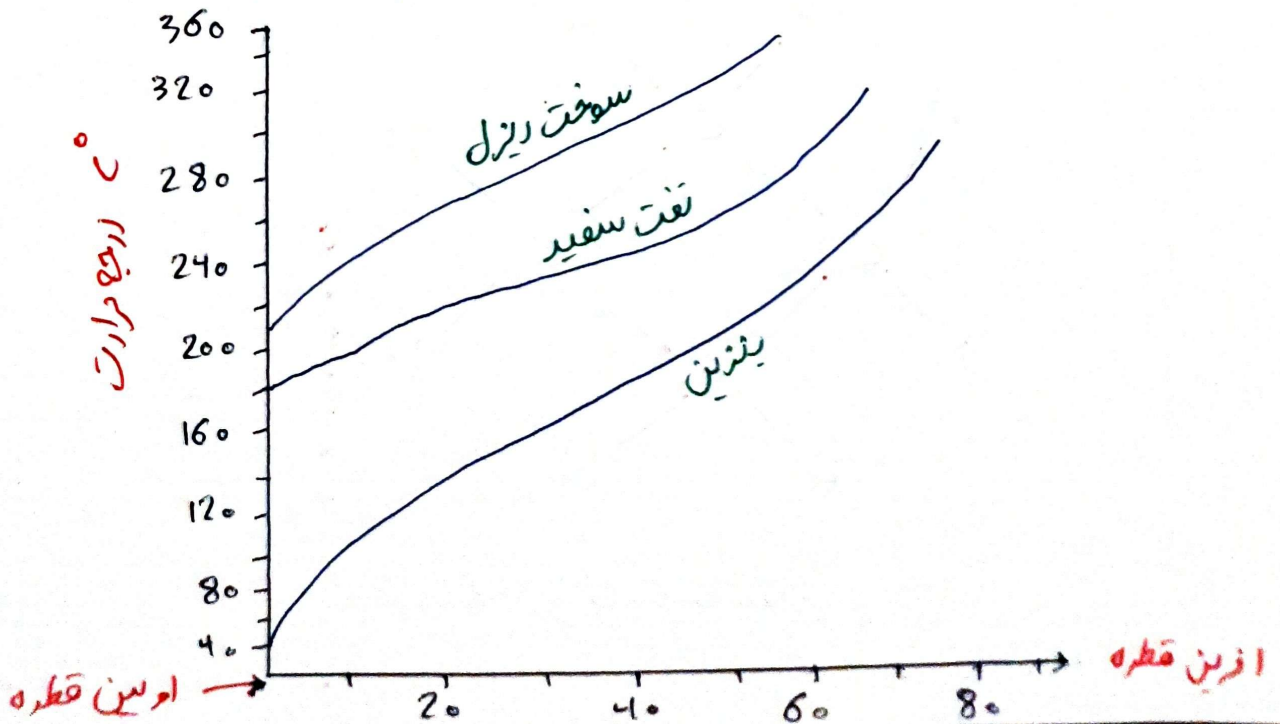
همین شکل ها تعریف هیدروکربن های اشباع و غیر اشباع را بدست می دهند ، یک هیدروکربن غیر اشباع دارای دو یا چند اتم کربن مجاور است که از طریق پیوندهای غیر اشباع روگانه یا سه گانه به هم متصل شده اند ، در حالی که هیدروکربن های اشباع دارای تنها اتم های کربن مجاور هم با پیوندهای یگانه و ساره به هم متصل هستند .

اصطلاح بعدی **ایزومر** می باشد ، دو هیدروکربن را که دارای تعداد اتم های کربن و هیدروژن یکسان - هستند ولی ساختمان های متفاوتی را اند را ایزومر می نامیم مثل **اکتان** یا C_8H_{18} بنا بر این سوخت هر ماده ای است که بسوزد و انرژی گرایی آزاد کند ، و اغلب سوخت ها در ساختار خود دارای هیدروژن و کربن هستند .

(7) جامدها ، مانند زغال سنگ که قیمت عمده آن کربن است اما شامل اکسیژن ، نیتروژن ، هیدروژن ، گوگرد ، ... نیز هست



شکل زیر منحنی نمونه تقطیر برای برخی از سوخت های هیدروکربنی است



منحنی تقطیر با گرم کردن آرام نمونه سوخت و تبخیر آن بدست می آید، هیدروکربن های فرارتر زودتر تبخیر می شوند، بنابراین درجه حرارت اجزای تبخیر نشده در طی فرایند افزایش می یابد، منحنی تقطیر که نمودار درجه حرارت اجزای تبخیر نشده در مقابل مقادیر بخارات حیالیده شده است نمایش رهنه فراریت سوخت نیز می باشد، برای احتراق سوخت های مایع معمول است که ترکیب سوخت بر حسب هیدروکربورهای منفرد بیان شود و حتی اگر مخلوطی از هیدروکربورهای متعدد باشد، لذا بنزین را C_8H_{18} یا $C_{12}H_{26}$ در نظر می گیرند، ترکیب یک سوخت هیدروکربوری را می توان بر حسب در صد کربن و هیدروژن نیز بیان کرد، او منبع اولیه هیدروکربورهای گازی عبارتند از پناه های گاز طبیعی و فرایندهای تولیدی شیمیایی خاص.

- احتراق ۵:

فرایند احتراق مشتمل بر اکسیداسیون اجزای ترکیب سوختی است که قابلیت اکسید شدن دارند و لذا می توان آن را به صورت معادله ای شیمیایی بیان کرد، در طی فرایند احتراق جرم هر عنصر ثابت باقی می ماند، بنابراین نوشتن معادلات شیمیایی و حل مسایلی که در بردارنده مقادیری از اجزای مختلف و متعدد هستند، اساساً مستلزم بقای جرم هر عنصر است، سوخت به جهت احتراق به یک **اکسید کننده** نیاز دارد که معمولاً از هوا استفاده می شود، به جهت آنالیز واکنش از آنالیز مولی استفاده می کنیم.

در محاسبات احتراق شامل هوا معمولاً از کون را در نظر نمی گیریم و فرض می کنیم هوا از ۲۱٪ اکسیژن و ۷۹٪ نیتروژن تشکیل شده است، با این فرض نیتروژن را گاهی نیتروژن اتمسفری می نامیم، این فرض منجر به این می شود که برای هر مول اکسیژن ۳.۷۶ مول نیتروژن وجود دارد، لذا وقتی اکسیژن برای احتراق متان بکار می رود داریم ۵:



مقدار مقدار هوایی که اکسیژن کافی برای احتراق کامل تمام کربن، هیدروژن و دیگر اجزا در سوخت که ممکن است اکسید شوند را تا همین می کند **هوای تقویری** نامیده می شود، یک واکنش احتراق کامل یا یک سوخت هیدروکربوری و هوا را می توان چنین نوشت ۵:



فرایند مورد استفاده در معادله را فرایند **استوکیومتری** می نامند، و تعداد کل مول های هوا برای یک مول سوخت عبارت است از ۵:

$$n_{air} = \gamma_{O_2} \times 4.76 = 4.76 (n + y/4)$$

این مقدار هوا معادل ۱۰۰٪ هوای تقویری است، با توجه ذکر است که در مایه های معمولی نیتروژن در فرایند احتراق شرکت نمی کند و تاثری در احتراق نداشته و همراه محصولات استخراج می شود، البته مقداری از انرژی از آن شده را جذب می کند، زیرا وقتی نیتروژن وارد واکنش می شود دمای آن برابر دمای محیط

است و زمانی که همراه محصولات احتراق خارج می شود اما بیش برابری با دمای محصولات احتراق نخواهد بود و این مقدار گرمایی که از فرایند احتراق جذب کرده باعث خنک شدن محصولات احتراق می شود. همچنین اگر اما خیلی با آن باشد مانند موتورهای احتراق داخلی نیتروژن با اکسیژن واکنش نشان داده و اکسیدهای نیتروژن تشکیل می شوند اما چون مقدار آن ناچیز است صرف نظر می کنیم. نکته دیگر این که در حمل هوای واکنش مرطوب است بنابراین مقداری بخار آب نیز وارد واکنش و فرایند احتراق می شود که تأثیری در فرایند احتراق ندارد.

- (1) سوخت و اکسیژن با نسبت مناسب موجود باشد.
 - (2) تماس مناسب بین سوخت و اکسیژن برقرار شود.
 - (3) سوخت تا دمای اشتعال گرم شود.
- = شرایط انجام فرایند احتراق

در حمل احتراق به صورت کامل اتفاق نمی افتد مگر آنکه هوای ورودی بیشتر از مقدار تئوری باشد. و یا کمتر مهم که اغلب برای بیان نسبت سوخت و هوا به کار برده می شود عبارتند از نسبت هوا به سوخت یا AF و نسبت سوخت به هوا یا FA است.

نسبت هوا به سوخت جرمی $AF_{mass} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$

نسبت هوا به سوخت مولی $AF_{mole} = \frac{n_{air}}{n_{fuel}}$

این کمیت به شکل زیر به وزن های مولکولی وابسته اند:

$$AF_{mass} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{n_{air} M_{air}}{n_{fuel} M_{fuel}} = AF_{mole} \frac{M_{air}}{M_{fuel}}$$

= احتراق کامل: زمانی که تمام اجزای قابل احتراق سوخت به طور کامل در فرایند احتراق بسوزند و سوخت نسوخته نمانده باشد.

= احتراق ناقص: زمانی که اجزای قابل احتراق به صورت کامل نسوزند و محصولات احتراق شامل مقداری سوخت نسوخته نشسته هستند.

علت احتراق ناقص کافی نبودن اکسیژن و تماس ناکافی اکسیژن و سوخت است، و رانیم که هوای تنوری یا استوکیومتریک حداقل هوای را در برای احتراق کامل سوخت را هوای تنوری می گوئیم،

= **احتراق واقعی** : اگر از هوای تنوری استفاده کنیم به دلیل عدم تماس کافی بین سوخت و اکسیژن، احتراق ناقص رخ می دهد و مقداری از سوخت نمی سوزد، جهت جلوگیری از احتراق ناقص باید تماس بیشتری بین اکسیژن و سوخت برقرار باشد که بدین منظور هوای بیشتری نسبت به هوای تنوری به اتاق احتراق وارد می کنیم.

= **هوای اضافی** : میزان هوای مازاد بر هوای تنوری را هوای اضافی می نامند به عنوان مثال :

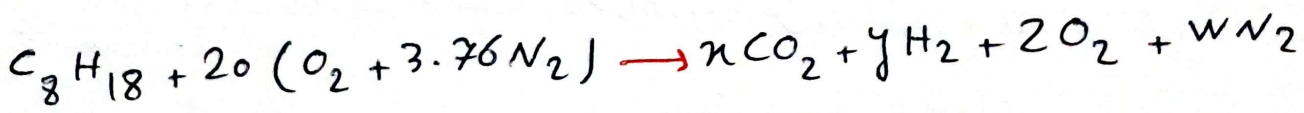
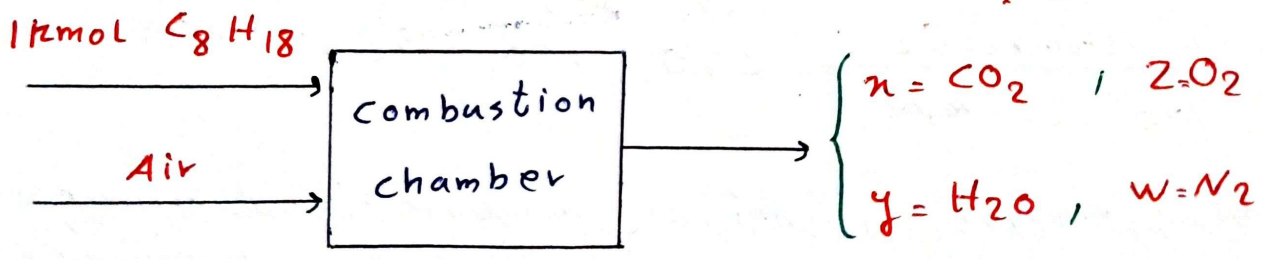
50٪ هوای اضافی ← 150٪ هوای تنوری

200٪ هوای اضافی ← 300٪ هوای تنوری

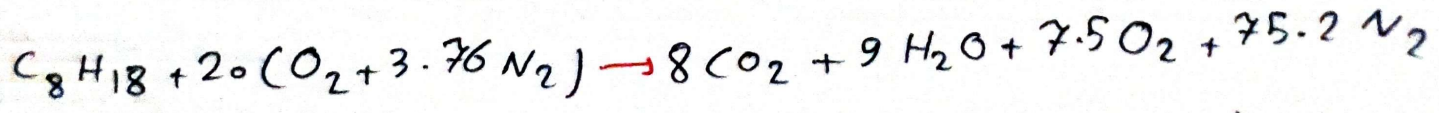
نسبت هم ارزی به صورت زیر بیان می شود :

$$\text{نسبت هم ارزی} = \frac{\text{نسبت سوخت به هوای واقعی}}{\text{نسبت سوخت به هوای تنوری}}$$

مثال 24 یک کیلو مول اتان با هوای حاوی 20 کیلو مول اکسیژن در محفظه احتراق می سوزد، اگر محصولات احتراق مطابق شکل زیر باشند، تعداد مول هر گاز از محصولات احتراق و نسبت هوا به سوخت را بدست آورید ؟



موازنه =
$$\begin{cases} C : 8 = n \rightarrow n = 8, & O : 20 \times 2 = 2n + y + 2 \rightarrow z = 7.5 \\ H : 18 = 2y \rightarrow y = 9, & N_2 = (20)(3.76) \rightarrow w = 75.2 \end{cases}$$



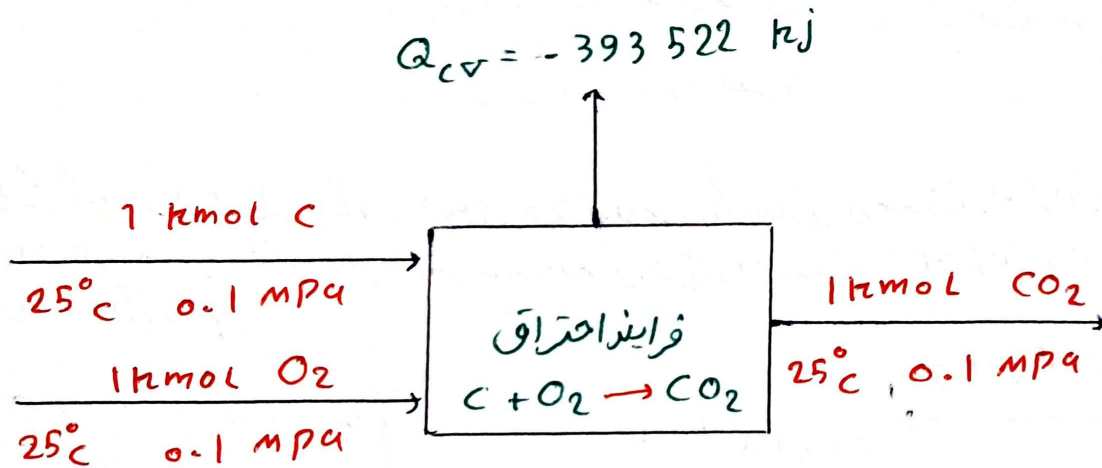
$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{(NM)_{air}}{(NM)_C + (NM)_{H_2}} = \frac{20 \times 4.76 \times 29}{8 \times 12 + 9 \times 2} = 24.2 \quad \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$

لازم است نده ای را در خصوص اهمیت شبیتم محصولات بیان کنیم، اگرهای محصولات به هر دلیلی ازهای شبیتم کمتر شود یفا آب محصولات احتراق میآید شریده آب مایع تبدیل شده و یا یفارات غیر فلزی (مثل اکسید نیتروژن، اکسید گوگرد) که در فرایند احتراق وجود دارند واکنش نشان داده و تولید اسید می کنند که باعث خوردگی تمام سطوح محفوظه احتراق و خروجی می شوند. پس باید از این راهبالاتر باشد (حتی چند رجه بالاتر ازهای شبیتم که به دلیل عمرم تعادل ترمو دینامیکی و اوقت فشارهای موضعی در برنی نقاط خوردگی رخ ندهد).

نده دیگر اینکه یفا آب در واکنش شرکت نمی کند بلکه فقط گرمای واکنشی را جذب می کند، اگر هوا مرطوب تر باشد محتوای رطوبت محصولات احتراق بیشتر از حالتی است که هوای خشک داشته باشیتم همین دلیل رهای شبیتم پیدا می کند (اگر بجای هوای مرطوب از هوای خشک استفاده شود رهای شبیتم به مقدار 59.5°C بدست می آید).

انتهایی تشکیل

برای درک روش صور استفاده برای واکنش های شیمیایی فرایند حالت پایدار احتراق ساره شکل زیر را در نظر بگیرید



این واکنش متضمن احتراق کربن جامد و گاز اکسیژن است که هر یک در 25°C و 0.1 MPa از محفظه خارج می شوند، اگر انتقال حرارت به وقت اندازه گیری شود معادل 393522 kJ/mol به ازای هر کیلوگرم از سی اکسید کربن تشکیل شده خواهد بود این واکنش را می توان بر اساس قانون اول به صورت زیر نوشت



$$Q_{cv} + H_R = H_P \rightarrow Q_{cv} + \sum_R n_i \bar{h}_i = \sum_P n_e \bar{h}_e$$

فرض کنید ما مقدار صفر را به انتهایی تمام اجزا در حالت مرجع نسبت دهیم، در این حالت انتهایی صوار اولیه صفر است و

$$Q_{cv} = H_P = -393522 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} = \bar{h}_f^{\circ}$$

شرایط مرجع امای 25°C و فشار 100 kPa است، حال به حرارت آزار شده یا جذب شده هنگام تشکیل ماده مرکب از عناصر تشکیل دهنده آن هنگامی که هم ماده مرکب و هم عناصر در شرایط مرجع باشند - **آننتالپی تشکیل** می گوئیم، دلیل تقریب این قضیه این است که؛ می دانیم آننتالپی هر نقطه نسبت به یک نقطه مرجع سنجیده می شود که آن را صفر در نظر می گیریم و در جدول مختلف ممکن است این نقطه مرجع و در نتیجه آننتالپی نقاط مختلف در این جدول یا یکدیگر تفاوت داشته باشند، اما Δh ثابت است پس برای نوشتن قانون اول ترمودینامیک به مشکل بر نمی خوردیم، در واکنش های شیمیایی ماهیت استفاده کرد، برای حل این مشکل آننتالپی تمام عناصر در شرایط مرجع را صفر در نظر می گیریم و بر این اساس می توان قانون اول ترمودینامیک را برای واکنش های شیمیایی نوشت، برای محاسبه آننتالپی تشکیل در شرایط غیر مرجع داریم: **۱۱**

$$\bar{h}_{TP} = (\bar{h}_f^{\circ})_{298, 0.1\text{MPa}} + (\Delta \bar{h})_{298, 0.1\text{MPa}}$$

$$\Delta \bar{h}_{298\text{K} \rightarrow T} = \bar{h}_T - \bar{h}^{\circ}_{298\text{K}}$$

جدول A_9 یا A_{10} آننتالپی تشکیل مواد مختلف و جدول A_8 و A_9 مقادیر اختلاف آننتالپی در امای مورد نظر با آننتالپی در امای مرجع یا فرض برقراری رفتار گاز ایده آل ارائه می دهد، یا آنفویس O نشان دهنده رفتار گاز ایده آل است، Δh را باید از جدول ترمودینامیکی یا معادلات حالت پسته به نوع ماده محاسبه کرد، در عمل آننتالپی تشکیل را با طیف نوری و ترمودینامیک امای درست می آورند. **۱۰**

برخی مواد دارای چند حالت پایدار هستند **۱۱** در عمل یک حالت پایدار بوده و بقیه حالت ها شبه پایدار اند (مانند کربن که می تواند به صورت گرافیت و الماس وجود داشته باشد، در این صورت حالت پایدار را به عنوان حالت پایه با آننتالپی تشکیل صفر در نظر می گیریم). **۱۱**

از جدول A_9 بدیه می شود رواننتالپی تشکیل برای آب وجود دارد، یک آننتالپی تشکیل برای آب مایع و یک آننتالپی تشکیل برای بخار آب در حالی که برای آب در شرایط مرجع فقط به صورت مایع وجود دارد. **۱۰**

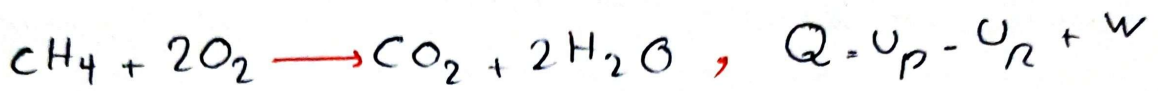
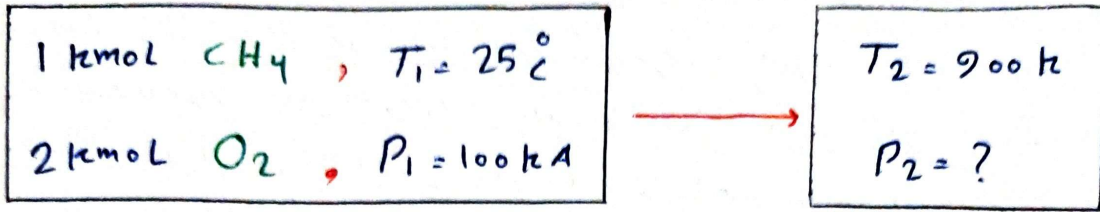
- قانون اول ترمودینامیک برای سیستم های واکنشی **۱۱**

اهمیت آننتالپی تشکیل این است که رایج ترین روش برای تحلیل قانون اول در سیستم های واکنشی است زیرا آننتالپی مواد مختلف را می توان از هم کسر یا با هم جمع کرد، می توان قانون اول را برای فرایند حالت پایدار به صورت زیر نوشت **۱۱**

$$Q_{cv} + H_R = W_{cv} + H_P \rightarrow Q_{cv} + \sum_R n_i \bar{h}_i = W_{cv} + \sum_P n_c \bar{h}_e$$

$$Q_{cv} + \sum_R n_i (\bar{h}_f^{\circ} + \Delta \bar{h})_i = W_{cv} + \sum_P n_c (\bar{h}_f^{\circ} + \Delta \bar{h})_e$$

مثال 25) مخلوطی از 1 kmol متان گازی با 2 kmol اکسیژن در ظرف صلب مطابق شکل در دمای 25°C و فشار 100 kPa قرار دارد، فرایند احتراق کامل رخ می دهد. اگر دمای نهایی محصولات 900 K باشد میزان انتقال حرارت از مخزن و فشار نهایی مخزن را بدست آورید؟



$$Q = U_P - U_R = \sum_P n_e (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} - \bar{R}T)_e - \sum_R n_i (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} - \bar{R}T)_i$$

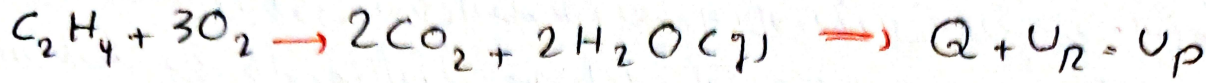
$$\sum_P n_e (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} - \bar{R}T) = (\bar{h}_f^\circ)_{\text{CH}_4(g)} - 3\bar{R}T_1 = -82311 \text{ kJ}$$

$$\sum_P n_e (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} - \bar{R}T) = (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_{\text{CO}_2} + 2(\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_{\text{H}_2\text{O}} - 3\bar{R}T = -82777 \text{ kJ}$$

$$\begin{cases} P_1 V = n_R \bar{R} T_1 \\ P_2 V = n_P \bar{R} T_2 \end{cases} \Rightarrow n_R = n_P = 3 \Rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow P_2 = 302 \text{ kPa}$$

اگر داخل محصولات احتراق یا واکنش دهنده ها فاز جامد یا مایع وجود داشته باشد، چون حجم مخصوص آنها بسیار کم است هنگام بیگذاری با $h - P\bar{v}$ از ترمبر $P\bar{v}$ صرف نظر می کنیم و $\bar{h} \approx \bar{u}$ است.

مثال ۲۶) مخلوطی از یک کیلو مول گاز اتان و سه کیلو مول اکسیژن در 25°C در یک بویل حجیم ثابت واکنش انجام می دهد، تا بر د شدن محصولات و رسیدن به 600K دما انتقال می یابد. مقدار انتقال حرارت از مواد اولیه را تعیین کنید؟
واکنش شیمیایی عبارت است از:»



$$Q + \sum_R n (\bar{h}_f^{\circ} + \Delta \bar{h} - \bar{R}T) = \sum_P n (\bar{h}_f^{\circ} + \Delta \bar{h} - \bar{R}T)$$

$$\sum_R n (\bar{h}_f^{\circ} + \Delta \bar{h} - \bar{R}T) = (\bar{h}_f^{\circ} - \bar{R}T)_{\text{C}_2\text{H}_4} - n_{\text{O}_2} (\bar{R}T)_{\text{O}_2} = (\bar{h}_f^{\circ})_{\text{C}_2\text{H}_4} - 4\bar{R}T$$

$$= 52467 - 4 \times 8.3145 \times 298.2 = 42550$$

$$\sum_P n (\bar{h}_f^{\circ} + \Delta \bar{h} - \bar{R}T) = 2 [(\bar{h}_f^{\circ})_{\text{CO}_2} + \Delta \bar{h}_{\text{CO}_2}] + 2 [(\bar{h}_f^{\circ})_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}] - 4\bar{R}T$$

$$= 2(-393522 + 12899) + 2(-241826) + 10463 - 4 \times 8.31 \times 600$$

$$= -1,243,927 \text{ kJ}$$

$$Q = -1243927 - 42550 = -1286477 \text{ kJ}$$

- رمای شعله آریاباتیک»

در یک واکنش شیمیایی با صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل، انرژی آزارشده می تواند به دو صورت صرف شود»

۱) انتقال حرارت به محیط

۲) افزایش رمای محصولات احتراق

اگر محفظه احتراق آریاباتیک باشد، تمام انرژی آزارشده صرف افزایش رمای محصولات احتراق می شود که به رمای محصولات احتراق در این شرایط رمای شعله آریاباتیک گویند.»

رهای شعله آریایاتیک ماگزیمم رهای است که در اثر یک واکنش مشخص می‌توان به آن رسید. در یک واکنش یا شرایط کاملاً مشخص رهای شعله آریایاتیک یکتا است. اما اگر سوخت مشخص باشد و بقیه شرایط واکنش مشخص نباشد. در این صورت برای حالت‌های مختلف واکنش رهای شعله آریایاتیک متفاوت است. در بین حالت‌های مختلف رهای شعله آریایاتیک زمانی ماگزیمم می‌شود که احتراق به صورت کامل و با هوای تنگ‌وی انجام شود یعنی احتراق تنگ‌وی صورت گیرد. این ماگزیمم رهای شعله آریایاتیک برای طراحی متالورژیکی محفوظه احتراق فروری است. در محفوظه احتراق هوای اضافی نقش خنک‌کن را در محفوظه احتراق ایفا می‌کند یعنی مقداری از حرارت تولیدی را جذب می‌کند و باعث کاهش رهای شعله آریایاتیک می‌شود.

(۱) حالت واکنشگرها: هرچه رهای سوخت ورودی به محفوظه احتراق بیشتر باشد رهای شعله آریایاتیک بیشتر خواهد بود.

= عوامل موثر بر رهای شعله آریایاتیک (۲) هرچه کامل بودن واکنش: هرچه واکنش کامل‌تر باشد گرمای بیشتری آزاد شده و رهای شعله آریایاتیک افزایش می‌یابد.

(۳) هوای اضافی: هرچه هوای اضافی بیشتری داشته باشیم رهای شعله آریایاتیک کاهش می‌یابد زیرا هوای تولیدی انرژی حرارتی بیشتری را جذب می‌کند.

در عمل به دلیل عمایق نبودن کامل محفوظه احتراق، کامل نبودن احتراق و استفاده از فضای اضافی و هوای اضافی به ماگزیمم رهای شعله آریایاتیک نمی‌رسیم.

- آنتالپی احتراق

اختلاف آنتالپی محصولات احتراق و مواد اولیه در احتراق کامل در فشار و رهای معین را آنتالپی احتراق گویند.

$$\bar{h}_{RP} = H_P - H_R$$

$$\bar{h}_{RP} = \sum_P n_e (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_e - \sum_R n_i (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_i$$

واحد انتالپی احتراق کیلوژول بر کیلو مول سوخت است، در معادله واکنش ضریب سوخت باید یک باشد
 انتالپی در اماها و فشارهای مختلف متفاوت است، اما انتالپی تشکیل ثابت است پس:»

$$H = H^{\circ} + \Delta H \Rightarrow H^{\circ}_R = \sum_R n_i \bar{h}^{\circ}_{f,i}, \Delta H_R = \sum_R n_i \Delta \bar{h}_i$$

$$H^{\circ}_P = \sum_P n_i \bar{h}^{\circ}_{f,i}, \Delta H_P = \sum_P n_i \Delta \bar{h}_i$$

$$H_P - H_R = H^{\circ}_P - H^{\circ}_R + \Delta H_P + \Delta H_R \Rightarrow H_P - H_R = \bar{h}^{\circ}_{RP} + \Delta H_P - \Delta H_R$$

\bar{h}°_{RP} انتالپی احتراق در شرایط مرجع است که در جدول 3-13 برای تعدادی از هیدروکربن ها امره است.»
 - انرژی داخلی احتراق:»

اختلاف بین انرژی داخلی محصولات احتراق و مواد اولیه در احتراق کامل در دمای معین و فشار معین را
 انرژی داخلی احتراق گویند.»

$$\bar{U}_{RP} = U_P - U_R = \sum_P n_e (\bar{h}^{\circ}_f + \Delta \bar{h} - p\bar{v})_e - \sum_R n_i (\bar{h}^{\circ}_f + \Delta \bar{h} + p\bar{v})_i$$

تمام گازهای اولیه و محصولات گاز ایده آل و از حجم مواد غیرگازی در برابر حجم گاز صرف نظر کنیم.»

$$\bar{U}_{RP} = \bar{h}_{RP} - \bar{R}T (n_{\text{gas product}} - n_{\text{gas reactions}})$$

- گرمای واکنش یا ارزش حرارتی:»

حرارت انتقال یافته از مصرفه احتراق طی فرایند در ما ثابت در فرایند سیستم فشار ثابت یا حجم کنترل
 یا گرمای واکنش گویند، گرمای واکنش برابر با منفی انتالپی احتراق است که به آن ارزش حرارتی
 فشار ثابت احتراق می گویند، در فرایند سیستم حجم ثابت گرمای واکنش برابر منفی انرژی داخلی
 احتراق است که به آن ارزش حرارتی حجم ثابت احتراق گویند، اگر آب موجود در محصولات احتراق
 به صورت بخار باشد به ارزش حرارتی ارزش حرارتی پایین ΔH_{HH} گویند، و اگر آب موجود در محصولات
 احتراق به صورت مایع باشد به ارزش حرارتی آن ارزش حرارتی بالا ΔH_{HH} گویند.»

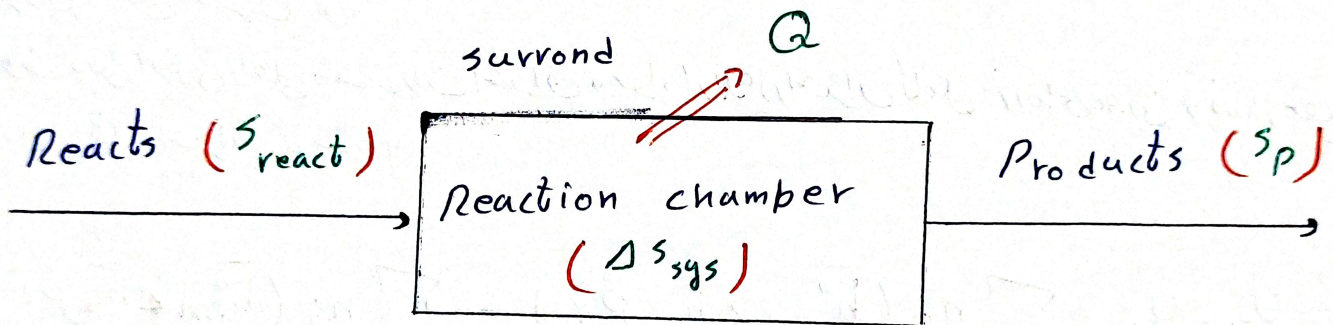
وقتی آب موجود در محصولات احتراق به صورت بخار است یعنی ما هذغذی تقابلیر جذب کنیم، تا به مایع تبدیل نشوند پس مقداری گرمای نهان تبخیر را محصولات احتراق هذغذر خود دارند به همین دلیل ارزش حرارتی بدست آمده ارزش حرارتی پایین است، اما اثر همان حرارت گرمای نهان تبخیر نیز از آن گرفته شده باشد و آب محصولات احتراق مایع شود گرمای بیشتری جذب کرده ایم پس ارزش حرارتی بدست آمده بالاست ۱۱۵

$$HHV = LHV + (nh_{f,g})_{H_2O}$$

تغییر انترپی سیستم
واکنش و غیر واکنش

$$s_{in} - s_{out} + s_{gen} = \Delta s_{sys}$$

- تغییر انترپی سیستم های واکنشی بسته یا حجم کنترل واکنشی ۱۱۶ به صورت زیر خواهیم داشت ۱۱۶



$$s_p - s_R = \int \frac{\delta Q}{T} + s_{gen}$$

اصل افزایش انترپی به شرح زیر است ۱۱۶

$$s_{gen} = \Delta s_{net} = \Delta s_{sur} + \Delta s_{sys} \geq 0$$

$$\Delta s_{sys} = s_p - s_R = \sum_P n_e \bar{s}_e - \sum_R n_R \bar{s}_R, \quad \Delta s_{sur} = - \frac{Q}{T_0}$$

قبل دیدیم که برای اندازه گیری انتالپی طی یک واکنش شیمیایی فرض کردیم که انتالپی عناصر شیمیایی در شرایط مرجع برابر صفر باشد پس از آن موفق شدیم با تعریف انتالپی تشکیل انتالپی اجزا مختلف را حساب کنیم، به طور مشابه برای اندازه گیری انترپی طی یک واکنش شیمیایی یک مرجع مطلق برای آن بیان می کردیم ۱۱۰

- قانون سوم ترمودینامیک و انتروپی مطلق ۱۱

قانون سوم ترمودینامیک در سال های اول قرن بیست ارائه شد ، و نخستین اقدامات مربوط به آن را برنست و ماکس پلانک انجام دادند ، قانون سوم مربوط به انتروپی مواد در درجه حرارت صفر مطلق است ، یعنی انتروپی یک ماده خالص کریستالی در دمای صفر مطلق برابر صفر است ، یعنی در ساختمان کریستالی مواد حداکثر درجه نظم وجود دارد ، علاوه بر این چون درجه حرارت صفر مطلق در نظر گرفته می شود انرژی حرارتی در حداقل مقدار خودش است ، در نتیجه می توان مدعی شد که مواد در صفر مطلق دارای ساختمان بلوری کامل نمی باشند و تا حدی دارای بی نظمی و ساختمان تصادفی هستند ، دلیل تجربی که قانون سوم بر آن استوار است واکنش های شیمیایی در درجه حرارت های پایین و اندازه گیری حرارت مخصوص در درجه حرارت هایی است که به سمت صفر میل می کند ، برخلاف قوانین اول و دوم ترمودینامیک که به ترتیب منجر به خواص انرژی داخلی و انتروپی می گردند ، قانون سوم تنها به انتروپی مطلق مربوط می شود ، قانون سوم مبنای مطلق را مشخص می کند که با توجه به آن انتروپی بین صفر مطلق و هوالت معین را می توان از راه های کالیبرتری و یا با بهره گیری از روش های ترمودینامیک اماری بدست آورد ، بنابراین قانون سوم یک مرجع برای انتروپی مواد مختلف می دهد و مقدار انتروپی نسبت به این مرجع **انتروپی مطلق** است ، جدول **A8** یا **A9** انتروپی مطلق برخی گازها را با فرض ابره آل یون در فشار 100 kPa و در ماهی مختلف می دهد ، جدول **A9** یا **A10** مقادیر انتروپی مطلق تعداد بیشتری از مواد را در 100 kPa و 25°C می دهد ، باید توجه داشت انتروپی گاز ابره آل برخلاف آنهایی که هم تابع امو و هم تابع فشار است ، انتروپی مطلق یا 5° علامت \circ نشان دهنده انتروپی در فشار حالت استاندارد $P^\circ = 100 \text{ kPa}$ است ، مقادیر انتروپی مطلق در فشار های غیر صفر و هم تر غیر از 100 kPa را می توان با معادله تغییرات انتروپی گاز ابره آل طی فرایند اما ثابت فرضی بدست آورد ، اگر ماده یکی از مواد فهرست شده در جدول **A8** باشد داریم ۱۱

$$\bar{s}_{TP} = \bar{s}_T^\circ - R \ln \frac{P}{P^\circ} + (\bar{s}_{TP} - \bar{s}_{TP}^*)$$

اگر ماده در جدول **A9** فهرست شده باشد داریم ۱۱

$$\bar{s}_{TP} = \bar{s}_T^\circ - R \ln \frac{P}{P^\circ} + (\bar{s}_{TP} - \bar{s}_{TP}^*)$$

اگر ماده در جدول **A9** نیامده باشد و انتروپی مطلق برای یک درجه حرارت T_0 به صورت ارائه شده در جدول

A10 معلوم باشد داریم ۱۱

$$\bar{s}_T^\circ = \bar{s}_{T_0}^\circ + \int_{T_0}^T \frac{C_{P_0}}{T} dT$$

در صورت معادله انتروپی یک مخلوط گاز ایده آل P و T انتروپی مخلوط بر حسب انتروپی ضریبی اجزا به صورت زیر است ۱۱۵

$$\bar{s}_{min}^* = \sum_i y_i \bar{s}_i^*$$

$$\bar{s}_i^* = \bar{s}_T^0 - \bar{R} \ln \frac{P}{P^0} - \bar{R} \ln y_i = \bar{s}_{T_i}^0 - \bar{R} \ln \frac{y_i P}{P^0}$$

برای مخلوط گازهای حقیقی نیز خواهیم داشت ۱۱۶

$$\bar{s}_{min} = \bar{s}_{min}^* + (\bar{s} - \bar{s}^*)_{min}$$

$$\bar{s}_{TP} = \bar{s}_{TP}^* + (\bar{s}_{TP} - \bar{s}_{TP}^*)_{TP}$$

۱۱۷ - تحلیل قانون دوم برای سیستم‌های واکنشی
 مفاهیم برگشت ناپذیری و قابلیت کارایی را بررسی می‌کنیم، معقظه احتراق یک جسم کنترل در نظر گرفته شده از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می‌کنیم و کار بازگشت پذیر برای فرایند حالت و جریان پایدار به صورت زیر است ۱۱۸

$$W^{rev} = \sum m_i (h_i - T_0 s_i) - \sum m_e (h_e - T_0 s_e)$$

$$W^{rev} = \sum_R n_i (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} - T_0 \bar{s})_i - \sum_R n_e (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} - T_0 \bar{s})_e$$

به همین ترتیب برگشت ناپذیری برای چنین فرایندی به صورت زیر است ۱۱۹

$$I = W^{rev} - W = \sum_P n_e T_0 \bar{s}_e - \sum_R n_i T_0 \bar{s}_i - Q_{cv} = T_0 s_{gen}$$

$$Q_{cv} + \sum_R n_i (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_i = W_{cv} + \sum_P n_e (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_e$$

که Q_{cv} قانون اول ترمودینامیک است ۱۲۰

تجربیت کارایی Ψ در غیاب تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل برای یک فرایند حالت پایدار به صورت زیر می باشد //

$$\Psi = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0)$$

حال اگر یک واکنش شیمیایی حالت پایدار رخ دهد به گونه ای که هم موارد اولیه و هم محصولات در تعادل درجه حرارتی با محیط باشند تابع گیبس $g = h - Ts$ یک مقیاس مفید خواهد بود برای چنین فرایندی با صرف نظر از انرژی جنبشی و پتانسیل کار برگشت پذیر به صورت زیر است //

$$W^{rev} = \sum_R n_i \bar{g}_i - \sum_P n_e \bar{g}_e = -\Delta G$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

حال برای بدست آوردن حداکثر کار قابل حصول از یک واکنش شیمیایی فرض می کنیم یک کیلو مول سوخت هیدروکربنی یا هوای لازم برای احتراق کامل هر دو در شرایط محیط با فشار 100 kPa و در دمای 25°C قرار دارند. حداکثر کار قابل حصول زمانی است که فرایند احتراق به صورت برگشت پذیر رخ داده و محصولات احتراق نیز در تعادل با محیط باشند //

$$W^{rev} = \sum_R n_i \bar{g}_i - \sum_P n_e \bar{g}_e = -\Delta G$$

از آنجایی که حالت نهایی در تعادل با محیط است کار برگشت پذیر فوق را می توان به عنوان قابلیت کارایی یا انرژی سوخت و هوای در نظر گرفت //

- ارزیابی فرایندهای واقعی احتراق //

پارامترهای مختلفی را می توان جهت ارزیابی فرایند واقعی احتراق در نظر گرفت که با توجه به ماهیت فرایند یا پارامتر مناسب انتخاب می شود //

= سیکل گازی // هدف بدست آوردن راندمان محصولات احتراق به ماکزیمم دمای سیکل (اگر حداکثر دمای قابل تحمل پره های توربین) است. اگر فرایند احتراق کامل آدیاباتیک داشته باشیم، دمای محصولات همان دمای شعله آدیاباتیک خواهد بود. بنابراین این فرایند به عنوان فرایند آدیاباتیک در نظر گرفته شده و نسبت سوخت به هوای این حالت را نسبت سوخت به هوای آدیاباتیک می نامیم. توجه شود که این فرایند لزوماً دارای احتراق شعاعی نیست اما در عمل احتراق واقعی حاصل نبوده و مقداری از حرارت تولید شده به محیط منتقل می شود. لذا برای رسیدن به دمای فوق باید

سختی بیشتری مصرف کرد ، کارایی احتراق به صورت زیر تعریف می گردد ۱۱

$$\eta_{comb} = \frac{FA_{ideal}}{FA_{actual}}$$

= یویلرها یا مولد بخار ۱۲ در یویلرها هدف انتقال حرارت حداکثر به آب می باشد ، در عمل کارایی یویلر به صورت نسبت انتقال حرارت به بخار به ارزش حرارتی یا ای سوخت تعریف می شود ، کارایی یویلر به صورت زیر بدست می آید ۱۳

$$\eta_{Boiler} = \frac{\text{Heat Transferred to water}}{\text{High Heating value of fuel}}$$

= موتورهای احتراق داخلی ۱۴ در این موتورها هدف تولید کار است بنابراین راندمان قاعداً باید به صورت نسبت کار تولیدی واقعی به ماکزیمم کار قابل حصول از یک تغییر حالت برگشت پذیری بین هوای اولیه و محصولات تعریف شود که همان راندمان قانون رنو است ، اما در عمل راندمان این موتورها به صورت نسبت کار واقعی تولیدی به منفی انتالپی احتراق (ارزش حرارتی فشار ثابت) سوخت تعریف می شود ، این راندمان معهداً راندمان حرارتی موتور احتراق داخلی نامیده می شود ۱۵

$$\eta_{th} = \frac{w}{-h_{rp_0}} = \frac{w}{\text{Heat Value}}$$

= کارایی توربین گازی و نیروگاه بخار ۱۶ کارایی یک توربین گازی و نیروگاه بخار نیز به همین شکل - تعریف می شود ، باید به این نکته اشاره کرد که در یک موتور احتراق داخلی یا نیروگاه بخار سوختی این واقعیت که احتراق خود بازگشت ناپذیر است در دستگاه هایی که کارایی حرارتی پایین دارند عمل بسیار مهمی است ۱۷

مثال 27) در محفظه احتراق یک توربین گازی از سوخت هیدروکربنی مایع استفاده می شود که به تقریب دارای ترکیب C_8H_{18} می باشد. در آزمایش راه های زیر در دست آورده است؟

$$T_{air} = 400 \text{ K}$$

$$T_{products} = 1100 \text{ K}$$

$$V_{air} = 100 \text{ m/s}$$

$$V_{products} = 150 \text{ m/s}$$

$$T_{fuel} = 50^\circ \text{C}$$

$$FA_{actual} = 0.0211 \frac{\text{kg}_f}{\text{kg}_a}$$

مطلوب است محاسبه کارایی احتراق برای این فرایند؟ برای واکنش شیمیایی آیره آل انتقال حرارت صفر است. لذا در نوشتن قانون اول برای حجم کنترل شامل محفظه احتراق را در بیاوریم.

$$H_R + KE_R = H_P + KE_P$$

$$H_R + KE_R = \sum_R n_i \left(\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} + \frac{mV^2}{2} \right)$$

$$= \left[\bar{h}_f^\circ + \bar{C}_p (50 - 25) \right]_{C_8H_{18}} + n_{O_2} \left(\Delta \bar{h} + \frac{mV^2}{2} \right)_{O_2} + 3.76 n_{O_2} \left(\Delta \bar{h} + \frac{mV^2}{2} \right)_{N_2}$$

$$H_P + KE_P = \sum_P n_e \left(\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} + \frac{mV^2}{2} \right)_e = 8 \left(\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} + \frac{mV^2}{2} \right)_{CO_2} + 9 \left(\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h} + \frac{mV^2}{2} \right)_{H_2O}$$

$$+ (n_{O_2} - 12.5) \left(\Delta \bar{h} + \frac{mV^2}{2} \right)_{O_2} + 3.76 n_{O_2} \left(\Delta \bar{h} + \frac{mV^2}{2} \right)_{N_2}$$

مثال بدست می آوریم که ۱۱

$$H_R + KE_R = -250105 + 2.23 \times 114.23 (50 - 25) + n_{O_2} \left[3034 + \frac{32 \times 100^2}{2 \times 1000} \right]$$

$$+ 3.76 n_{O_2} \left[2971 + \frac{28.02 \times 100^2}{2 \times 1000} \right] = -243737 + 14892 n_{O_2}$$

$$H_P + KE_P = 8 \left[-393522 + 38891 + \frac{44.01 \times 150^2}{2 \times 1000} \right]$$

$$+ 9 \left[-241826 + 30147 + \frac{18.02 \times 150^2}{2 \times 1000} \right] + (n_{O_2} - 12.5) \left[26218 + \frac{32 \times 150^2}{2 \times 1000} \right]$$

$$+ 3.76 n_{O_2} \left[24758 + \frac{28.02 \times 150^2}{2 \times 1000} \right] = -5068599 + 120853 n_{O_2}$$

$$-243737 + 14892 n_{O_2} = -5068599 + 120853 n_{O_2}$$

$$n_{O_2} = 45.53 \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol fuel}}$$

$$\frac{\text{kmol air}}{\text{kmol fuel}} = 4.76 (45.53) = 216.72$$

$$FA_{\text{ideal}} = \frac{114.23}{216.72 \times 28.97} = 0.0182 \frac{\text{kg fuel}}{\text{kg air}}$$

$$\eta_{\text{comb}} = \frac{0.0182}{0.0211} \times 100 = 86.2\%$$

مثال 28) در یک نیروگاه بخار آب یاربی $\frac{kg}{h}$ 325000 فشار 12.5 mpa و دمای $200^\circ C$ وارد بویلر شده و با فشار 9 mpa و دمای $500^\circ C$ از آن خارج می شود. توان خروجی توربین 81 mpa می باشد. در بویلر زمان سنگ با ارزش حرارتی بالای 33.25 یا نرخ جرمی $\frac{kg}{hr}$ 26700 مصرف می شود پس زمان بویلر و زمان حرارتی نیروگاه را بدست آورید ؟

$$\eta_{boiler} = \frac{\dot{m}_w (h_2 - h_1)}{\dot{m}_{fuel} HHV} = \frac{3325000 (3386.1 - 857.1)}{26700 \times 33250} = 92.6 \%$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{w}}{\dot{m}_{Fuel} HHV} = \frac{81000 \times 3600}{26700 \times 33250} = 32.8 \%$$

- پیل سوختی ۱۱

این مثال ها مساله امکان پذیری و واکنش های برگشت پذیر را به همراه دارند، برخی از واکنش ها را می توان از طریق انبساط در آن آنها در پیل های الکترونیکی به صورت برگشت پذیر در آور، وقتی پتانسیل دقیق مساوی با نیروی محرکه الکتریکی پیل به آن وارد شود واکنش رخ نمی دهد، وقتی پتانسیل وارد شده کمی افزایش یابد واکنش در یک جهت پیشرفت می کند و اگر کمی کاهش یابد در جهت مخالف پیش می رود. کار مربوطه انرژی الکتریکی اعمال شده یا گرفته از پیل می باشد، واکنش بازگشت پذیری را در نظر بگیرید که در دمای ثابت مساوی با محیط اطراف رخ می دهد، کار خروجی پیل عبارت است از ۱۱

$$w = - \left(\sum_P n_e \bar{g}_e - \sum_R n_i \bar{g}_i \right) = - \Delta G$$

که ΔG تغییر تابع گیبس برای کل واکنش شیمیایی است، همچنین می دانیم که کار بر حسب عباراتی از الکترون های باردار جریان یافته از طریق پتانسیل الکتریکی به صورت زیر است و در آن ne تعداد مول الکترون جریان یافته از طریق مدار خارجی است ۱۱

$$w = \sum n_e N_o e$$

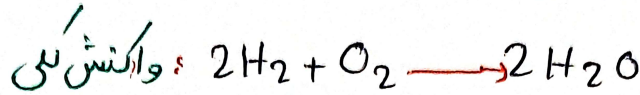
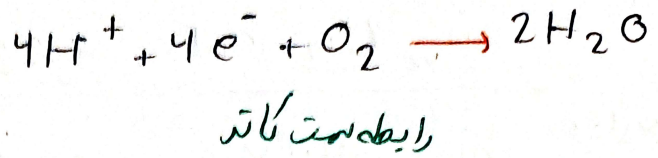
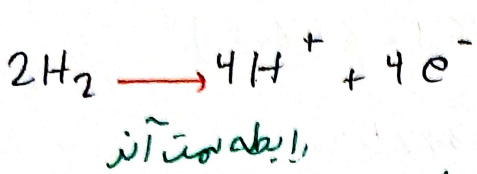
$$N_o e = 6.022136 \times 10^{26} \frac{elec}{kmol} \times 1.602177 \times 10^{-22} \frac{kJ}{elec}$$

$$= 96485 \frac{kJ}{kmol}$$

بنابراین برای یک واکنش مشخص حداکثر پتانسیلی که برای پیل سوختی در درجه حرارت معین در یک واکنش برگشت پذیر برسد می آید داریم ϵ°

$$\epsilon^\circ = \frac{-\Delta G}{96485 ne}$$

مثال 28) بازگشت پذیری پیل سوختی هیدروژن-اکسیژن را در 25°C محاسبه کنید ϵ°



4 kmol الکترون در مدار خارجی جاری می شود، در حالت استاندارد 1 MPa داریم ϵ°

$$\Delta H^\circ = 2h_{\text{H}_2\text{O}}^\circ - 2h_{\text{H}_2}^\circ - h_{\text{O}_2}^\circ = 2(-285830) - 2(0) - 1(0)$$

$$= -571660 \text{ kJ}$$

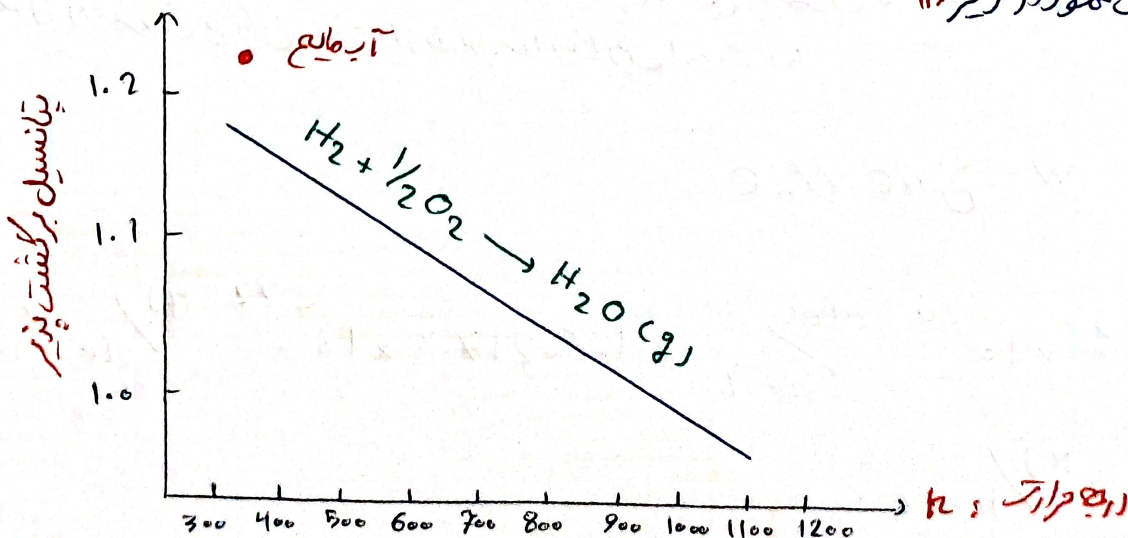
$$\Delta S^\circ = 2s_{\text{H}_2\text{O}}^\circ - 2s_{\text{H}_2}^\circ - s_{\text{O}_2}^\circ = 2(69.95) - 2(130.67) - 1(205.14)$$

$$= -326.604 \text{ kJ/K} \quad \Delta G^\circ = -571660 - 298.15(-326.604)$$

$$= -474283 \text{ kJ}$$

$$\epsilon^\circ = \frac{-(-474283)}{96485 \times 4} = 1.229 \text{ V}$$

در عمل بسیاری از پیل های سوختی در درجه حرارت های بالا کار می کنند و در این شرایط آب به صورت گاز خارج می شود نه به صورت مایع و لذا انرژی بیشتری را با خود خارج می سازد، با افزایش درجه حرارت EMF کمتر می شود طبق نمودار زیر ϵ°



سبح سبحانی