جـــزوه آمـــوزشـــی درس

تـــرمـــودیـــنـــامـــیـــک (۲)

(رشته مهندسی مکانیک با گرایش حرارت و سیالات)

گردآوری و تنظیم :

فـــــرشـــــاد ســـــرایـــــی

با تقدیم والاترین درودها و احترامات به استاد ارجمندم جناب آقای دکتر کورش امیر اصلانی تبریز
که مطالب مندرج در این جزوه بر گرفته از آموزش های ایشان می باشد.

جزوه آموزشی درس تـــرمـــودیـــنـــامـــیـــک (۲)	شرکت مهندسی پتروپالامحور	**R&D Department**

مقدمه :

جزوه حاضر که فرا روی شما خواننده گرامی قرار دارد ، مشتمل بر مباحث و سرفصل های مربوط به درس دانشگاهی « ترمودینامیک ۲ » در رشته مهندسی مکانیک با گرایش حرارت و سیالات می باشد.

مطالب مندرج در این جزوه آموزشی به تبیین اصول ترمودینامیک کلاسیک و روابط حاکم میان پارامترهای مختلف همچون دما ، فشار ، جرم مخصوص ، آنتالپی و ... و همچنین کاربردهای عملی آن در علم مهندسی مکانیک می پردازد.

کتاب مرجع دانشگاهی که میبایست به عنوان مکمل در کنار این جزوه مطالعه شده و مورد استناد و ارجاع قرار گیرد عبارت است از :

- مبانی ترمودینامیک کلاسیک ، نوشته : G.J.Van Wylen , R.E.Sonntag ، ترجمه : مهندس کاشانی حصار ، مهندس معتمدی و مهندس ملک زاده

مطالب مندرج در این جزوه برگرفته از کلاس های آموزشی ارائه شده توسط جناب آقای دکتر کورش امیر اصلانی تبریز در دانشکده فنی دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران در سال ۱۳۷۳ خورشیدی می باشد که به همان صورت دست نویس (برداشت شده توسط اینجانب) تقدیم حضور خوانندگان گرامی می شود ، به این امید که مفید فایده و مقبول نظر واقع گردد. همچنین بر خود لازم میدانم از حسن همکاری و زحمات سرکار خانم نیره رضائی که اینجانب را در گردآوری و تنظیم این جزوه الکترونیکی یاری نمودند کمال سپاسگزاری را به عمل آورم.

از خوانندگان محترم درخواست می نمایم هرگونه نظرات اصلاحی ، انتقادات و پیشنهادات خود را از طریق آدرس ایمیل : f.saraei@petropalamehvar.com با اینجانب در میان گذارند.

فـرشـاد سـرایـی
دی ماه ۱۳۹۰

« سر درب ورودی دانشکده فنی دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران »

« پیشنهاد همکاری به مهندسین تازه فارغ التحصیل دانشگاه »

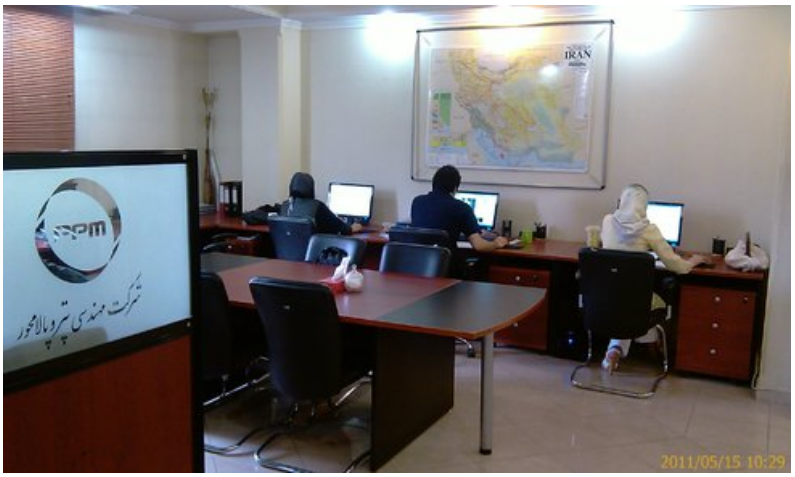
مدیریت شرکت مهندسی «پتروپالامحور» در راستای بسط و توسعه فرهنگ مهندسی دانش بنیان و حمایت از مهندسین جوان و علاقمند ، شرایطی را فراهم آورده که دانش آموختگان بتوانند با مراجعه به کتب ، جزوات و مقالاتی که بصورت رایگان در بخش «کتب و مقالات» وب سایت این شرکت در دسترس عموم قرار گرفته ، اصول و مبانی صحیح طراحی و مدلسازی سه بعدی سیستم های لوله کشی صنعتی (Piping) را به صورت خود آموز فراگرفته و سپس آموخته های خود را در قالب یک پروژه آموزشی پیاده سازی نموده و جهت بررسی مهندسین ارشد و با سابقه این شرکت ارسال نمایند تا پس از بررسی کارشناسی ، توصیه های فنی لازم در جهت بهبود طراحی به صورت رایگان به ایشان ارائه گردد.

مهندسین تازه فارغ التحصیل دانشگاه های معتبر در رشته «مکانیک» میتوانند با مراجعه به این کتابخانه الکترونیکی به آدرس : http://www.petropalamehvar.com/articles_fa.html ضمن دریافت فایل کتب ، جزوات و مقالات آموزشی با فرمت PDF به مطالعه آنها پرداخته و دانش مقدماتی مورد نیاز جهت طراحی و مدلسازی سه بعدی سیستم های لوله کشی صنعتی (Piping) را فرا گیرند.

پس از فراگیری مقدمات فوق ، مهندسین جوان میبایست به پروژه آموزشی ارائه شده در آیتم شماره ۳۲ کتابخانه الکترونیکی مراجعه نموده و بسته فشرده محتوی فایل های این پروژه را دانلود نمایند.
پروژه فوق متشکل از دو نقشه P&ID و Area Plot Plan یک واحد پتروشیمی فرضی می باشد که با ویرایش ۲۰۰۷ نرم افزار نقشه کشی Autocad و با فرمت فایل الکترونیک DWG تهیه شده و به همراه یک فایل PDF محتوی توضیحات مورد نیاز جهت اجرای پروژه ، در قالب یک پکیج رایگان ارائه گشته است.

مهندسین علاقمند میبایست بر اساس توضیحات ضمیمه این پروژه ، گام به گام نسبت به تکمیل طرح و تهیه نقشه ها و مدارک فنی مورد نیاز (که دقیقا مشابه یک پروژه واقعی تنظیم شده) اقدام نمایند.
نقشه ها و مدارک تهیه شده پس از تکمیل میبایست در قالب یک فایل فشرده با ظرفیت حداکثر ۱۰ مگابایت بسته بندی شده و جهت کنترل و بررسی مهندسین ارشد واحد تحقیق و توسعه شرکت مهندسی «پتروپالامحور» به آدرس پست الکترونیک این شرکت : info@petropalamehvar.co ارسال گردد. ذکر عبارت «درخواست بررسی پروژه آموزشی تکمیل شده» در عنوان (Subject) ایمیل و همچنین درج نام ، نام خانوادگی ، رشته تحصیلی ، میزان سابقه کار و شماره تماس مهندس طراح در متن ایمیل ارسالی ضروری بوده و به ایمیل هایی که فاقد مشخصات فوق الذکر باشد ترتیب اثر داده نخواهد شد.

طرح های دریافتی به نوبت توسط تیم بازبینی واحد تحقیق و توسعه شرکت مهندسی «پتروپالامحور» مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و نقاط قوت و ضعف موجود در آنها به انضمام توصیه های فنی و تجربی مورد نیاز جهت بهبود طرح ، متعاقبا به آدرس پست الکترونیک شخص فرستنده ارسال خواهد گشت.



علاوه بر خدمات فوق که به صورت رایگان از طرف مدیریت شرکت مهندسی «پتروپالامحور» برنامه ریزی و جهت استفاده عموم علاقمندان ارائه می گردد ، با هدف تشویق هر چه بیشتر دانشجویان و مهندسین جوان به شرکت در این خودآزمایی و توسعه دانش فنی طراحی لوله کشی صنعتی (Piping) در میان دانش آموختگان کشور ، هیئت بازبینی واحد تحقیق و توسعه این شرکت پس از بررسی طرح های دریافتی به آنها امتیازی بین ۰ الی ۱۰۰ خواهد داد.طرح هایی که موفق به کسب امتیاز ۸۰ یا بالاتر از مجموع ۱۰۰ امتیاز گردند به عنوان **طرح برگزیده** انتخاب گشته و مهندس طراح مربوطه پس از دعوت به محل دفتر مرکزی شرکت و انجام مصاحبه حضوری جهت اطمینان از صحت مدارک ارسالی و تهیه آن توسط خود شخص ، جهت **استخدام در شرکت مهندسی «پتروپالامحور»** دعوت به همکاری خواهد شد.

شماره های تماس شرکت مهندسی «پتروپالامحور»
۴۸ الی ۲۲۶۸۵۰۴۶ (کد شهر تهران ۰۲۱)

آدرس وب سایت شرکت مهندسی «پتروپالامحور»
www.petropalamehvar.com

آدرس وبلاگ تخصصی «طراحی تاسیسات مکانیکی و لوله کشی صنعتی»
به مدیریت آقای مهندس «فرشاد سرایی»
www.fsaraei.persianblog.ir

درس : ترمودینامیک (II)

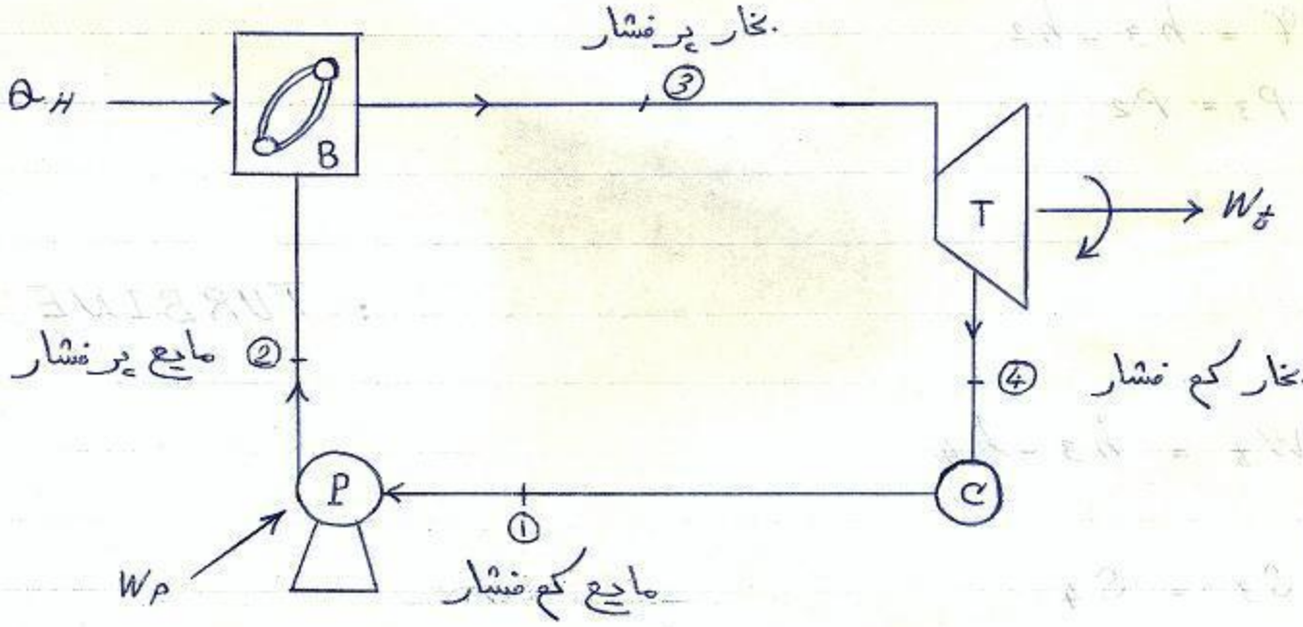
استاد : جناب دکتر امیر اصلانی

فرشاد سرایی- مهندس پایه یک تاسیسات مکانیکی
طراحی - نظارت - اجرا
نظام مهندسی: ۱۰-۴-۰-۱۷۲۷۶
پروانه مهندسی: ۱۰-۴۰۰-۰۲۸۱۵
شماره شهرسازی: ۱۰۴-۰۱۴۲۲

جزوه آموزشی درس ترمودینامیک (۲) آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران – دانشکده فنی (۱۳۷۳)

سیکلهای ترمودینامیکی

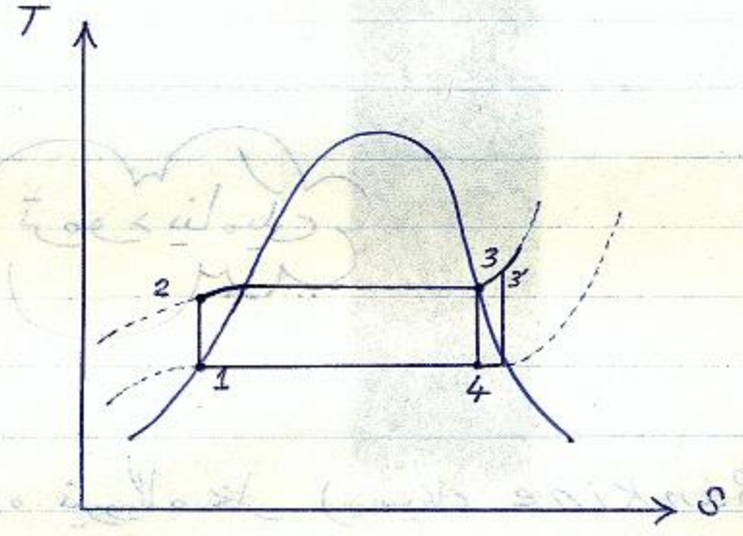
1 - سیکل ساده نیروگاه بخار (سیکل Rankine) :



1) PUMP :

$$\begin{cases} W_p = -\int_1^2 v\,dP = h_1 - h_2 \\ W_p = v_1 (P_1 - P_2) = h_1 - h_e \\ S_1 = S_2 \end{cases}$$

2) Boiler :



$$\begin{cases} q = h_3 - h_2 \\ P_3 = P_2 \end{cases}$$

3) TURBINE :

$$\begin{cases} W_t = h_3 - h_4 \\ S_3 = S_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} q = h_1 - h_4 \\ P_4 = P_1 \end{cases} \quad : \text{Condensor (4}$$

* با سوپرهیت کردن نقطه ③ می‌توان Q_H متوسط را افزایش داد و راندمان را بالا برد. سیکل کارنو هم برای نیروگاه بخار عملی نیست.

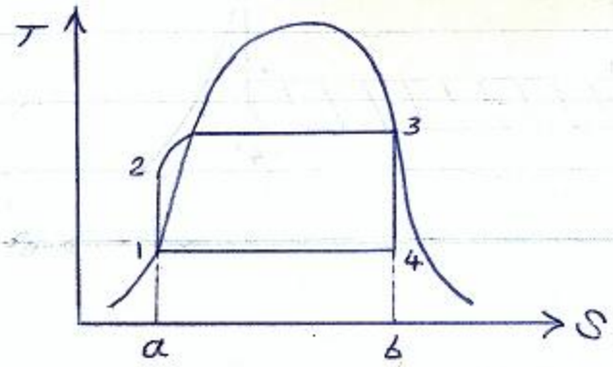
قانون اوّل در سیکلها :

$$\oint \delta W = \oint \delta Q$$

$$W_t - W_p = W_{net} = q_H - q_L \longrightarrow$$

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

* اگر در مسئله خواستیم W_p را حساب کنیم که منفی است دیگر منفی در منفی ضرب نمی‌کنیم و از منفی خود رابطه بهره می‌گیریم.



q_H : $S_{a2'3'6a}$

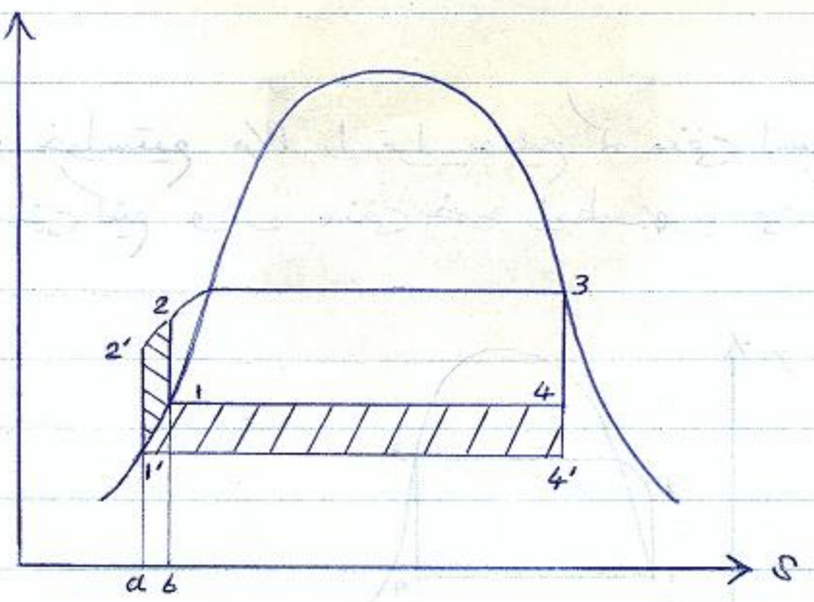
q_L : $S_{a1'4'6a}$

W_{net} : $S_{1'2'3'4'1'}$

* بالا بردن دمای متوسط بالای سیکل و یا پایین آوردن دمای متوسط پایین سیکل راندمان را افزایش می دهد.

تاثیر فشار و دما بر راندمان حرارتی سیکل رانکین

الف - پایین آوردن فشار کندانسور (خروجی توربین) باعث افزایش راندمان میشود.



روابط بین خواص استاتیک و سکون برای گاز کامل

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2}$$

$$c_p T_0 = c_p T + \frac{V^2}{2}$$

$$\rightarrow \quad T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p}$$

$$c_p = \frac{KR}{K-1} \quad \rightarrow \quad \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{K-1}{2}\frac{V^2}{KRT}$$

$$KRT = c^2 \quad , \quad M = \frac{V}{c}$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{K-1}{2} M^2$$

** معمولاً میان دو مقطع مثلاً ورودی و خروجی فانک و.... می توان این رابطه را نوشت.

$$\frac{T_0}{T} = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{K-1}$$

$$\frac{P_0}{P} = \left[1 + \frac{K-1}{2} M^2\right]^{K/K-1}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left[1 + \frac{K-1}{2} M^2\right]^{1/K-1}$$

۱۵۵۴

* شرایط بحرانی بازاء $M = 1$ در روابط فوق برای گلوگاه می تواند بدست آید:

گلوگاه

$$\begin{cases} V = C = \sqrt{KRT^*} \quad (M = 1) \\ \frac{T_0}{T^*} = \frac{K+1}{2} \qquad \frac{P_0}{P^*} = \left(\frac{K+1}{2}\right)^{K/K-1} \\ \frac{\rho_0}{\rho^*} = \left(\frac{K+1}{2}\right)^{1/K-1} \end{cases}$$

فرشاد سرایی - مهندس پایه یک تاسیسات مکانیکی
طراحی - نظارت - اجرا
نظام مهندسی: ۱۰-۴۰۰-۱۷۲۷۶
پروانه مهندسی: ۱۰-۴۰۰-۰۲۸۱۵
شماره شهرسازی: ۱۰۴-۰۱۲۲۲

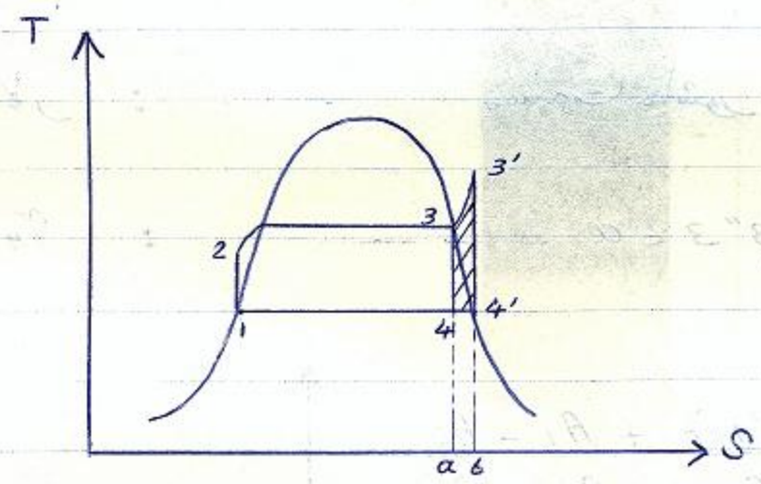
جزوه آموزشی درس ترمودینامیک (۲) آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران – دانشکده فنی (۱۳۷۳)

* افزایش کار : مساحت 1' 2' 2 1 4 4' 1'

* افزایش q_H : مساحت a 2' 2 6 a

* افزوده شدن صورت و مخرج یک کسر در نهایت مقدار آن کسر را افزایش می دهد.

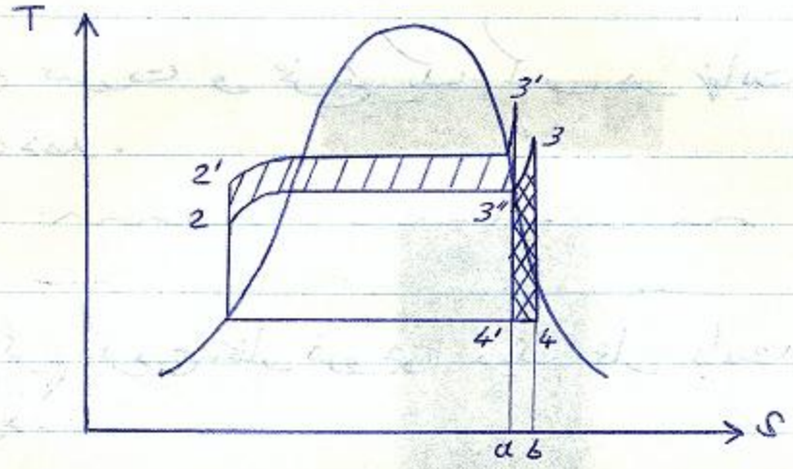
ب) مافوق گرم کردن بخار خروجی دیگ بخار باعث افزایش راندمان می شود.



* افزایش کار : سطح 4 3 3' 4' 4

* " q_H : سطح a 3 3' 6 a

ج) افزایش فشار دیگ بخار (ضمن مافوق گرم کردن) باعث افزایش راندمان می شود.



* افزایش کار : مساحت هاشور دوبل - مساحت هاشوری

* q_H " : $a3''3ba$ - مساحت هاشوری

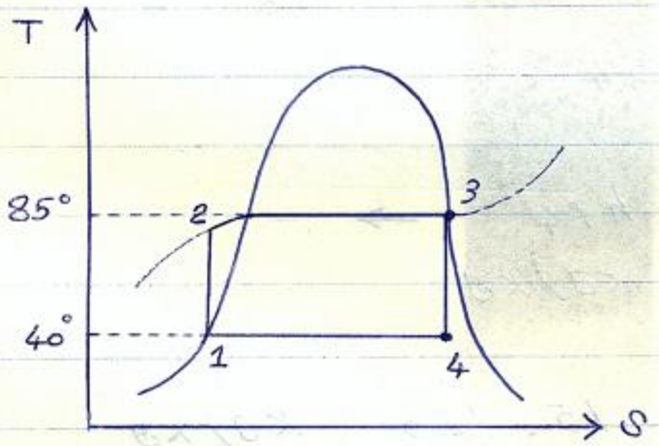
$$\eta_{th} = \frac{W_{net} + A_1 - A_2}{q_r + A_1 - A_3}$$

مثال- (9.1) یک سیکل ایده آل ساده رانکین را در نظر بگیرید که در آن سیال عامل فرئون 12 بوده و از آب داغ زیرزمینی بعنوان منبع حرارتی استفاده می شود. بخار اشباع در $85^{\circ}C$ از دیگ بخار فرئون خارج می شود. درجه حرارت چگالنده $40^{\circ}C$ می باشد.

الف - کارآئی حرارتی این سیکل توانی را حساب کنید .

ب - اگر 1.5 kg/s آب زیرزمینی در درجه حرارت 95°c در دسترس باشد حداکثر توان تولیدی این سیکل چه مقدار خواهد بود ؟

حل قسمت الف) اوّل دیاگرام T-S را رسم می کنیم .



* $W_p = v_1 (P_1 - P_2) = h_1 - h_2$

h_1 ← 40° ← h_f

v_1 ← حجم مخصوص مایع اشباع 40°

P_1 ← فشار اشباع 85°

P_2 ← فشار اشباع 40°

(جدول A3.1) → $W_p = 0.000\,798\,(960.8 - 2538)$

$W_p = -1.259 \quad kJ/kg$

* $h_2 = h_1 - W_p = 74.257 - (-1.259)$
* $h_2 = 75.786 \quad KJ/kg$

* $h_3 = h_{g\,85^\circ} = 212.865 \quad KJ/kg$

* $q_H = h_3 - h_2 = 212.865 - 75.786$
* $q_H = 137.079 \quad KJ/kg$

* $S_4 = S_3 = 0.6631 = x_4 S_{fg4} + S_{f4}$

(S_{fg4} and S_{f4} at 40°)

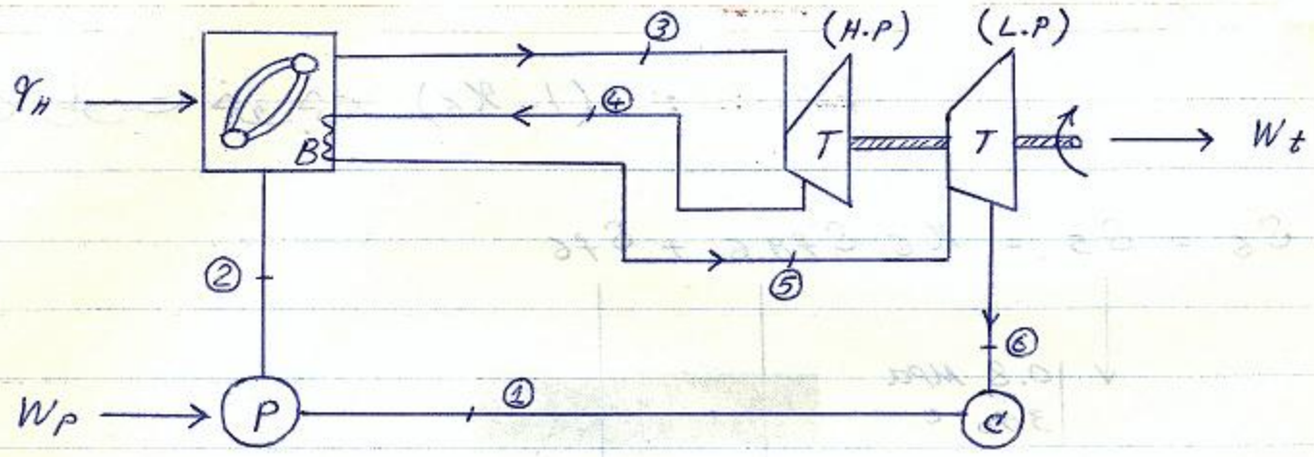
$\rightarrow \quad x_4 = 0.954$

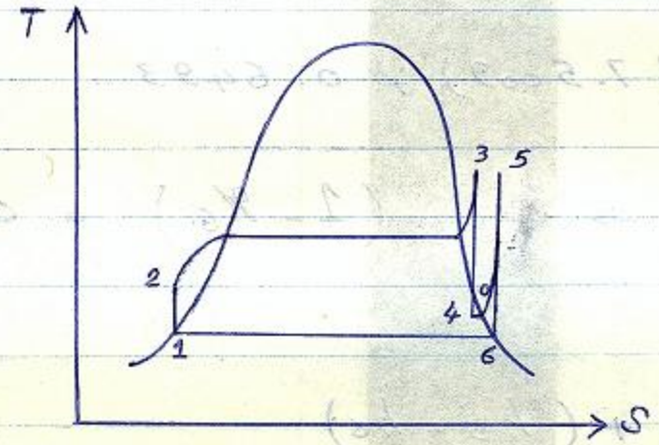
* $h_4 = x_4 h_{fg4} + h_{f4} \rightarrow$
* $h_4 = 197.14 \quad KJ/kg$

* $W_t = h_3 - h_4 = 15.725 \quad KJ/kg$

* $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = \frac{W_t - W_p}{q_H} = 0.055$

سیکل RANKINE با گرمایش مجدد (RE HEAT)



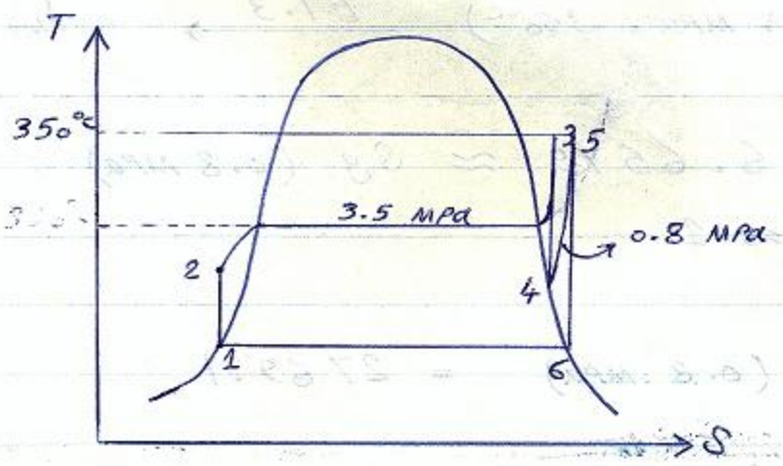


$$\begin{cases} S_1 = S_2 \\ S_3 = S_4 \\ S_5 = S_6 \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_2 = P_3 \\ P_4 = P_5 \\ P_1 = P_6 \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_3 = T_5 \\ T_6 = T_1 \end{cases}$$ غالباً

مثال ۲ - (مسئلهٔ 9.5)



میزان رطوبت خروجی $(1-x_6)$:

* $s_6 = s_5 = x_6 s_{fg6} + s_{f6}$

s_5: 0.8 MPa, 350°C

s_{fg6}, s_{f6}: 10 KPa

$7.4089 = x_6 (7.5009) + 0.6493 \rightarrow$

* $x_6 = 0.901 \rightarrow (1-x_6) = 0.099$

* $W_t = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$ (←

* $h_6 = x_6 h_{fg6} + h_{f6} = 2348.15$ KJ/Kg

h_{fg6}, h_{f6}: 10 KPa

* $h_3 = h\ (3.5\ MPa, 350^{\circ}C) \xrightarrow{A1.3} h_3 = 3104$ KJ/Kg

* $s_4 = s_3 = 6.6579 \approx s_g\ (0.8\ MPa)$

$\rightarrow x_4 \approx 1$

* $h_4 \approx h_g\ (0.8\ MPa) = 2769.1$

* $h_5 = h\ (0.8\ MPa,\ 350^{\circ}C) = 3161.7\ \ KJ/kg$

$\rightarrow \quad W_t = 1148.45\ \ KJ/kg$

* $W_P = v_1 (P_1 - P_2) = h_1 - h_2$

* $W_P = v_{f\,(10\,KPa)} (P_1 - P_2) = h_1 - h_2$

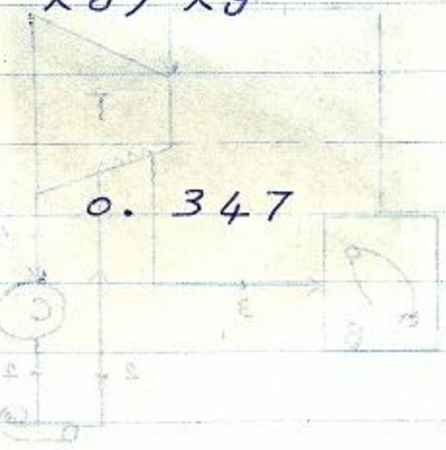
P_1: 10 KPa, P_2: 3.5 MPa, h_1: $h_{f\,(10\,KPa)}$

* $W_P = 0.00101 (10 - 3500) = -3.53\ \ KJ/kg$

* $h_2 = h_1 - W_P = 191.83 - (-3.53) = 195.35\ \ KJ/kg$

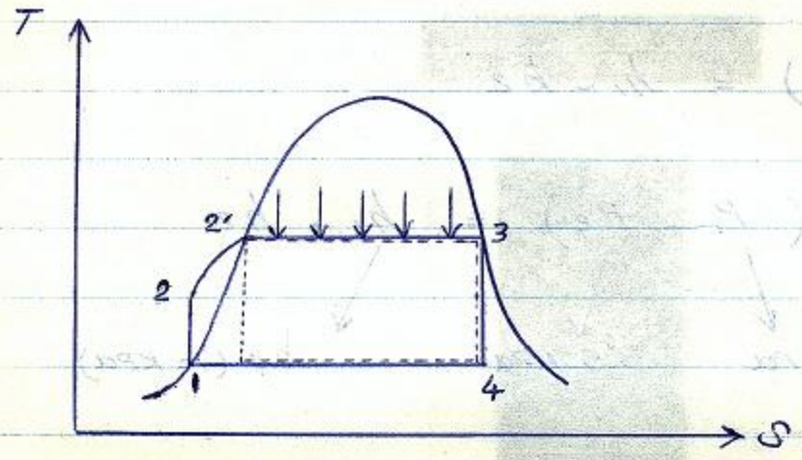
* $q_H = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$ $\rightarrow$

* $q_H = 3301.25\ \ KJ/kg$

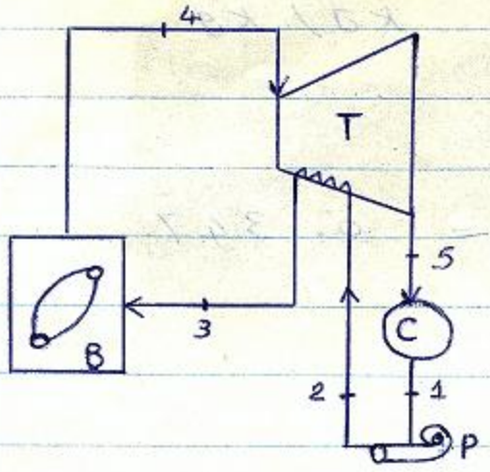


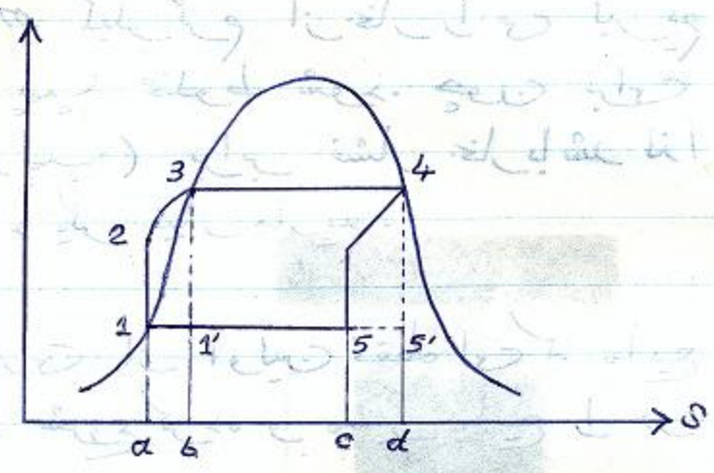
* $\eta_{th} = \dfrac{W_{net}}{q_H} = 0.347$

Regenerative Cycle سیکل با بازیاب



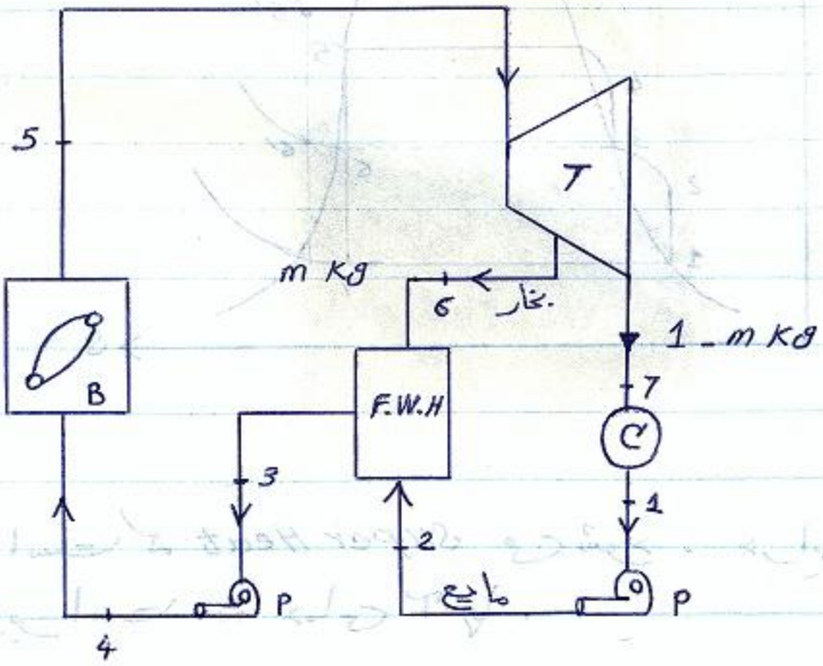
* حرارت داده شده به سیکل رانکین در عمل از 2 تا 3 است. حال ما می خواهیم از نقطه 2' تا 3 حرارت دهیم (یعنی سیکل کارنو بوجود آوریم. در حالت ایده آل ما آب خارج شده از نقطه 2 (بعد از پمپ) را قبل از بردن به Boiler به جدار توربین می بریم تا پیش گرم شده و فرضاً به نقطه 2' برسد.





* رفتار مایع را در فوق مانند رفتار بخار در توربین در نظر گرفتیم که البته فرضی است.

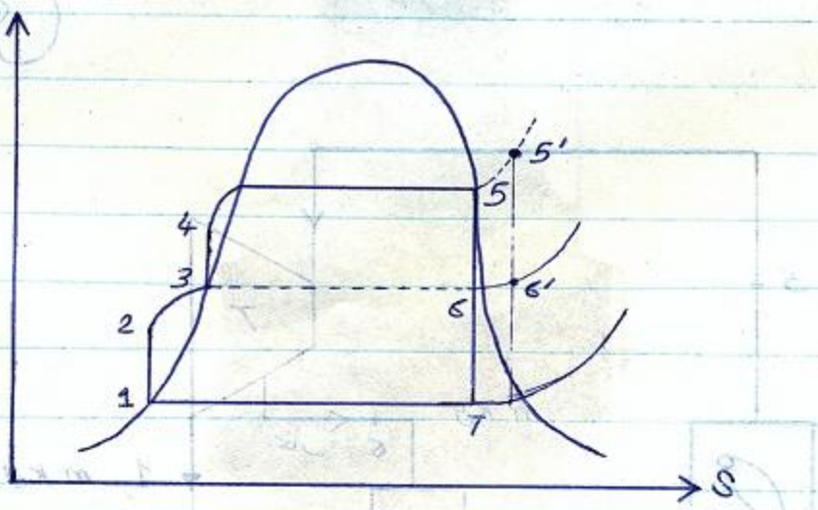
حالت واقعی



* در مرحله ای m کیلوگرم از بخار را می گیریم تا در گرمکن باز با مایع خروجی پمپ مخلوط شود. چون برای مخلوط شدن باید فشار مایع (پمپ) برابر فشار بخار باشد لذا برای رفتن به Boiler به یک پمپ دیگر نیاز داریم.

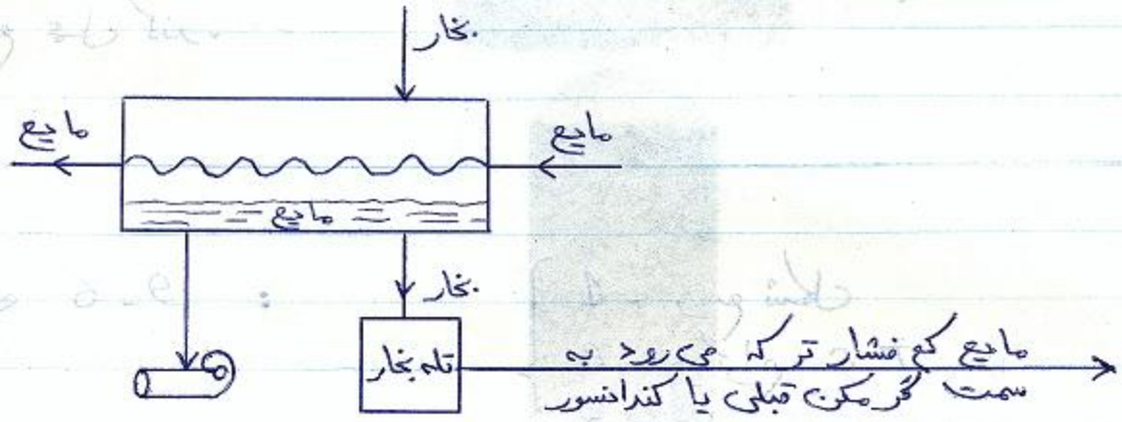
* برای شماره گذاری از اولین نقطه ای که مایع تشکیل شده یعنی پس از کندانسور شروع کرده و مسیر مایع را در جهت عقربه‌های ساعت دنبال می کنیم.

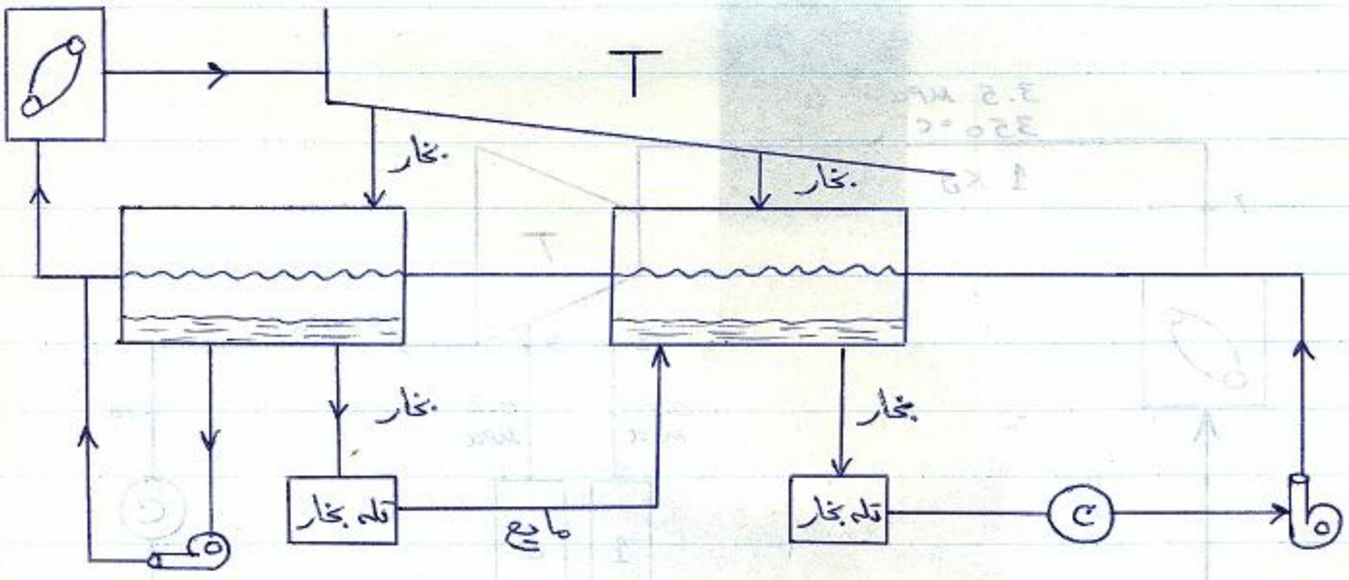
$$\begin{cases} P_6 = P_3 \\ P_7 = P_1 \end{cases}$$



5' در حالتی است که Super Heat می شود. در این حالت تنها فشار 6' با 3 برابر است نه دمای آنها.

* گاهی گرمکنی داریم که در آن مایع و بخار در تماس مستقیم نیستند و بخار خروجی را توسط (تله بخار) که با افت فشار عمل می کند به مایع تبدیل می کنند.





* باید حتماً فشار مایع ورودی به گرمکن قبلی با فشار مایع تشکیل شده در آن برابر باشد.

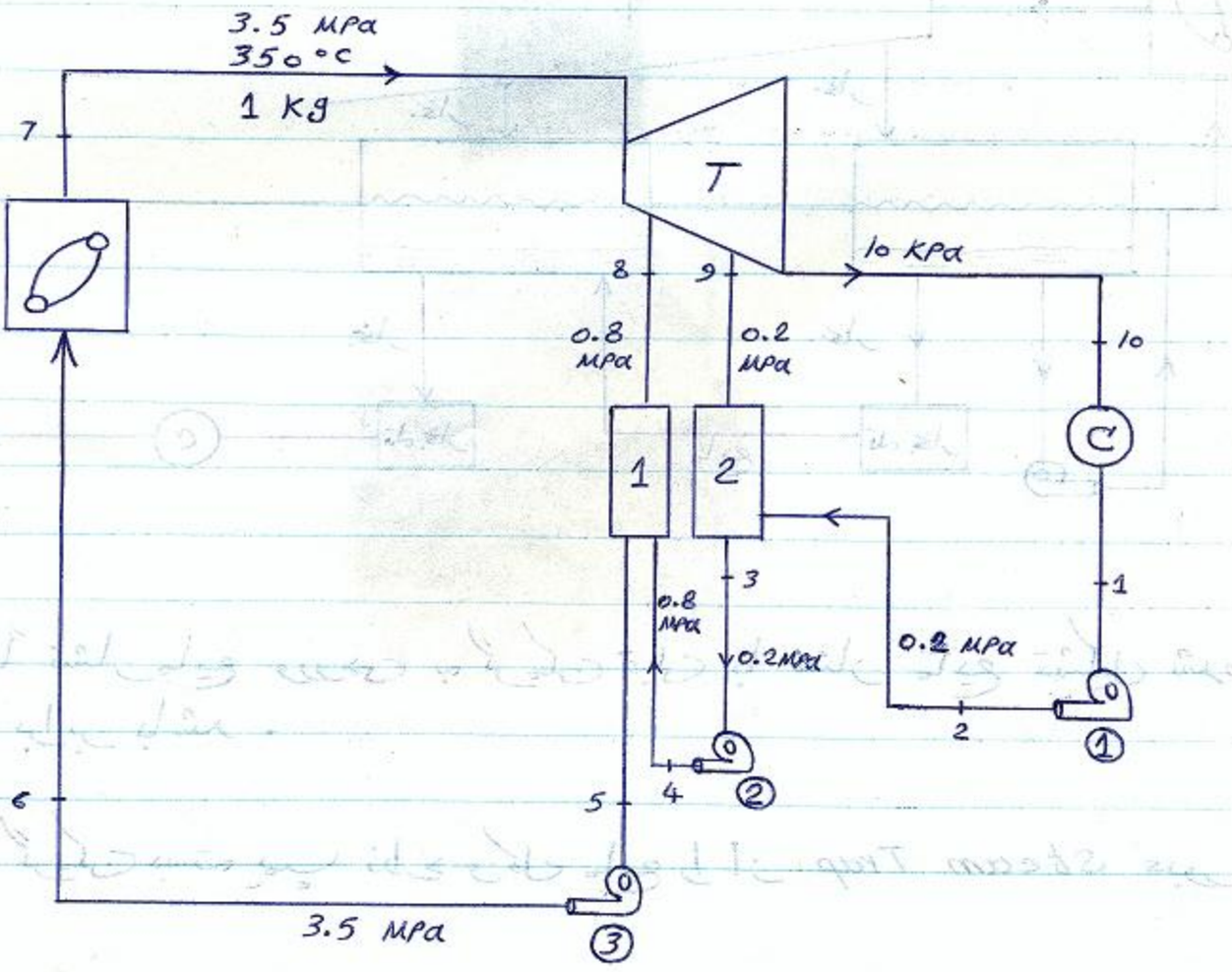
* معمولاً گرمکن بسته پمپ ندارد و کل مایع را از Steam Trap عبور

می دهیم و یا نهایتاً در گرمکن آخری پمپی نصب می شود.

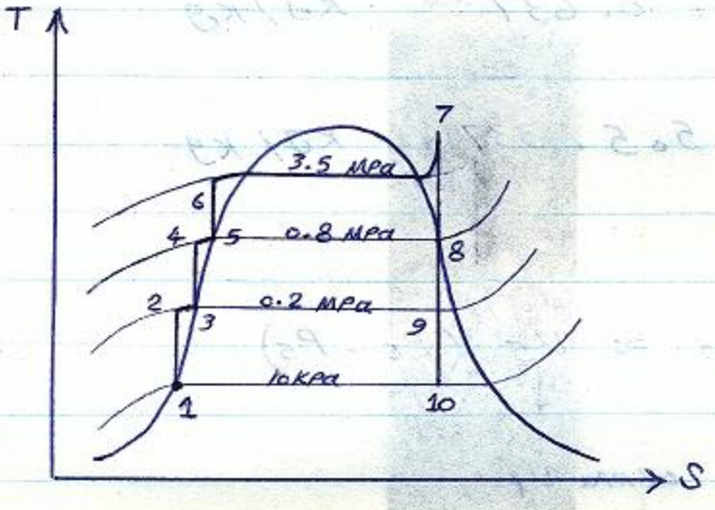
* وجود گرمکن بسته باعث پدید آمدن هوا در سیستم می شود - پس حتماً باید یک گرمکن باز داشته باشیم تا بعنوان هواگیر هم عمل کند.

مسئله 9-6 :

1- رسم شکل
2- دیاگرام T-S
3- محاسبات



$$\begin{cases} P_1 = P_{10} = 10 \text{ KPa} \\ P_2 = P_3 = P_9 = 0.2 \text{ MPa} \\ P_4 = P_5 = P_8 = 0.8 \text{ MPa} \\ P_6 = P_7 = 3.5 \text{ MPa} \end{cases}$$



* $1 - m_8 - m_9 = m_1 = m_2$

$-\omega_{p_1} = h_2 - h_1 \approx v_1 (P_2 - P_1)$ — ① معادلة

$-\omega_{p_1} = h_2 - \underbrace{191.83}_{h_f \text{ 10KPa}} \approx 0.00101 (200 - 10)$

$\longrightarrow$

$$\begin{cases} -\omega_{p_1} = 0.192 \text{ KJ/kg} \\ h_2 = 192.02 \text{ KJ/kg} \end{cases}$$

پمپ ② -

$$-w_{p2} = h_4 - h_3 \approx v_3 (P_4 - P_3)$$

$h_3 \rightarrow h_f$ @ 0.2 MPa, $v_3 \rightarrow v_f$

$$\begin{cases} -w_{p2} = 0.637 & KJ/kg \\ h_4 = 505.337 & KJ/kg \end{cases}$$

پمپ ③ -

$$-w_{p3} = h_6 - h_5 \approx v_5 (P_6 - P_5)$$

$h_5 \rightarrow h_f$ @ 0.8 MPa, $v_5 \rightarrow v_f$

$$\begin{cases} -w_{p3} = 3.011 & KJ/kg \\ h_6 = 724.12 & KJ/kg \end{cases}$$

* h_7 از جدول تعیین می شود :

$$\begin{cases} h_7 = 3104 & KJ/kg \\ S_7 = 6.6579 & KJ/kg \end{cases}$$

* از دیاگرام T-S :

$$S_{10} = S_9 = S_8 = S_7$$

$S_8 = S_7 = 6.6579 \approx S_g$ 0.8 MPa — نقطه ⑧

(~~= 2769.1~~)

$\rightarrow \quad x = 100\% \quad \rightarrow \quad h_8 = h_g$ 0.8 MPa $= 2769.1$ kJ/kg

$S_9 = x_9 S_{fg9} + S_{f9} = 6.6579$ — نقطه ⑨

(0.2MPa)

* چون 8 روی خط اشباع افتاده می فهمیم که در ۹ باید مقداری مایع ظاهر شده باشد.

$\rightarrow \quad x_9 = 0.916$

$h_9 = x_9 h_{fg9} + h_{f9}$ ⟶

(0.2MPa)

$h_9 = 2522$ kJ/kg

$S_{10} = x_{10} S_{fg10} + S_{f10} \longrightarrow x_{10} = 0.801$ — نقطه ⑩

(10KPa)

$h_{10} = x_{10} h_{fg10} + h_{f10} \longrightarrow h_{10} = 2108.58$ kJ/kg

(10KPa)

* می دانیم که دبی خروجی از گرمکن (2) برابر (1 kg) است.

در هر گرمکن :

$$\begin{cases} \dot{Q}^{\circ} - \dot{W}^{\circ} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \\ \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \end{cases}$$

گرمکن ① -

$$\begin{cases} \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5 \\ \dot{m}_8 + \dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad , \quad (\dot{m}_5 = 1\ kg) \end{cases}$$

$$\longrightarrow \quad \dot{m}_8 = 0.095 \ kg$$
$$\dot{m}_4 = 0.905 \ kg$$

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

گرمکن ② -

$$\begin{cases} \dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 \\ \dot{m}_2 + \dot{m}_9 = \dot{m}_3 \quad , \quad (\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = 0.905) \end{cases}$$

$$\longrightarrow \quad \dot{m}_9 = 0.121 \ kg$$
$$\dot{m}_2 = 0.783 \ kg$$

کار پمپ :

$$W_p = W_{p3} + m_4 W_{p2} + m_2 W_{p1}$$

$$* \quad W_p = -3.74 \quad kJ/kg$$

کار توربین :

$$W_t = 1(h_7 - h_8) + (1 - m_8)(h_8 - h_9) + (1 - m_8 - m_9)(h_9 - h_{10})$$

$$* \quad W_t = +882.65 \quad kJ/kg$$

کار خالص :

$$W_{net} = 878.9 \quad kJ/kg$$

$$q_H = 1(h_7 - h_6) = 2379.88 \quad kJ/kg$$

راندمان :

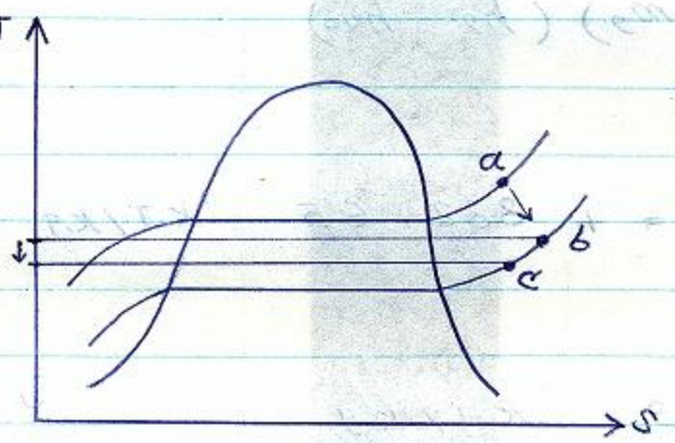
$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = 0.369$$

فرشاد سرایی - مهندس پایه یک تاسیسات مکانیکی
طراحی - نظارت - اجرا
نظام مهندسی: ۱۰-۴-۰-۱۷۲۷۶
پروانه مهندسی: ۱۰-۴۰۰-۰۲۸۱۵
شماره شهرسازی: ۱۰۴-۰۱۲۲۲

جزوه آموزشی درس ترمودینامیک (۲) آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران – دانشکده فنی (۱۳۷۳)

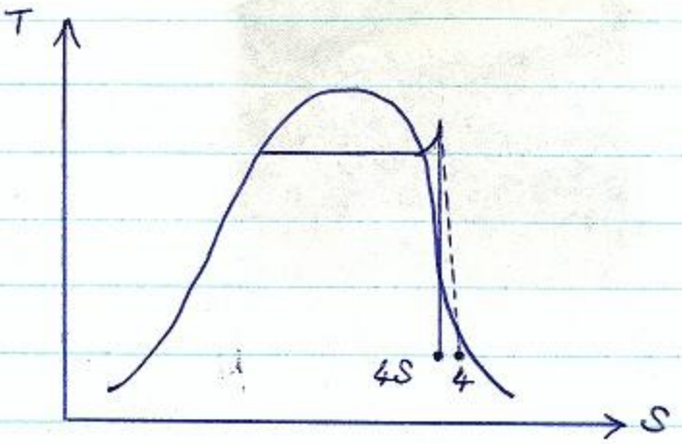
عوامل انحراف سیکلها از حالت ایده آل

1- افت فشار و تلفات دما (حرارت) در لوله ها.



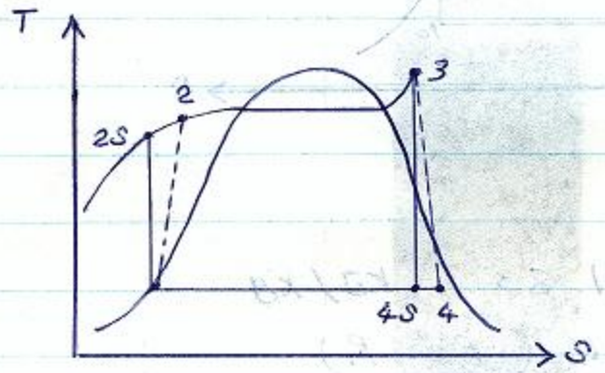
2- تلفات در دیگ بخار

3- تلفات در توربین



* راندمان توربین $\eta_{ts} = \frac{\text{کار واقعی}}{\text{کار ایده‌آل}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$

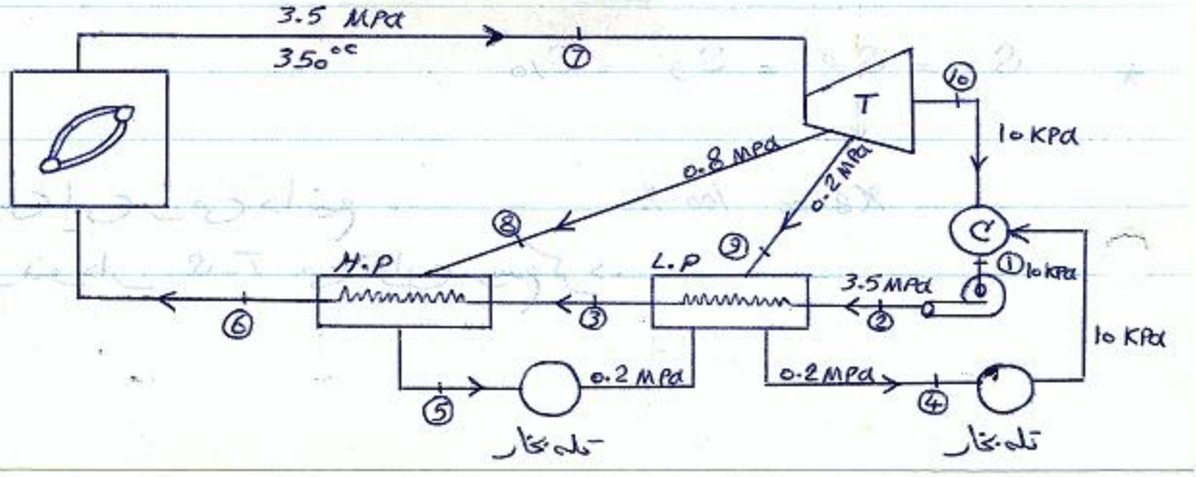
4 - تلفات در پمپ

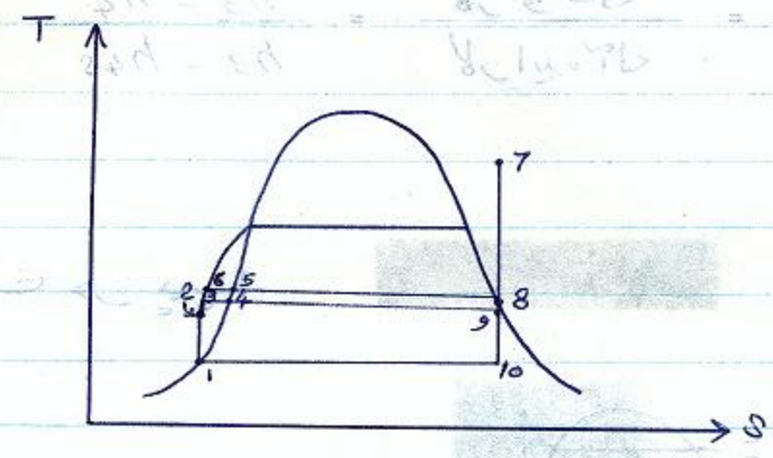


* راندمان پمپ $\eta_{ps} = \frac{\text{کار ایده‌آل}}{\text{کار واقعی}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$

5 - تلفات کندانسور

مسئله 7_9 - (گرمکن بسته)





* $h_1 = h_{f\ 10kPa} = 191.83 \quad kJ/kg$

$-W_p = h_2 - h_1 \approx v_1 (P_2 - P_1)$

$v_{f\ 10kPa} \quad 3500kPa \quad 10kPa$

$$\Rightarrow \begin{cases} -W_p = 3.52 \quad kJ/kg \\ h_2 = 195.35 \quad kJ/kg \end{cases}$$

* نقطه ③ در فشار 3.5 MPa و دارای دمای اشباع مربوط به فشار 0.2 MPa نقطه ⑨ است. $(T = 120.23)$

* $S_7 = S_8 = S_9 = S_{10}$

$x_8 \approx 100\ \%$

* از مسئله قبل این را می دانیم.
پس و را در نمودار T-S می توان رسم کرد.

مایع متراکم $h_3 = h_{3.5\ MPa,\ 120.23^\circ C} = 506\ KJ/kg$

$h_4 = h_{f\ 0.2\ MPa} = 504.7$

* در مبدل یا گرمکن ایده آل دمای سیال سرد ورودی برابر دمای سیال گرم خروجی است مثلاً در نقطه 6 دمای 0.8 MPa را دارد. یعنی نقطه ⑥ در فشار 3.5 MPa و دارای دمای اشباع مربوط به فشار 0.8 MPa ($T = 170.48$) نقطه 8 است.

$h_6 = h_{3.5\ MPa\ و\ 170.43} = 723\ KJ/kg$

* مطابق مسئله قبل :

$$\begin{cases} h_7 = 310.4 \\ h_8 = 2469.1 \\ h_9 = 2522 \\ h_{10} = 2108.58 \end{cases} \quad KJ/Kg$$

* برای گرمکن H.P :

پیوستگی : $\begin{cases} m_6 = m_3 = 1\ kg \\ m_8 = m_5 \end{cases}$

قانون اول : $\overset{0}{\cancel{Q}} - \overset{0}{\cancel{W}} = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i$

$$m_3 h_3 + m_8 h_8 = m_6 h_6 + m_5 h_5$$

$$\rightarrow \quad m_8 = \frac{h_6 - h_3}{h_8 - h_5}$$

$$(m_8 = m_5 = 0.106 \quad kg)$$

* خروجی از تله بخار گرمکن H.P مایع متراکم $\begin{vmatrix} 0.2\ MPa \\ 170.48^\circ \end{vmatrix}$ است اما چون این مقدار در جدول A1.4 موجود نیست بطور تقریبی از جدول A1.1 بازاء دمای فوق h_f را می خوانیم که برابر همان h_5 است.

* در گرمکن L.P :

$$\begin{vmatrix} m_9 + m_5 = m_4 \\ m_2 = m_3 = 1\ kg \\ m_5 = 0.106 \quad kg \end{vmatrix} \qquad (\text{پیوستگی})$$

قانون اول - $m_9 h_9 + m_5 h_5 + m_2 h_2 = m_3 h_3 + m_4 h_4$

$$\rightarrow \quad (m_9 = 0.143 \quad kg)$$

* کار توربین :

$$W_t = (h_7 - h_8) + (1 - m_8)(h_8 - h_9) + (1 - m_8 - m_9)(h_9 - h_{10})$$

$$\left(W_t = 866.3 \ \frac{KJ}{Kg}\right)$$

* کار خالص :

$$W_{net} = W_t - W_p = 862.78 \ KJ/Kg$$

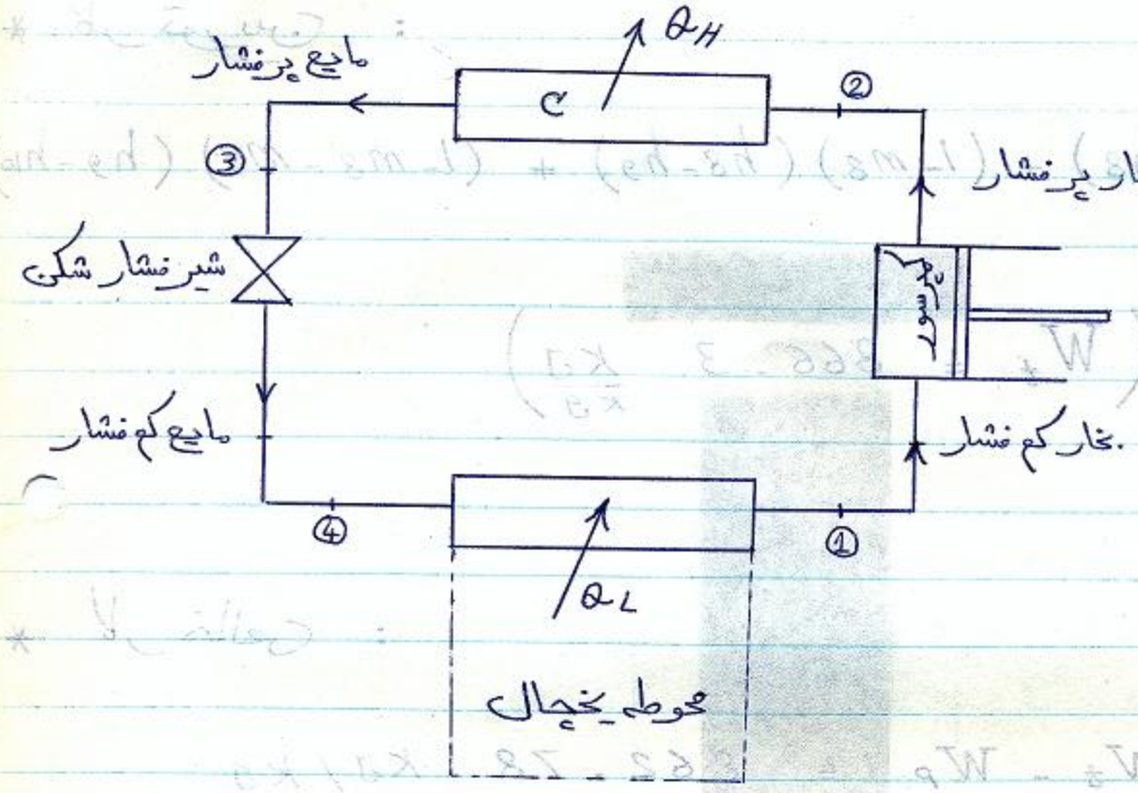
$$q_H = h_7 - h_6 = 2381 \ KJ/Kg$$

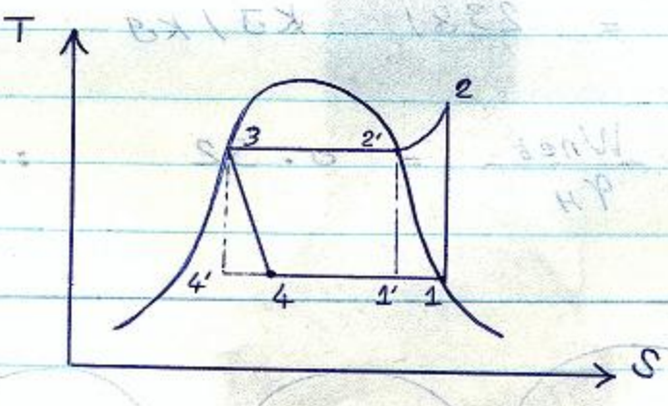
* راندمان :

$$\longrightarrow \quad \eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = 0.32$$

Ritrigeration Cycle سیکل تبرید

* سیکل تراکمی تبرید :



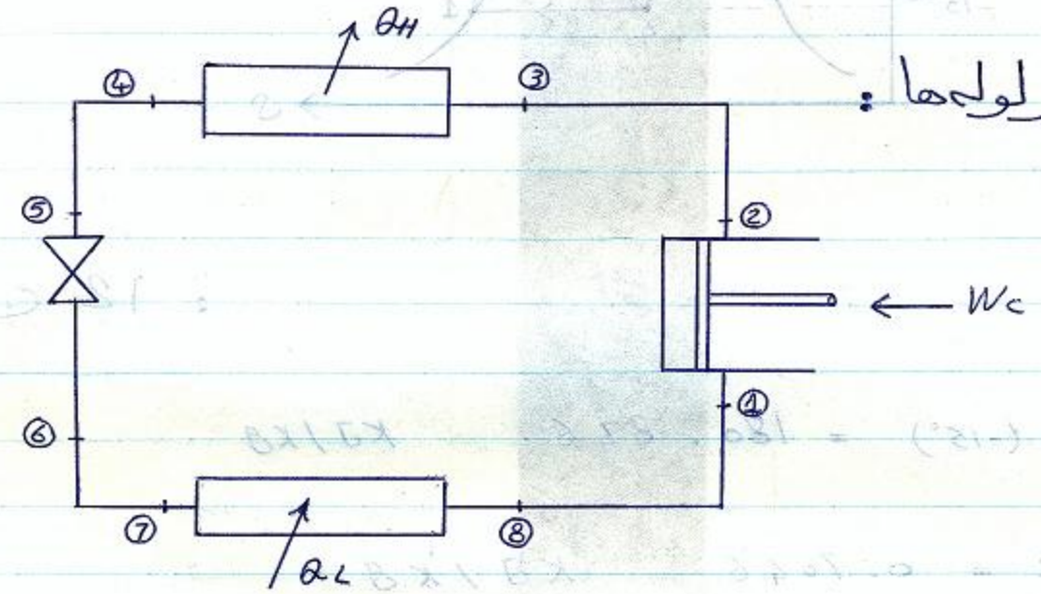


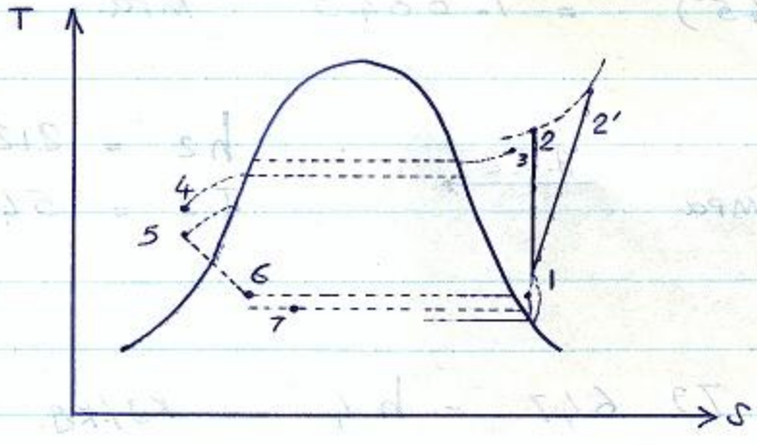
* سیکل 1'2'3'4' سیکل تبرید کارنو است.
* در فاصله 4-3 افزایش آنتروپی داریم چون تحول افت فشار در شیر فشار شکن کاملاً برگشت ناپذیر است.

تعریف ضریب عملکرد (Coefficient Of Performance)

$$\beta \text{ یا } C.O.P = \frac{q_L}{W_c}$$

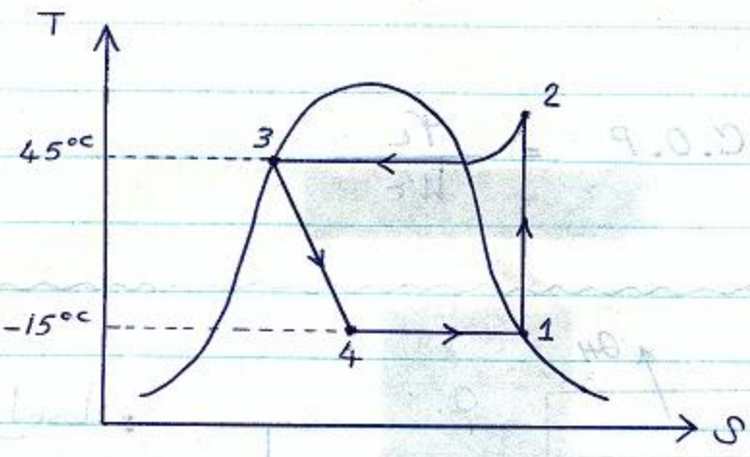
افت در لوله‌ها :





* در هر مسیر افت دما و فشار داریم .

مسئلة 9-18



* فرئون 12 :

$h_1 = h_g\,(-15°) = 180.846$ KJ/kg

$S_1 = S_2 = 0.7046$ KJ/kg

$P_2 = P_3 = P_{sat\,(45°)} = 1.0843$ MPa

$S_2 = 0.7046$	A.3.2 →	$h_2 = 212.401$
$P_2 = 1.0843$ MPa		$T_2 = 54.7°C$

$h_3 = h_f\,(45°) = 79.647 = h_4$ KJ/kg

$W_c = h_2 - h_1 = 31.56$ KJ/kg

$q_L = h_1 - h_4 = 101.2$ KJ/kg

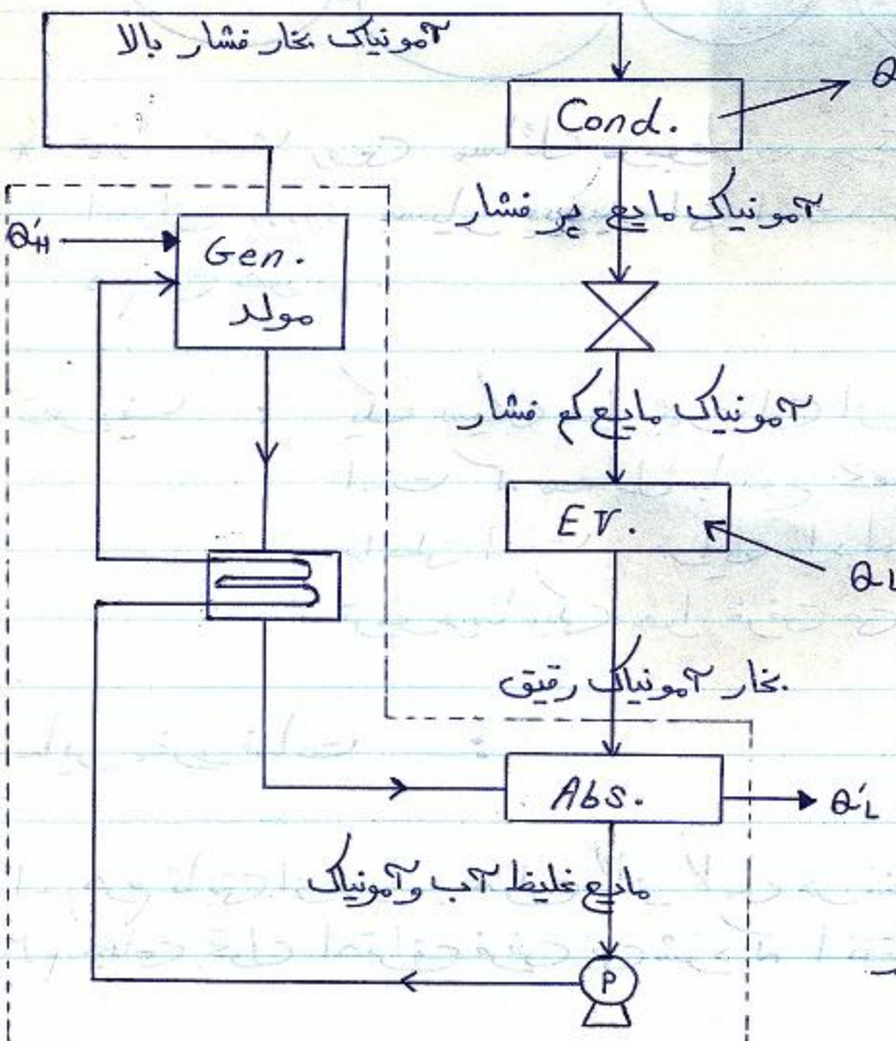
$$\beta = \frac{q_L}{W_c} = 3.207$$

* آمونیاک : به روش مشابه :

$$\beta = \frac{q_L}{W_c} = 3.347$$

---

* سیکل تبرید جذبی (Absorption)



قسمت خط چین کار کمپرسور را انجام می دهد.

بجای کمپرس کردن آمونیاک را در آب حل می کنیم و آب را پمپ می کنیم و پمپ کردن کار کمتری می خواهد تا کمپرس کردن لذا این راندمان را بالا می برد. ایراد آن جمع دستگاه ها است لذا در سردخانه ها استفاده می شود.

$$\left(\beta = \frac{Q_L}{Q'_H + W_P} \right)$$

سیکلهای هوا — Air Cycles

* عمدهٔ بحث روی مسائل مربوط به موتورهای احتراق داخلی است. احتراق پدیدهٔ بسیار پیچیده ای است زیرا تعادل شیمیائی در آن بر هم می خورد.

تعریف : یک سیکل هوا مجموعه ای از تحولات ترمودینامیکی ایده آلی است که معادل با نوع بخصوصی از موتورهای احتراق - داخلی است. در این رابطه سیال عامل سیالی با خصوصیات ترمودینامیکی هوا فرض می شود.

سایر مفروضات :

۱- جرم ثابتی از هوا بعنوان گاز کامل در نظر گرفته می شود.
۲- بجای تحول احتراق فرض می شود که انتقال حرارت از بیرون به

سیستم صورت می گیرد.

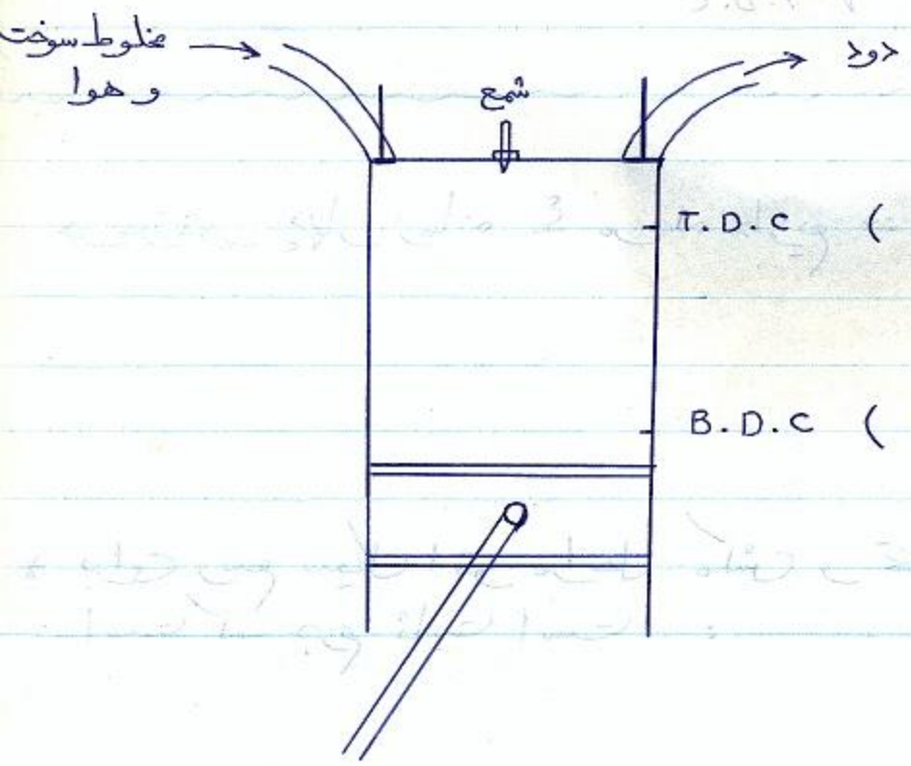
۳- در نهایت سیکل با پس دادن حرارت به بیرون تکمیل می شود (برای ارضاء قانون کلوین پلانک).

۴- کلیه تحولات بازگشت پذیر داخلی هستند.

۵- خصوصیات ترمودینامیکی هوا ثابت فرض می شود (مطابق با شرایط متعارفی).

سیکل اتو (otto)

* این سیکل معادل است با تحولاتی که در موتورهای اشتعال در اثر جرقه، (بنزینی) یا (Spark Ignition) صورت می گیرد.



* فضای مرده (clearcence Volume) : حجم سیلندر وقتی که پیستون در T.D.C قرار می گیرد.

* حجم جابجا شده (dissplacement Volume) :

$$(V_{B.D.C} - V_{T.D.C})$$

* کورس پیستون (Stroke) : مسیر حرکت پیستون بین نقاط مرگ بالا و پایین.

* حجم کل = (حجم جا بجا شده + فضای مرده)

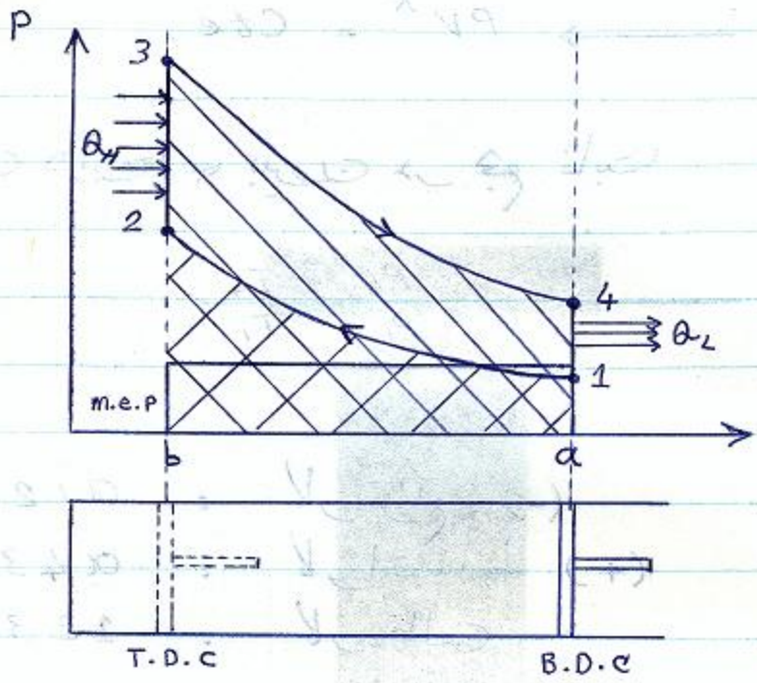
* نسبت تراکم (Compression ratio)

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{B.D.C}}{V_{T.D.C}}$$

در موتور چهار زمانه ٤ مرحله داریم :

۱- مکش
۲- تراکم
۳- احتراق
٤- تخلیه

* برای رسم سیکل اتو مراحل مکش و تخلیه را نداریم چون فرض این است که جرم ثابت است :



$$W = \int P\,dV$$

2-1- تحول تراکم آدیاباتیک بازگشت پذیر $(S = cte)$

$$* \quad S_1 = S_2 \longrightarrow \begin{cases} PV^K = cte \\ \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^K \\ \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{K-1} \\ \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} \end{cases}$$

2-3- انتقال حرارت از بیرون در حجم ثابت

$$* \quad V_2 = V_3 \longrightarrow \frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

3-4- انبساط آدیاباتیک برگشت پذیر

* $S_3 = S_4 \longrightarrow PV^K = Cte$

۴-۱- انتقال حرارت به بیرون در حجم ثابت

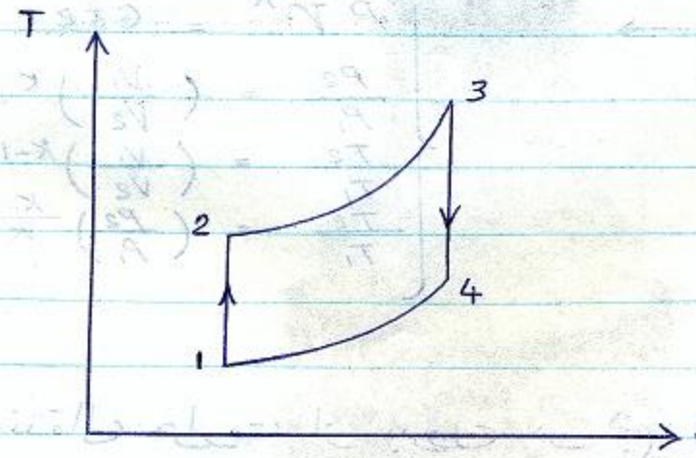
* $V_1 = V_4 \longrightarrow \frac{P_4}{P_1} = \frac{T_4}{T_1}$

سطح $a1\,2\,6\,a$: کار تراکم (-)

" $a\,4\,3\,6\,a$: کار انبساط (+)

" $1\,2\,3\,4\,1$: کار خالص

نمودار (T-S) :



$Q = \int T dS$

برخی از عوامل انحراف سیکل :

۱- عدم در نظر گرفتن مکش و تخلیه .

۲- خصوصیات ترمودینامیکی با دما تغییر می کنند .

۳- تحول احتراق برگشت ناپذیر است .

۴- از انتقال حرارت در مراحل تراکم و انبساط صرفنظر شده است.

فشار مؤثر متوسط (m.e.p)

(mean effective pressure)

* $m.e.p = \frac{W_{net}}{V_1 - V_2}$

* $W_{net} = \underbrace{(m.e.p)}_{\text{عرض}} \underbrace{(V_1 - V_2)}_{\text{طول}}$

* m.e.p هم بعد با فشار است و سعی می شود تا حد ممکن زیاد شود .

راندمان :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

* قانون اوّل برای هر مرحله :

$$\begin{cases} Q - W = \Delta U \\ Q - W = m c_{v_0} \Delta T \end{cases}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{m c_{v_0} (T_4 - T_1)}{m c_{v_0} (T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (I)$$

* از طرف دیگر : در تحول 1-2 :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = r^{k-1} \quad (II)$$

در تحول 3-4 :

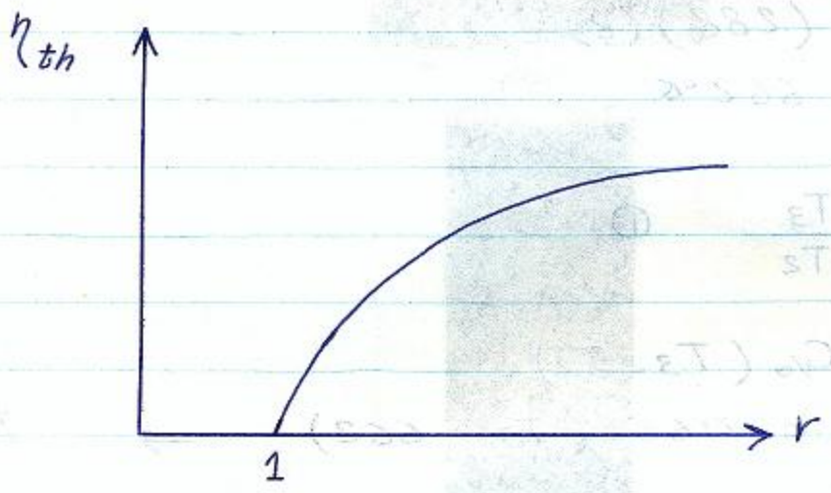
$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} = r^{k-1} \quad (III)$$

* از برابری روابط (II) و (III) :

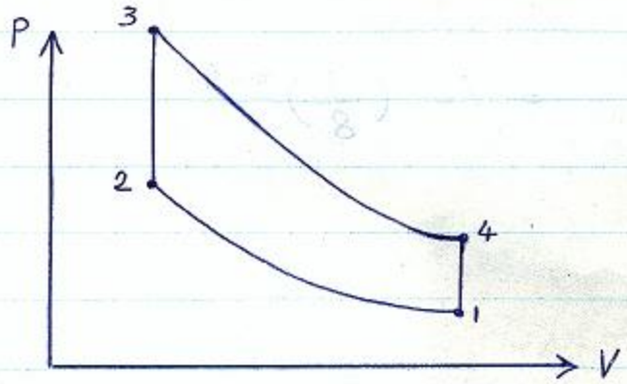
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad (IV)$$

$$(I), (IV) \longrightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (V)$$

Ⓥ , Ⓘ → $\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{k-1}$



مسئله 9-25



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

$P_2 = (100)(8)^{1.4}$ →

$$P_2 = 1838 \quad KPa$$

* $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{K-1} = r^{K-1}$

$$T_2 = (288)(8)^{0.4}$$
$$T_2 = 662\,^{\circ}K$$

* $\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2}$ ①

$$q_H = C_{v_0}(T_3 - T_2)$$
$$2800 = 0.7165\,(T_3 - 662) \longrightarrow T_3 = 4570\,^{\circ}K$$

① $\longrightarrow$ $P_3 = (1838)\left(\frac{4570}{662}\right)$

$$P_3 = 12692 \quad KPa$$

* $\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{K-1} = 1 - \left(\frac{1}{8}\right)^{0.4}$

$$\eta_{th} = 0.565$$

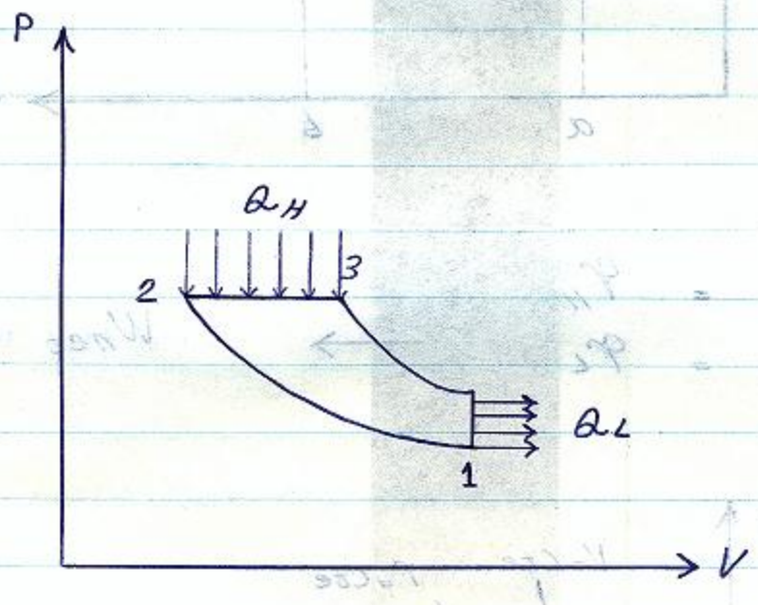
* $m.e.p = \frac{W_{net}}{v_1 - v_2} = \frac{\eta_{th} \times q_H}{v_1\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)} =$

$$\frac{\eta_{th} \times q_H}{\frac{RT_1}{P_1}\left(1 - \frac{1}{r}\right)} \longrightarrow$$

$$m.e.p = 2187 \quad KPa$$

تمرینات - 9 - 8 ، 17 ، 23 ، 36 ، 41

سیکل دیزل Diesel



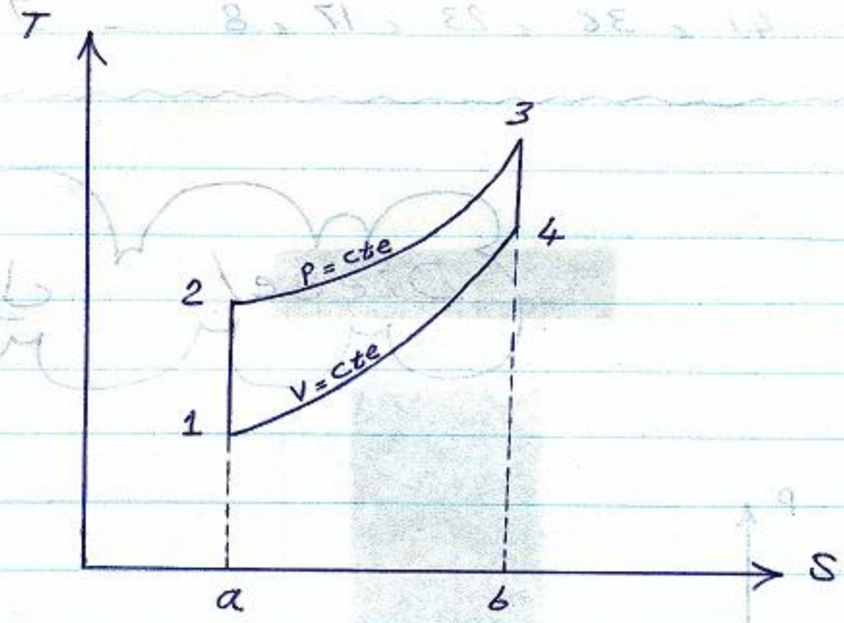
2 - 1 - تراکم ۲دیاباتیک و بازگشت پذیر هوا

3 - 2 - انتقال حرارت به سیستم در فشار ثابت (پاشش سوخت)

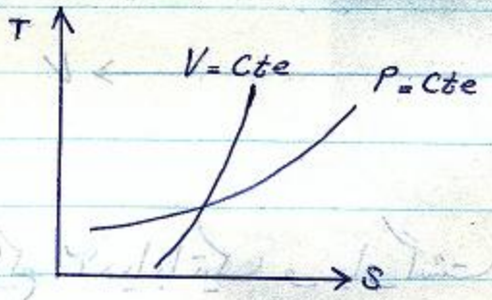
4 - 3 - انبساط ۲دیاباتیک بازگشت پذیر

1 - 4 - پس دادن حرارت از سیستم در حجم ثابت

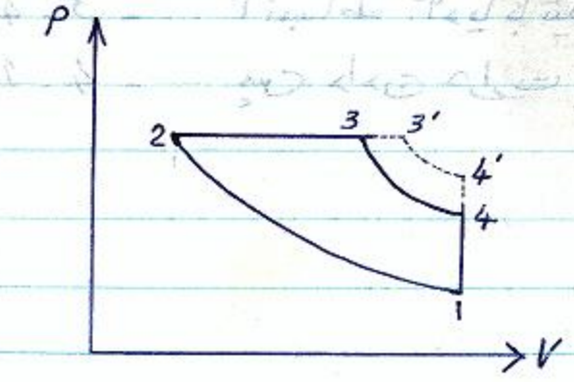
$$\begin{cases} V_4 = V_1 \\ P_3 = P_2 \\ r = \dfrac{V_1}{V_2} \end{cases}$$

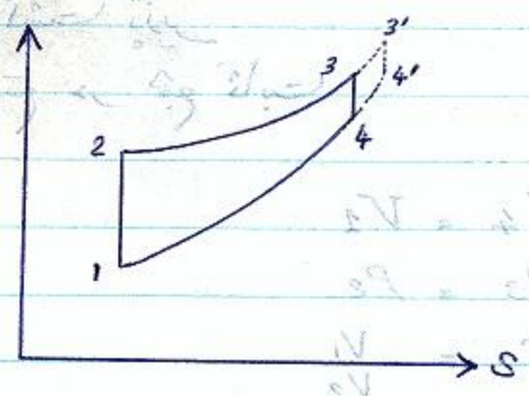


$$\begin{cases} S_{a2360a} = q_H \\ S_{a1460a} = q_L \end{cases} \longrightarrow W_{net} = S_{12341}$$

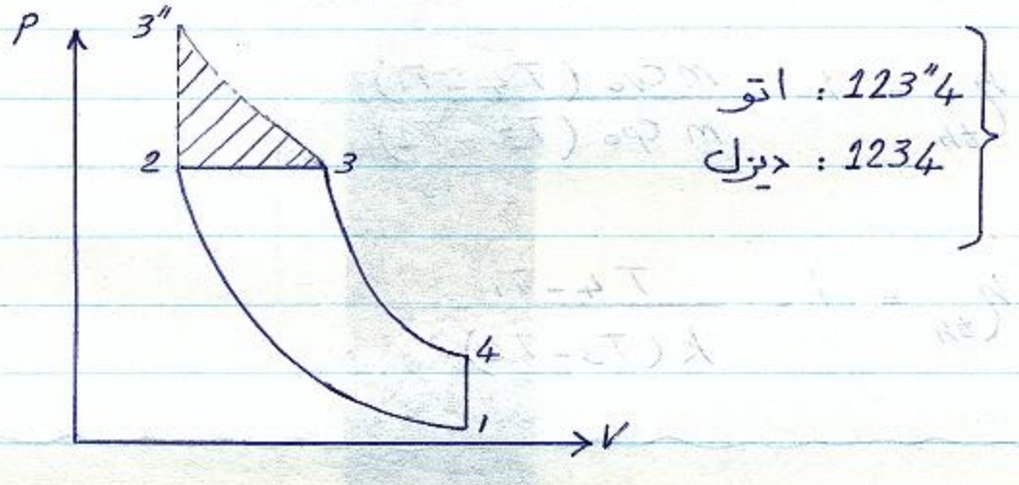


ازنظر شیب :





* نمودار T-S نشان می دهد که با افزایش دمای Max (افزایش - سوخت) راندمان افزایش نمی یابد چون منحنی (P و V ثابت) با هم همگرا است و هرچه پیش رود 3' و 4' بیشتر به هم نزدیک - می شوند و کار افزوده شده به حرارت مصرف شده نمی ارزد.



* اگر دو سیکل اتو و دیزل با نسبت تراکم یکسان داشته باشیم راندمان سیکل اتو بالاتر است امّا نسبت تراکم سیکل اتو را نمی توان از یک حدی بالاتر برد لذا در عمل راندمان دیزل بالا تر است.

راندمان سیکل دیزل

$Q - W = \Delta U \rightarrow$

$Q_L = U_4 - U_1$ چون حجم ثابت است $W = 0$

$Q_L = m C_{v0} (T_4 - T_1)$

تحول 2-3 : $Q_H - P_3 (V_3 - V_2) = U_3 - U_2$

چون $(H = U + PV) \rightarrow Q_H = H_3 - H_2$

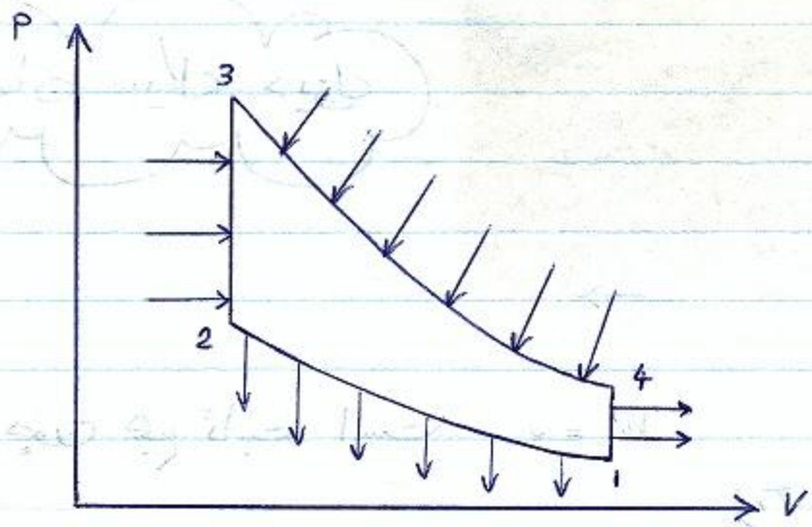
$Q_H = m c_{p0} (T_3 - T_2) \rightarrow$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{m c_{v0} (T_4 - T_1)}{m c_{p0} (T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k (T_3 - T_2)}$$

سیکل دی اریکسون و استرلینگ

سیکل استرلینگ :

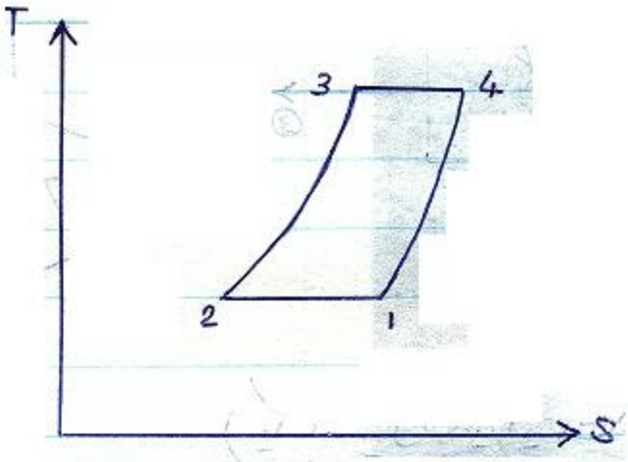


1_2 - تراکم ایزوترم

2_3 - انتقال حرارت در $V = Cte$

3_4 - انبساط ایزوترم

4_1 - پس دادن حرارت در $V = Cte$



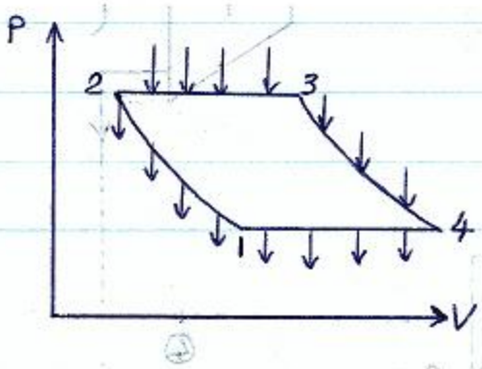
سیکل اریکسون :

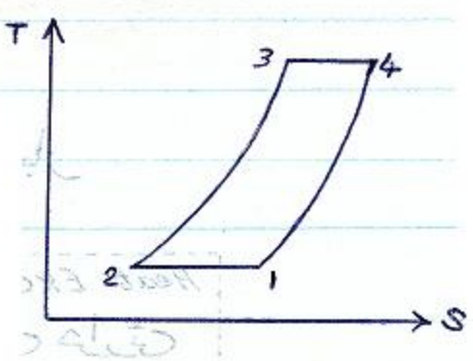
1_2 - تراکم ایزوترم

2_3 - انتقال حرارت در $P = Cte$

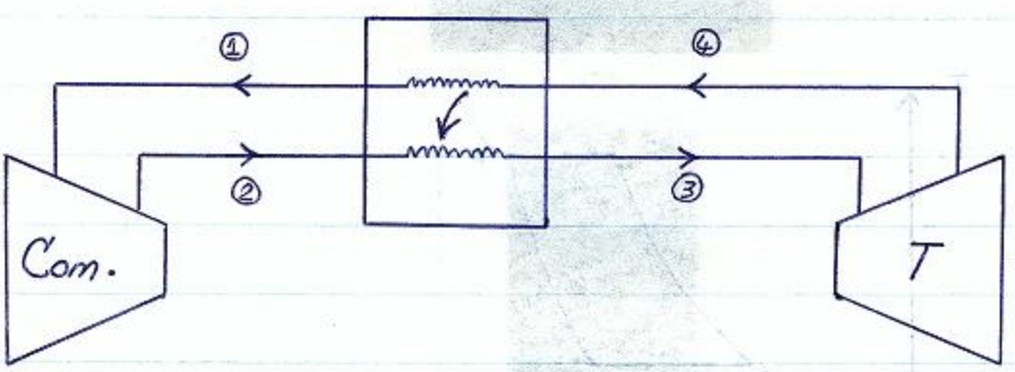
3_4 - انبساط ایزوترم

4_1 - پس دادن حرارت در $P = Cte$



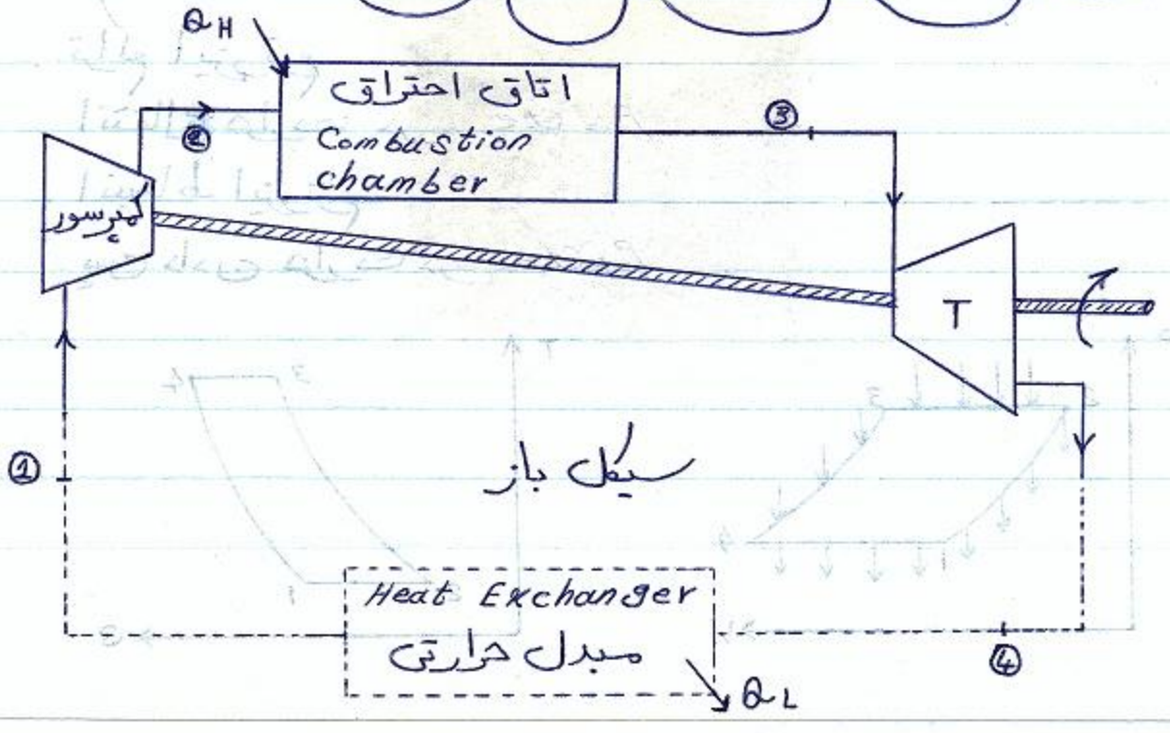


* مثال سیکل اریکسون : کمپرسوری داریم که به طریقی خنک می شود (تا ایزوترم شود) و توربینی داریم که گرمش می کنیم.



(یک سیکل خیالیست)

سیکل برایتون (توربین گاز)

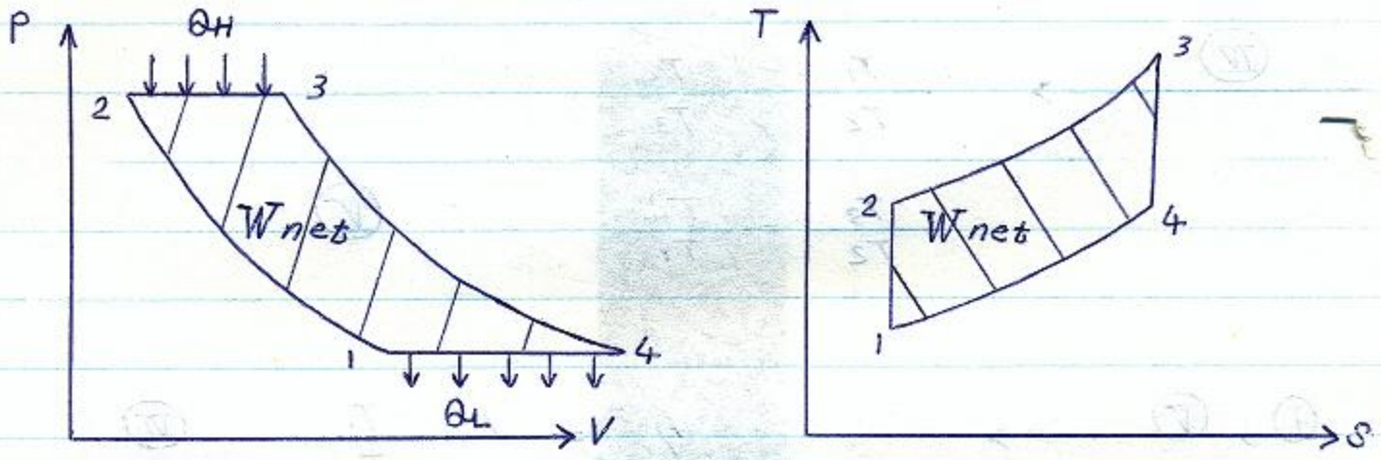


1-2 - تراکم آدیاباتیک و بازگشت پذیر در کمپرسور

2-3 - انتقال حرارت در فشار ثابت در اتاق احتراق

3-4 - انبساط آدیاباتیک و بازگشت پذیر در توربین

4-1 - پس دادن حرارت در فشار ثابت در مبدل حرارتی



در سیکل فوق :

$$\left.\begin{aligned} P_3 &= P_2 \\ P_4 &= P_1 \end{aligned}\right\} \rightarrow$$

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{P_1}{P_2} \qquad (IV)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{m c_{p_0} (T_4 - T_1)}{m c_{p_0} (T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} \qquad (I)$$

از طرف دیگر در تحول آیزنتروپیک 1-2 :

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{K/K-1} \quad (II)$$

3-4 تحول :

$$\frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{K/K-1} \quad (III)$$

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

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

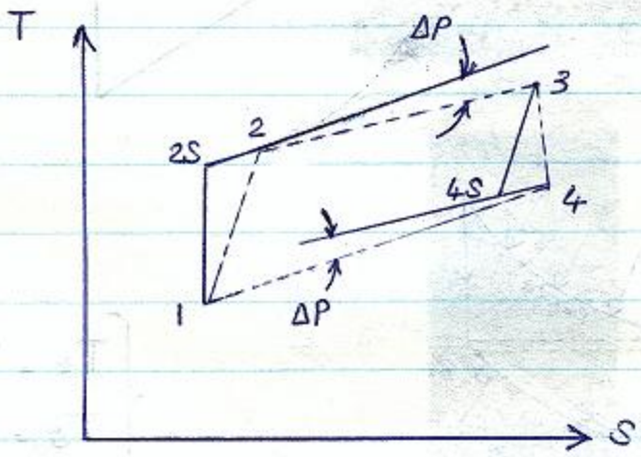
$$(I), (V) \longrightarrow \quad \eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (VI)$$

$$(II), (VI) \longrightarrow \quad \eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}}$$

نسبت فشار $r_p = \frac{P_2}{P_1}$ $\longrightarrow$

$$\eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{r_p}\right)^{\frac{K-1}{K}}$$

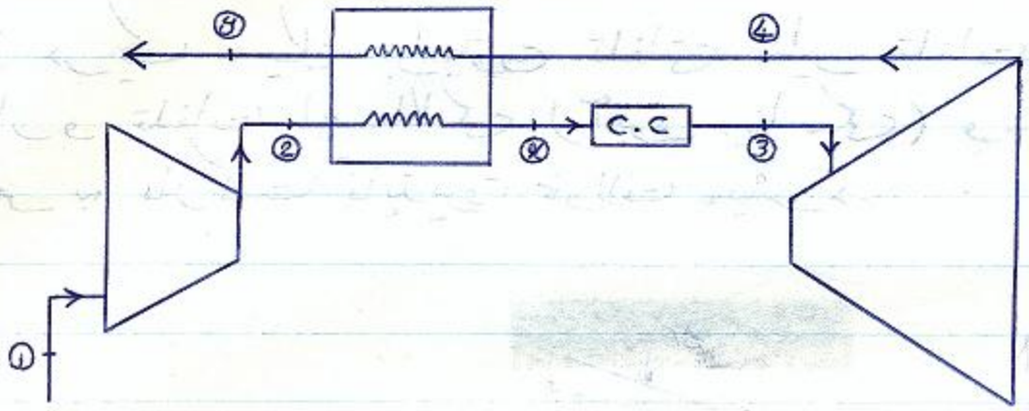
* عملاً در یک سیکل برایتون تلفاتی نظیر تلفات حرارتی و افت فشار و تلفات اصطکاکی (آیرودینامیکی) و... وجود دارد که منجر به بازگشت ناپذیری تحولات میشود.

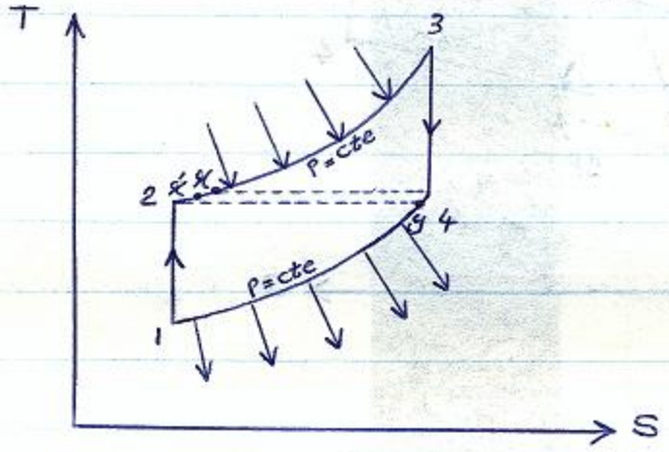


$$\eta_{Comp.} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\eta_{turb.} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}}$$

سیکل برایتون با بازیاب





$$\begin{cases} T_x = T_4 \\ T_y = T_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_H = C_p (T_3 - T_x) \\ W_t = C_p (T_3 - T_4) \end{cases} \longrightarrow W_t = q_H$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = \frac{W_t - W_c}{q_H} = 1 - \frac{W_c}{W_t}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{C_p (T_2 - T_1)}{C_p (T_3 - T_4)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right)} \quad (1)$$

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{P_1}{P_2} \Longleftarrow (P_4 = P_1) \, , \, (P_3 = P_2)$$

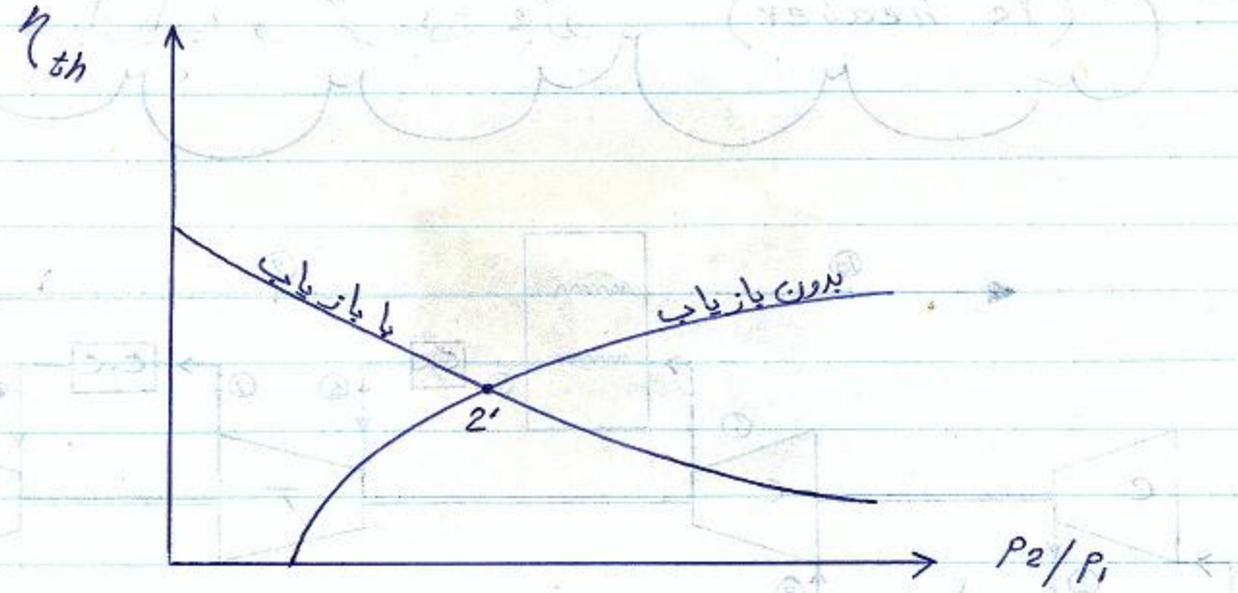
فرایند 3-4 : $\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{K-1/K} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{K-1/K}$ ②

فرایند 1-2 : $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{K-1/K}$ ③

①، ②، ③ $\longrightarrow$ $\eta_{th} = 1 - \frac{T_1\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{K-1/K} - 1\right]}{T_3\left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{K-1/K}\right]}$

$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{K-1/K}$

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



* دمای نقطه (2) حتماً باید پایین‌تر از (4) باشد.

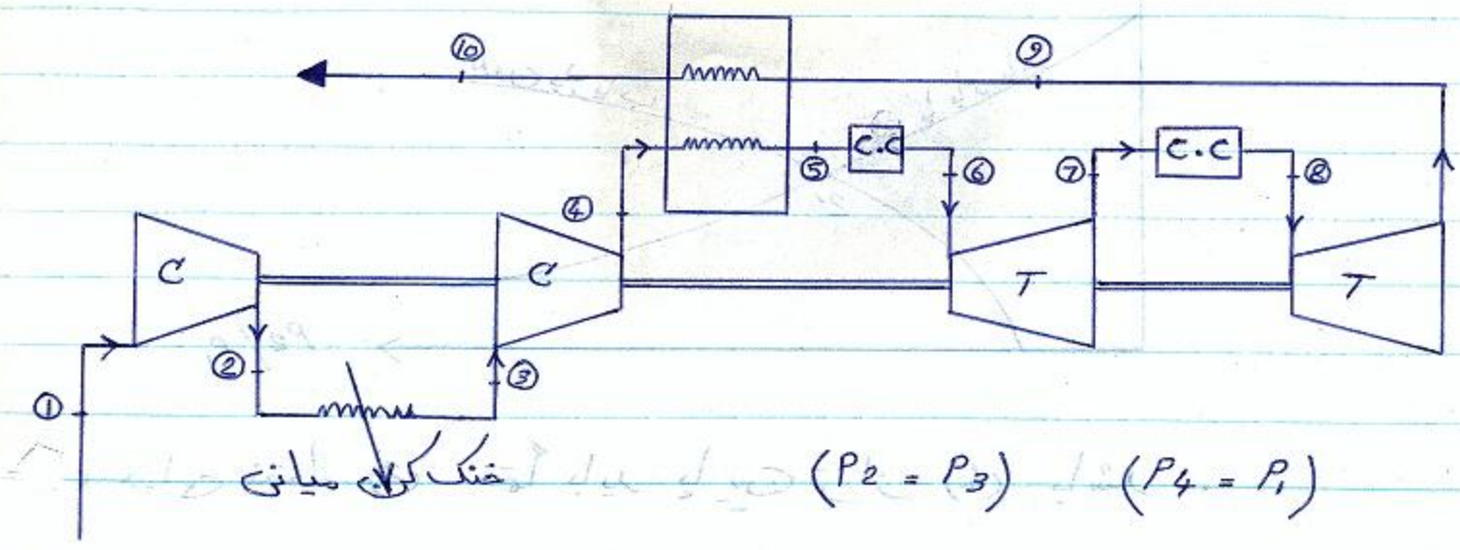
راندمان مبدل (ضریب تأثیر) effectiveness

$$\eta_{reg} = \frac{\text{حرارت منتقل شده واقعی}}{\text{ایده آل}\quad "\quad "} = \frac{h_{x'} - h_2}{h_x - h_2}$$

(بافرض C_p ثابت)

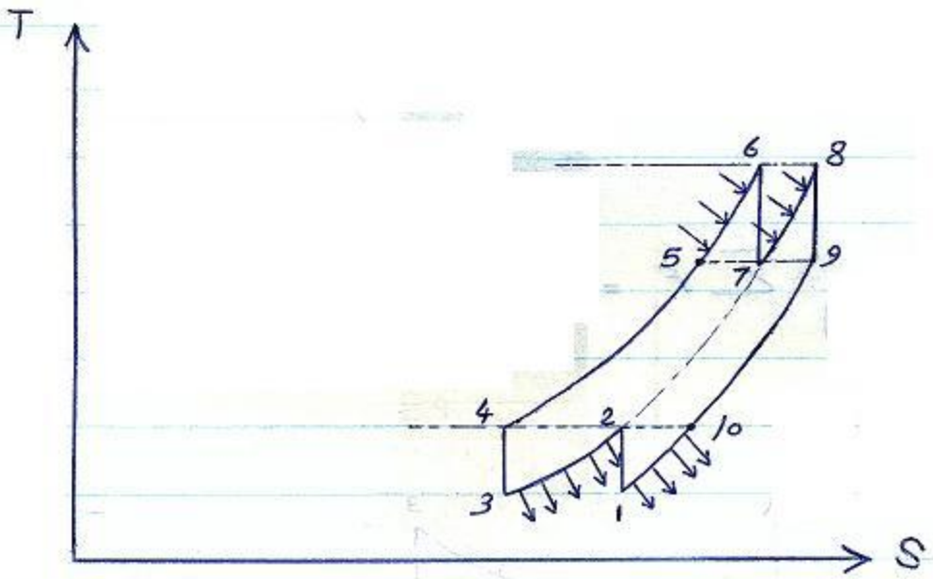
$$\eta_{reg} = \frac{T_{x'} - T_2}{T_x - T_2}$$

سیکل برایتون با خنک کن میانی (Inter Cooler) ، بازیاب و گرمکن مجدد (re heater)



فرشاد سرایی-مهندس پایه یک تاسیسات مکانیکی
طراحی-نظارت-اجرا
نظام مهندسی: ۱۰-۴-۰-۱۷۲۷۶
پروانه مهندسی: ۱۰-۴۰۰-۰۲۸۱۵
شماره شهرسازی: ۱۰۴-۰۱۲۲۲

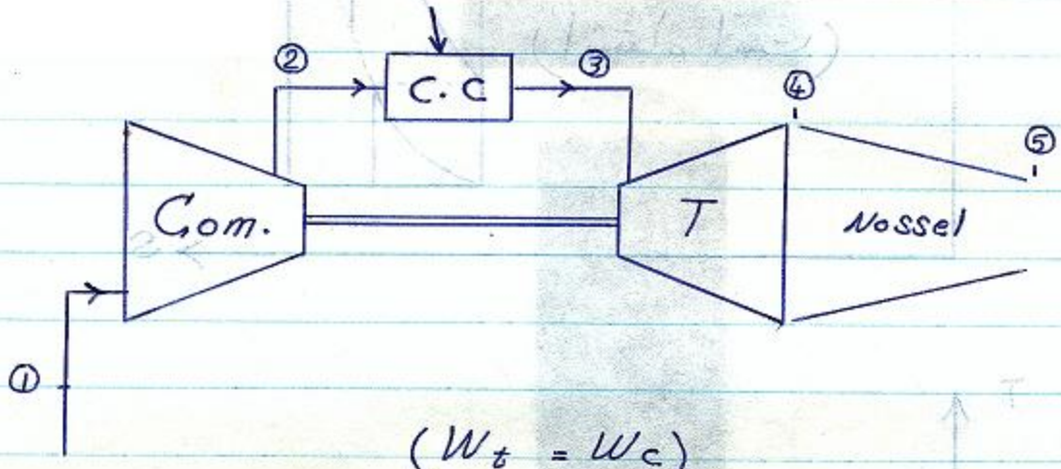
جزوه آموزشی درس ترمودینامیک (۲) **آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز**
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران – دانشکده فنی (۱۳۷۳)



$$\begin{cases} T_6 = T_8 \\ T_5 = T_7 = T_9 \\ T_4 = T_2 = T_{10} \\ T_3 = T_1 \end{cases}$$

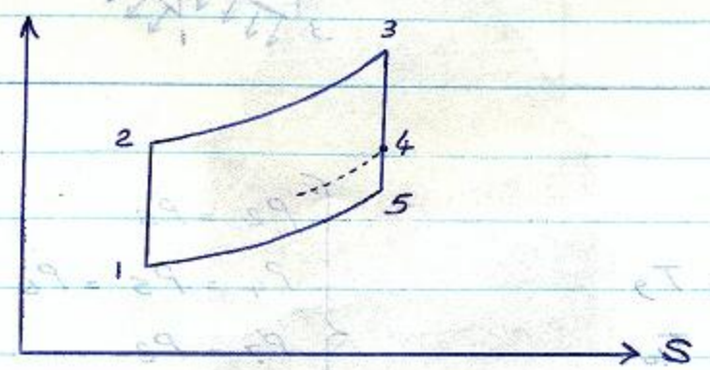
$$\begin{cases} P_2 = P_3 \\ P_4 = P_5 = P_6 \\ P_7 = P_8 \\ P_9 = P_{10} = P_1 \end{cases}$$

سیکل هوائی موتور جت



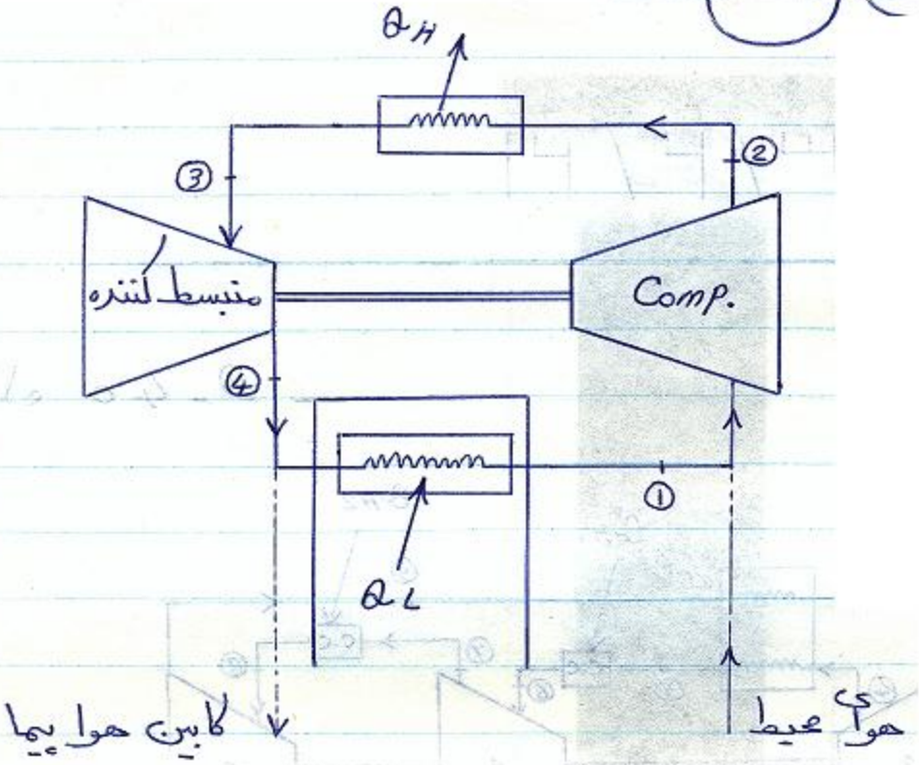
$(W_t = W_c)$

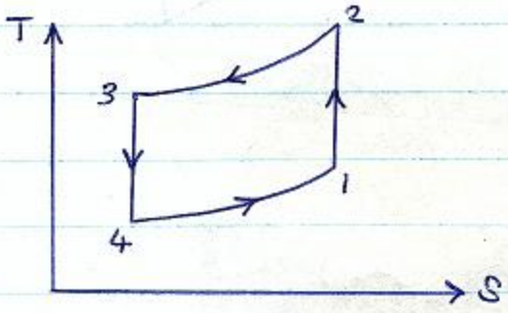
(نیروی رانش Thrust) $\quad \sum F = \dot{m} (\vec{V}_5 - \vec{V}_4)$



$(P_5 = P_1)$

سیکل هوائی تبرید





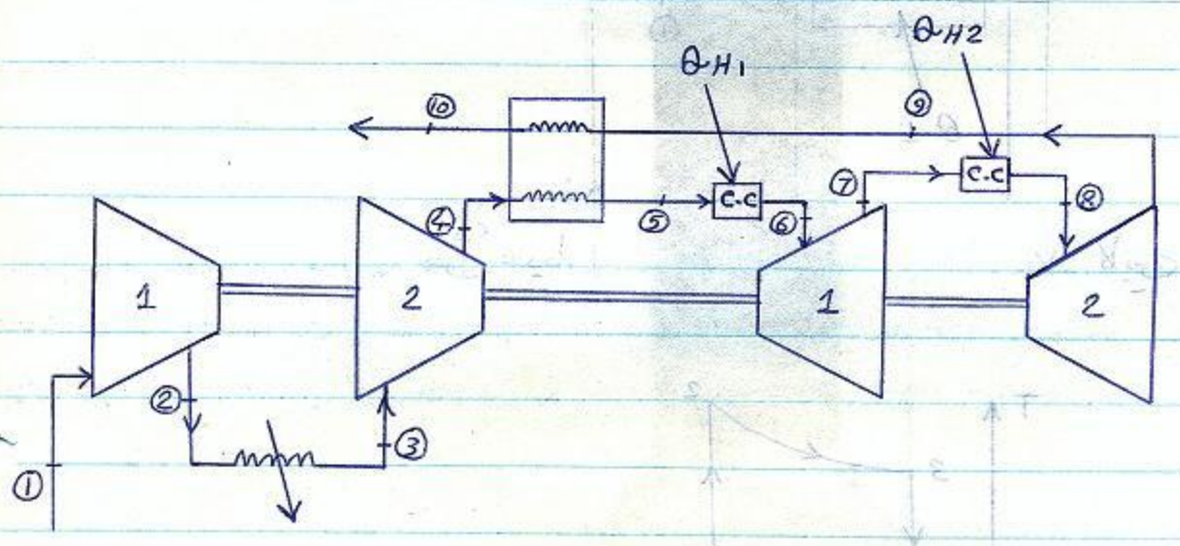
* * حالت خط چین برای خنک کردن هوای کابین هواپیما است (معمولاً قسمتی از هوای کمپرسور خود موتور را برمی‌دارند).

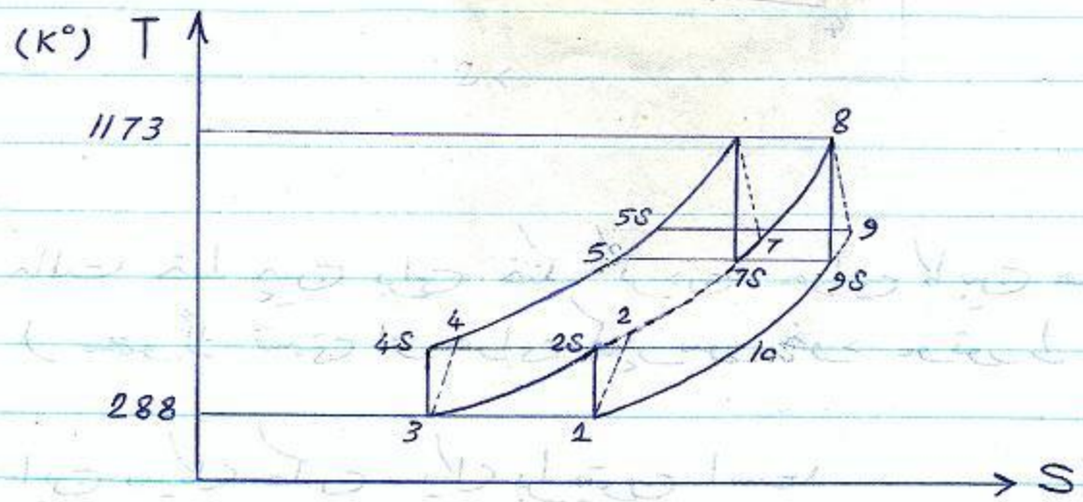
* این سیکل عکس سیکل برایتون است.

فرشاد سرایی - مهندس پایه یک تاسیسات مکانیکی
طراحی - نظارت - اجرا
نظام مهندسی: ۱۰-۴-۰-۱۷۲۷۶
پروانه مهندسی: ۱۰-۴۰۰-۰۲۸۱۵
شماره شهرسازی: ۱۰۴-۰۱۲۲۲

جزوه آموزشی درس ترمودینامیک (۲) **آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز**
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران – دانشکده فنی (۱۳۷۳)

مسئله 9.40





$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} = \frac{P_6}{P_7} = \frac{P_8}{P_9} = 2$$

$$\frac{T_{2S}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{K-1/K}$$

$$T_{2S} = (288)(2)^{0.4/1.4} = 351\ ^{\circ}K$$

$$T_{4S} = T_{2S} = 351\ ^{\circ}K$$

$$\frac{T_{7S}}{T_6} = \left(\frac{P_7}{P_6}\right)^{K-1/K}$$

$$T_{7S} = 1173\left(\frac{1}{2}\right)^{0.4/1.4} = 962\ ^{\circ}K$$

$$T_{9S} = T_{7S} = 962\ ^{\circ}K$$

کار ایده آل : $W_{cs} = 2C_p\,(T_{2S} - T_1)$

$$W_{cs} = 2(1.0035)(351 - 288) = 126.6\ \frac{KJ}{Kg}$$

$$\eta_c = \frac{W_{cs}}{W_c} \Longrightarrow W_c = \frac{W_{cs}}{\eta_c} \rightarrow$$

$$\left(W_c = 158.3\ \ KJ/kg\right)$$

* در $2C_p(T_{2S}-T_1)$ ضرب در 2 برای این است که دو Com. مشابه داریم.

$$W_{tS} = 2C_{p_o}(T_6 - T_{7S})$$

$$W_{tS} = 2(1.0035)(1173 - 962)$$

$$W_{tS} = 423 \quad KJ/kg \longrightarrow$$

$$\left(W_t = \eta_t \cdot W_{tS} = 359.4 \quad KJ/kg\right)$$

$$W_{net} = W_t - W_c = 201.1 \quad KJ/kg$$

$$q_H = C_p(T_6 - T_5) + C_p(T_8 - T_7)$$

$$\eta_t = \frac{T_6 - T_7}{T_6 - T_{7S}} \longrightarrow 0.85 = \frac{1173 - T_7}{1173 - 962}$$

$$\longrightarrow \quad (T_7 = 994^{\circ}K)$$

$$\eta_{reg} = \frac{T_5 - T_4}{T_{5S} - T_4} \longrightarrow 0.6 = \frac{T_5 - 367}{994 - 367}$$

$$\longrightarrow \quad (T_5 = 743^{\circ}K)$$

$$T_{5S} = T_9 = T_7 = 994$$

$$q_H = (1.0035)\left[(1173-743)+(1173-994)\right] \rightarrow$$

$$\left(q_H = 611.1 \ \ kJ/kg\right)$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} \rightarrow \eta_{th} = 0.33$$

فرشاد سرایی- مهندس پایه یک تاسیسات مکانیکی
طراحی- نظارت- اجرا
نظام مهندسی: ۱۰-۴-۰-۱۷۲۷۶
پروانه مهندسی: ۱۰-۴۰۰-۰۲۸۱۵
شماره شهرسازی: ۱۰۴-۰۱۲۲۲

جزوه آموزشی درس ترمودینامیک (۲) آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران – دانشکده فنی (۱۳۷۳)

فصل 11 - مخلوطها و محلولها

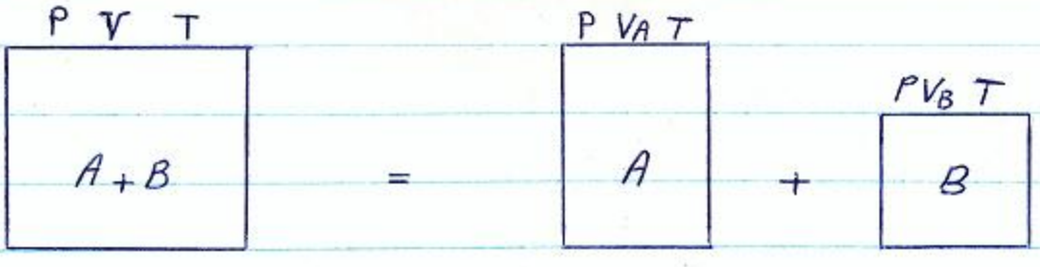
Mixtures And Solutions

* نسبت مولی (Mole Fraction) :

$$y_i = \frac{\text{تعداد مول جزء } i \text{ در مخلوط}}{\text{تعداد مول کل مخلوط}} = \frac{n_i}{n}$$

* نسبت جرمی (Mass Fraction) :

$$mf_i = \frac{\text{جرم جزء } i \text{ از مخلوط}}{\text{جرم کل مخلوط}} = \frac{m_i}{m}$$



نسبت حجمی (Volum Fraction)

(برای هر جزء i در مخلوط) :

$$\mathcal{V}f_i = \frac{V_i}{V}$$

$$\begin{cases} PV = n\bar{R}T \\ PV_A = n_A\bar{R}T \\ PV_B = n_B\bar{R}T \end{cases} \longrightarrow \mathcal{V}f_i = \frac{n_i}{n} = y_i$$

$$n = n_A + n_B \longrightarrow V = V_A + V_B$$

« قانون جمع حجمهای آماگات »

---

* با تقسیم طرفین رابطه فوق بر (V)

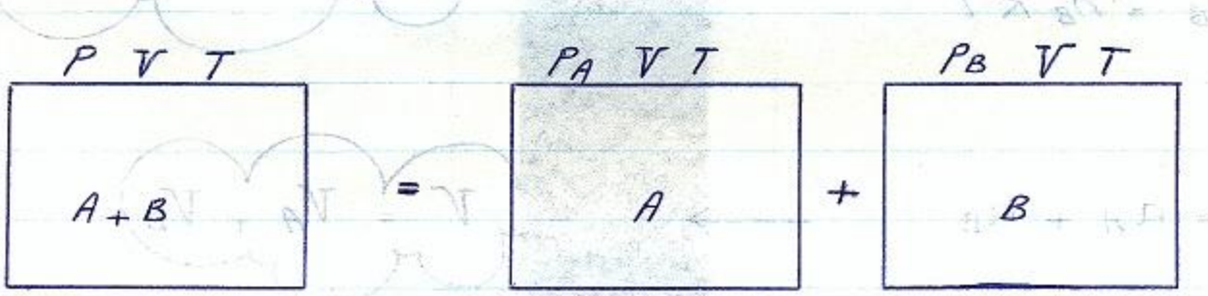
$$1 = \mathcal{V}f_A + \mathcal{V}f_B \longrightarrow$$

$$\sum_{i=1}^{n} \mathcal{V}f_i = 1$$

می‌توان نشان داد :

$$\sum_{i=1}^{n} mf_i = 1$$

$$\sum_{i=1}^{n} g_i = 1$$



$PV = n\bar{R}T$ $\quad P_A V = n_A \bar{R} T$ $\quad P_B V = n_B \bar{R} T$

$(n = n_A + n_B) \longrightarrow P = P_A + P_B$

فشار کلی

فشار جزئی

(Partical presure)

« قانون دالتون »

$$\frac{P_A}{P} = \frac{n_A}{n} = y_A \longrightarrow$$

$$P_A = P \cdot y_A$$

$$P_B = P \cdot y_B \longrightarrow$$

$$(P = P_A + P_B = P y_A + P y_B) \longrightarrow$$

$$P = \sum_{i=1}^{n} y_i P$$

---

* برای مخلوطی از دو گاز A و B :

انتالپی مخلوط $\quad \bar{H} = n \bar{h} = n_A \bar{h}_A + n_B \bar{h}_B$

انرژی داخلی مخلوط $\quad \bar{U} = n \bar{u} = n_A \bar{u}_A + n_B \bar{u}_B$

آنتروپی مخلوط $\quad \bar{S} = n \bar{s} = n_A \bar{s}_A + n_B \bar{s}_B$

* $\Delta S = R \ln \frac{T_1}{T_2} - C_p \ln \frac{P_1}{P_2}$

$(T_1 = T_2 = T)$

T_1 و P_1 - قبل از اختلاط

T_2 و P_2 - پس از اختلاط

$$n\bar{S} = \left[n_A C_p \ln y_A + n_B C_{pB} \ln y_B \right]$$

---

* $n\bar{h} = n_A \bar{h}_A + n_B \bar{h}_B \longrightarrow$

$n \bar{C}_p \not{T} = n_A \bar{C}_{pA} \not{T} + n_B \bar{C}_{pB} \not{T} \longrightarrow$

$$n\bar{C}_p = n_A \bar{C}_{PA} + n_B \bar{C}_{PB}$$

$$n\bar{C}_v = n_A \bar{C}_{vA} + n_B \bar{C}_{vB}$$

$\xrightarrow{\div n}$

① $\bar{C} = y_A \bar{C}_A + y_B \bar{C}_B$ گرمای ویژه مولی

رابطه نسبت مولی و نسبت جرمی :

$$y_A = \frac{n_A}{n}$$

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

} ⟶

در حالت کلی :

$$y_A = \frac{m_A}{m} \cdot \frac{M}{M_A}$$

$$y_A = mf_A \cdot \frac{M}{M_A} \longrightarrow$$

$$(۲) \quad mf_i = \frac{1}{M}(y_i M_i)$$

$$(۲') \quad y_i = mf_i \frac{M}{M_i}$$

جرم مولکولی مخلوط : برای مخلوطی از n جزء :

$$\begin{cases} mf_1 = \frac{1}{M}(y_1 M_1) \\ \vdots \qquad\qquad \vdots \\ mf_n = \frac{1}{M}(y_n M_n) \end{cases} + \longrightarrow$$

$$mf_1 + \dots + mf_n = \frac{1}{M}\left[(y_1 M_1) + \dots + (y_n M_n)\right]$$

$$\underbrace{\sum_{i=1}^{n} mf_i}_{1} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{n} y_i M_i \longrightarrow$$

$$M = \sum_{i=1}^{n} y_i M_i$$

* با قرار دادن (۲) در ① :

** $$\bar{C} = \sum_{i=1}^{n} mf_i \frac{M}{M_i}\bar{C}_i$$

$$\frac{\bar{C}}{M} = \sum_{i=1}^{n} mf_i \frac{\bar{C}_i}{M_i} \longrightarrow$$

$$C = \sum_{i=1}^{n} mf_i \cdot C_i$$

یک مدل ساده برای مخلوطی از چند گاز :

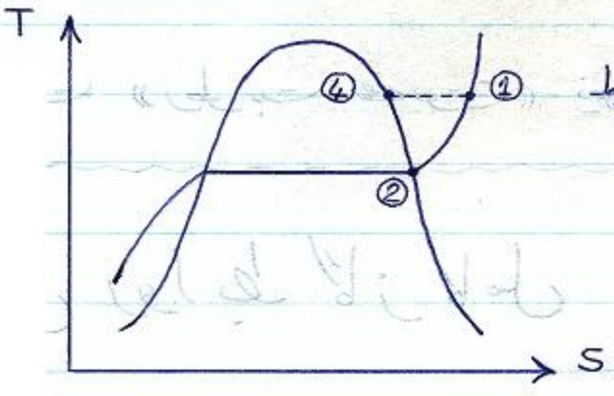
* مخلوطی از چند گاز و بخار در مجاور سطح مایع یا جامدی می‌باشد.

مفروضات :

۱- در مایع یا جامد هیچ گاز محلولی وجود ندارد .
۲- گاز و بخار (مخلوطشان) گاز کامل فرض می شود .
۳- وقتی که مخلوط و مایع در دمای (و فشار) خاصی هستند تعادل بین بخار و مایع تحت تأثیر بقیه گازها قرار ندارد .

چند اصطلاح :

نقطه شبنم (Dew Point) : اگر در یک فشار خاص مخلوط گاز و بخار سرد شود دمائی که در آن بخار تقطیر می‌شود را نقطه شبنم گویند .



بخار موجود در مخلوط

T_2 = Dew Point

رطوبت نسبی ϕ (relative humidity) :

* نسبت مولی بخار موجود در مخلوط به بخار موجود در مخلوط اشباع در دما و فشار کلی یکسان را (رطوبت نسبی) گویند.

* براساس تعریف گاز کامل رطوبت نسبی عبارتست از نسبت فشار جزئی بخار موجود در مخلوط به فشار بخار اشباع در همان دما.

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} = \frac{P_1}{P_4}$$

نسبت رطوبت ω (humidity Ratio) :

* بنابه تعریف نسبت جرم بخار موجود در مخلوط به جرم هوای خشک را «نسبت رطوبت» گویند.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

* به نسبت رطوبت «رطوبت مخصوص» نیز گویند.

براساس روابط گاز کامل :

بخار: $P_v V = m_v \frac{\bar{R}}{M_v} T \rightarrow$

$$m_v = \frac{M_v P_v V}{\bar{R} T} \quad (1)$$

هوای خشک: $P_a V = m_a \frac{\bar{R}}{M_a} T \rightarrow$

$$m_a = \frac{M_a P_a V}{\bar{R} T} \quad (2)$$

* با قرار دادن (1) و (2) در رابطه $\omega = \frac{m_v}{m_a}$:

$$\omega = \frac{M_v}{M_a} \frac{P_v}{P_a} \rightarrow$$

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P_a} \rightarrow$$

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

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \xrightarrow{(3)}$$

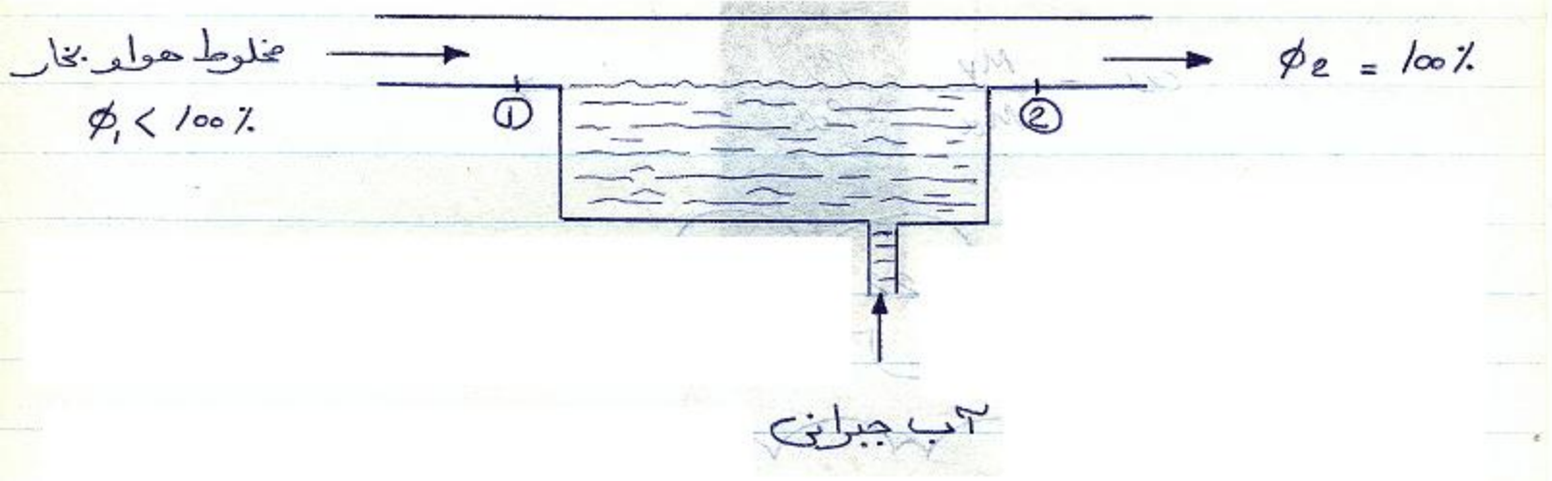
$$\omega = 0.622 \frac{\phi P_g}{P_a}$$

$$\phi = \frac{\omega P_a}{0.622 P_g}$$

کاربرد قانون اول در مخلوطها :

* قانون اول با در نظر گرفتن تک تک اجزای مخلوط و یا در نظر گرفتن هوا بعنوان گاز کامل بکار رفته و h یا u آب از جداول بدست می آید.

تحول اشباع آدیاباتیک :



* با فرض حجم کنترل آدیاباتیک در صورتیکه در اثر تبخیر آب حوضچه هوای خروجی اشباع ($\phi = 100\%$) شود این تحول را «تحول اشباع آدیاباتیک» و دمای خروجی را «دمای اشباع آدیاباتیک» گویند.

$$\left.\begin{matrix} Q = 0 \\ W = 0 \end{matrix}\right\} \longrightarrow \sum m_i h_i = \sum m_e h_e$$

قانون اول طی تحول (SSSF) :

$$\underbrace{(m_{a_1} h_{a_1} + m_{v_1} h_{v_1})}_{\text{هوای ورودی}} + \underbrace{m_{L_2} h_{L_2}}_{\text{آب}} = \underbrace{(m_{a_2} h_{a_2} + m_{v_2} h_{v_2})}_{\text{هوای خروجی}}$$

$$\begin{cases} m_{a_1} = m_{a_2} = m_a \\ m_{v_2} = m_{L_2} + m_{v_1} \longrightarrow m_{L_2} = m_{v_2} - m_{v_1} \end{cases}$$

$$(m_a h_a + m_{v_1} h_{v_1}) + (m_{v_2} - m_{v_1}) h_{L_2} = (m_a h_{a_2} + m_{v_2} h_{v_2})$$

$$\xrightarrow{\div m_a} \quad h_{a_1} + \omega_1 h_{v_1} + (\omega_2 - \omega_1) h_{L_2} = h_{a_2} + \omega_2 h_{v_2}$$

$$\longrightarrow \quad \omega_1 (h_{v_1} - h_{L_2}) = (h_{a_2} - h_{a_1}) + \omega_2 (h_{v_2} - h_{L_2})$$

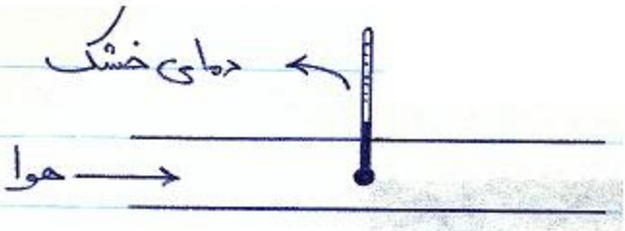
$$\longrightarrow \quad \boxed{\omega_1 (h_{v_1} - h_{L_2}) = C_p (T_{a_2} - T_{a_1}) + \omega_2 h_{fg_2}}$$

18 - 17 - 13 - 6 - 11

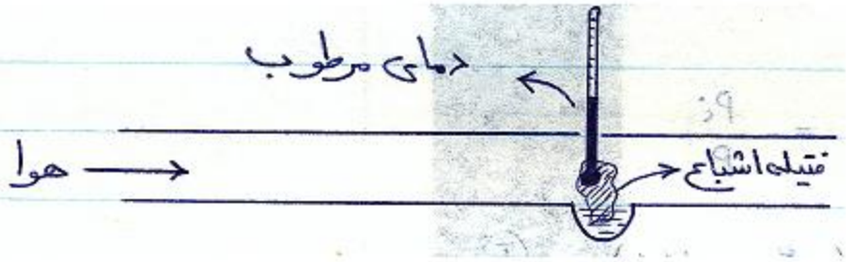
پتروپالامحور پیشتاز در ارائه خدمات مهندسی و متعهد به کیفیت

PPM , Dedicated For The Best Quality

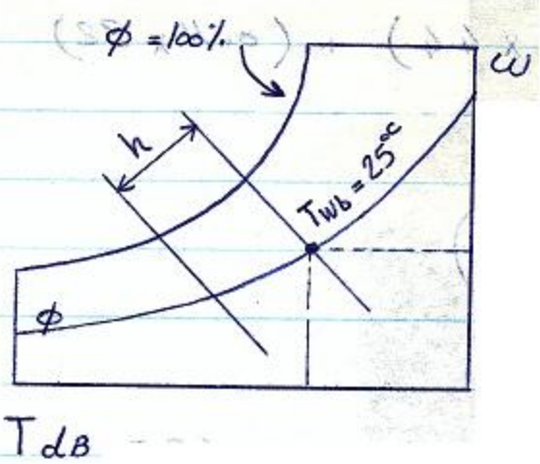
دمای خشک (dray Bulb)



دمای مرطوب (Wet Bulb)



سنجی رطوبت هوا (Psychrometric)



مسائل 7 - 14 - 19 بجای قبلی ها حل شود.

مسئلة (11.1) -

ترکیب	درصد حجمی
N_2	70
CO_2	15
O_2	11
CO	4

* $y_{fi} = y_i = \frac{P_i}{P}$

* $m_{fi} = \frac{1}{M}(y_i \cdot M_i)$ (I)

* $M = \sum_{i=1}^{n} y_i M_i = (y \cdot M)_{N_2} + (y \cdot M)_{CO_2} + \cdots$

$M = (0.7 \times 28) + (0.15 \times 44) + (0.11 \times 32) + (0.04 \times 28)$

$M = 30.8$

(I) $\longrightarrow$ $m_{fN_2} = \frac{0.7 \times 28}{30.8} = 0.635$

$m_{fCO} = \frac{0.04 \times 28}{30.8} = 0.036$

(ب

$$m = \frac{PV}{\frac{R}{M} \cdot T} = \frac{100\ (0.2)}{\frac{8.314}{30.8}\ (293)}$$

$$m = 0.253 \ kg$$

(ج

$$_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2$$

$$_1Q_2 = m C_{v0} (T_2 - T_1)$$

$$M \cdot C_v = \bar{C}_v = \sum_{i=1}^{n} y_i \bar{C}_{vi} \longrightarrow$$

$$C_v = \sum_{i=1}^{n} mf_i \cdot C_{vi} \xrightarrow{A-8}$$

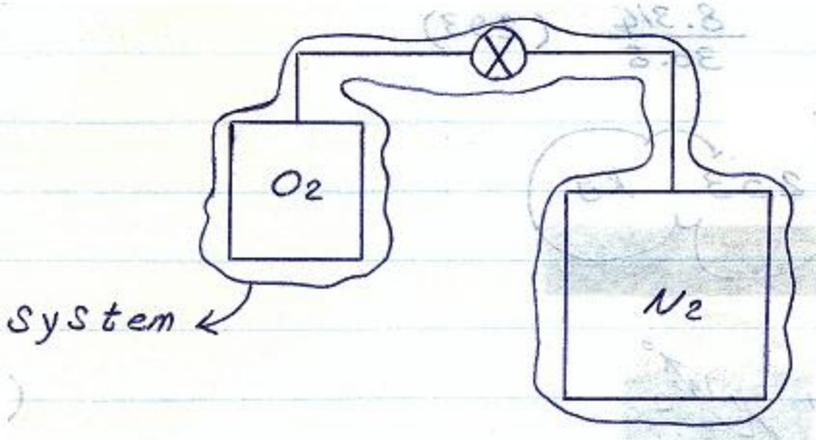
$$C_v = (mf \cdot C_v)_{N_2} + (mf \cdot C_v)_{CO_2} + \cdots + (mf \cdot C_v)_{CO}$$

$\longrightarrow$ (خلوط $C_v = 0.7149$) $\longrightarrow$

$$_1Q_2 = (0.253)(0.7149)(150 - 20)$$

$$_1Q_2 = 23.5 \ kj$$

مسئله 3-11



$$\overset{\uparrow}{1}Q\overset{\uparrow}{2}^{\circ} = U_2 - U_1 + \overset{\uparrow}{1}W\overset{\uparrow}{2}^{\circ} \rightarrow$$

$$U_2 - U_1 = 0 = m C_V (T_2 - T_1) \rightarrow$$

$$U_2 - U_1 = 0 = \underbrace{(n_{O_2} \cdot \bar{C}_{VO_2} T_2 + n_{N_2} \bar{C}_{VN_2} T_2)}_{U_2}$$

$$\underbrace{- (n_{O_2} \bar{C}_{VO_2} \cdot T_{A1} + n_{N_2} \cdot \bar{C}_{VN_2} \cdot T_{B1})}_{U_1} \rightarrow$$

(I) $$(n \cdot \bar{C}_V)_{O_2} (T_2 - T_{A1}) + (n \bar{C}_V)_{N_2} (T_2 - T_{B1}) = 0$$

$$\bar{C}_V = M \cdot C_V$$

از جدول A-8

$$n_{O_2} = \frac{P_{A1} \cdot V_A}{R \cdot T_{A1}} = \frac{400\,(5)}{(8.314)\,288} = 0.835 \text{ kmol}$$

$$n_{N2} = \frac{P_{B1} \cdot V_B}{\bar{R} \cdot T_{B1}} = 2.05 \text{ Kmol} \longrightarrow$$

$$n = n_{O2} + n_{N2} = 2.885 \text{ Kmol}$$

$$\text{(I)} \longrightarrow \left(0.835\,(32 \times 0.6618)\right)(T_2 - 288) + \left(2.05\,(28 \times 0.7448)\right)(T_2 - 308) = 0 \longrightarrow$$

$$T_2 = 302.15\ ^{\circ}K$$

* برای کل سیستم

$$P_2 = \frac{n \cdot \bar{R} \cdot T_2}{V_2}$$

$$P_2 = \frac{2.885\,(8.314)\,(302.15)}{(5 + 35)} \longrightarrow$$

$$P_2 = 181.2 \text{ kPa}$$

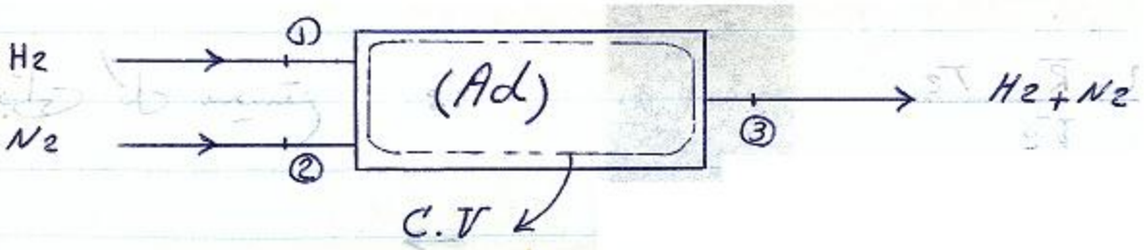
$$\Delta S_{\text{سیستم}} = n\,\Delta \bar{S}_{\text{سیستم}} = n_{O2}\,\Delta \bar{S}_{O2} + n_{N2}\,\Delta \bar{S}_{N2}$$

$$\Delta \bar{S} = \bar{C}_p \ln \frac{T_2}{T_1} - \bar{R} \ln \frac{P_2}{P_1} \longrightarrow$$

$$\Delta S_{\text{سيستم}} = n_{O_2}\left(\bar{C}_{P_{O_2}} \ln\frac{T_2}{T_1} - \bar{R}\ln\frac{P_2}{P_1}\right) + n_{N_2}\left(\bar{C}_{P_{N_2}} \ln\frac{T_2}{T_1} - \bar{R}\ln\frac{P_2}{P_1}\right)$$

$\rightarrow$ A.8 $\rightarrow$ $\Delta S_{\text{سيستم}} = 16.73 \ KJ/^oK$

مسئله 11.6 -



$$\dot{Q}_{CV} + \sum \dot{n}_i \bar{h}_i = \dot{W}_{CV} + \sum \dot{n}_e \bar{h}_e$$

$$n = n_{H_2} + n_{N_2} = 2 + 1 = 3$$

$$y_{H_2} = \frac{2}{3} \qquad y_{N_2} = \frac{1}{3}$$

$$n_1 \bar{h}_1 + n_2 \bar{h}_2 = n_3 \bar{h}_3$$

$$n_{H_2} \bar{C}_{P_{H_2}} T_1 + n_{N_2} \bar{C}_{P_{N_2}} T_2 = n \bar{C}_P T_3 \xrightarrow{\div n}$$

$$y_{H_2}\,\bar{C}_{P\,H_2}\,T_1 + y_{N_2}\,\bar{C}_{P\,N_2}\,T_2 = \bar{C}_P\,T_3 \qquad (I)$$

$$\bar{C}_P = y_{H_2}\,\bar{C}_{P\,H_2} + y_{N_2}\,\bar{C}_{P\,N_2} =$$

$$\frac{2}{3}(2 \times 14.2091) + \frac{1}{3}(28 \times 1.04)$$

$$\bar{C}_P = 28.652 \ \text{KJ/kmol K°}$$

(I) $\longrightarrow$

$$T_3 = 354\ ^{\circ}K$$

$$\Delta S = n_{H_2}\left(\bar{C}_{P\,H_2}\ln\frac{T_3}{T_1} - \bar{R}\ln\frac{P_3}{P_1}\right) +$$

$$n_{N_2}\left(\bar{C}_{P\,N_2}\ln\frac{T_3}{T_2} - \bar{R}\ln\frac{P_3}{P_2}\right)$$

$(n = 1) \rightarrow$

$$\Delta\bar{S} = \Delta S = 9.75 \ \text{KJ/kmol K°}$$

مسئله 10 - 11 -

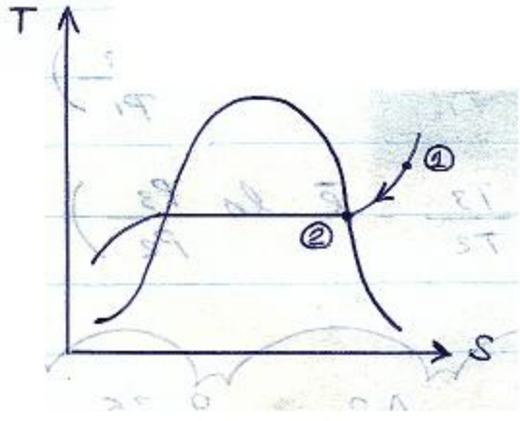
$$\begin{cases} P = 100\ KPa \\ P_V = 1.4\ KPa \end{cases}$$

$$\longrightarrow \quad P_a = P - P_V = 100 - 1.4$$

الف) $$\omega = \frac{m_V}{m_a} = 0.622 \frac{P_V}{P_a} = 0.622 \frac{P_V}{P - P_V}$$

$$\longrightarrow \quad \omega = 0.622 \frac{1.4}{100 - 1.4} = 0.0088 \frac{kg\ \text{بخار آب}}{kg\ \text{هوای خشک}}$$

ب) * با توجه به جدول بخار ما (Super Heat) است :



* دمای اشباع در فشار 1.4 KPa از جدول A1-2 همان دمای نقطه شبنم است :

$$T_{DP} = 11.82\ ^\circ C$$

ج) $$m_V = \frac{P_V . V}{R_V . T} = \frac{(1.4)(4 \times 6 \times 2.4)}{\frac{8.314}{18}(298)} = 0.584\ kg$$

مسئله 11.13 -

* $\omega = 0.0001$

$$\omega = 0.622 \frac{P_V}{P - P_V} \rightarrow$$

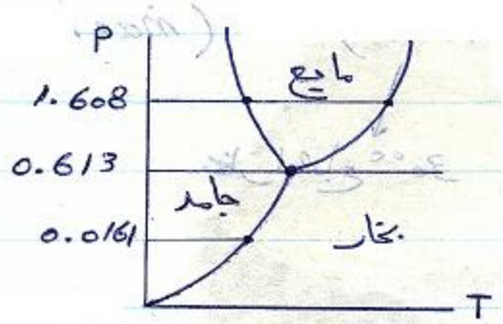
$$0.0001 = 0.622 \frac{P_V}{P - P_V} \rightarrow$$

اگر $P = 0.1\ MPa \rightarrow P_V = P_{sat} = 0.0161\ kPa$

$T = -38^\circ C$: در فشار فوق A 1.5 * از جدول

اگر $P = 10\ MPa \rightarrow P_V = P_{sat} = 1.608\ kPa$

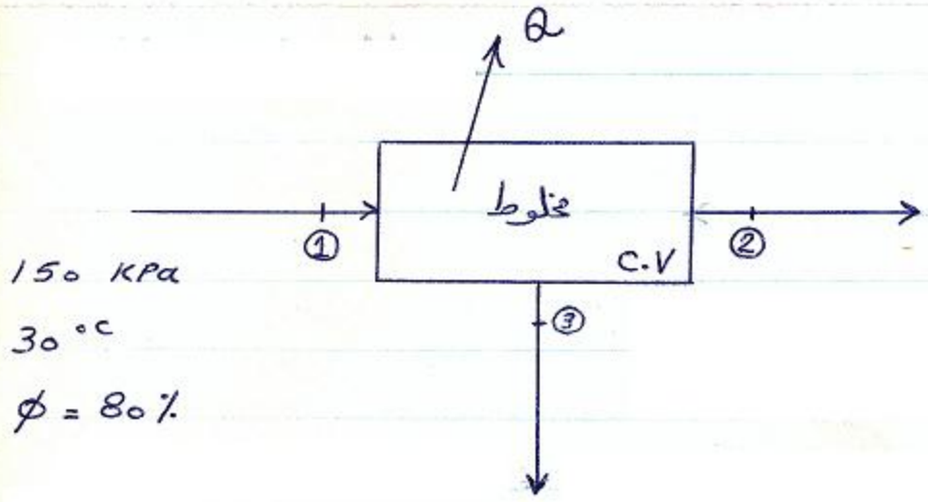
$T = 14^\circ C$: در فشار فوق A 1.2 * از جدول



* یعنی در فشار 0.0161 بخار مستقیماً به جامد تبدیل می شود اما در فشار 1.608 اول مایع شده سپس جامد می شود.

P_{sat} - فشار اشباع

مسئله 11 - 16



بخار تقطیر شده (مایع اشباع 10°)

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \dot{W} + \sum \dot{m}_e h_e$$

($\dot{W} = 0$)

$$\dot{Q} + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3$$

$$\dot{Q} + (\dot{m}_{a1} h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1}) = (\dot{m}_{a2} h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2})$$

$$+ \dot{m}_{L3} h_{L3} \qquad \text{(I)}$$

$\dot{m}_{v1}$: بخار اشباع $30^{\circ}C$ — $\dot{m}_{v2}$: بخار اشباع $10^{\circ}C$ — $\dot{m}_{L3}$: مایع اشباع $10^{\circ}C$

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$$
$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{v2} + \dot{m}_{L3}$$

«بقای جرم»

$$\xrightarrow{\text{(I)}} \quad \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_a} + h_{a1} + \omega_1 h_{v1} = h_{a2} + \omega_2 h_{v2} + (\omega_1 - \omega_2) h_{L3}$$

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_a} = C_{pa}(T_{a2} - T_{a1}) + \omega_2 (h_{v2} - h_{L3}) + \omega_1 (h_{L3} - h_{v1})$$

h_{v2}: بخار اشباع 10° — h_{L3}: مایع اشباع 10°

h_{fg} $10^{\circ C}$

$$\omega_1 = 0.622 \frac{P_{v1}}{P_1 - P_{v1}}$$

$$\phi_1 = \frac{P_{v1}}{P_{g1}} \rightarrow P_{v1} = 0.80(4.246) = 3.397$$

(A1.2) 30° فشار اشباع

$$\omega_1 = 0.0144$$

$$\omega_2 = 0.622 \frac{P_{v2}}{P_2 - P_{v2}}$$

$$\phi_2 = \frac{P_{v2}}{P_{g2}} \rightarrow P_{v2} = (P_{g2})_{10^\circ C} = 1.2276$$

(A 1.2) $10^{\circ C}$

$$\omega_2 = 0.0062$$

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_a} = -327.9$$

(kW به ازای واحد دبی هوای خشک)

فصل (۱۲) - واکنشهای شیمیائی

* سوختها (Fuels)
  - جامد
  - مایع
  - گاز
    - L.P.G
    - C.N.G
    - L.N.G

L.P.G = Liquified Petroleum Gas
C.N.G = Compressed Natural Gas
L.N.G = Liquid Natural Gas

(L.P.G) محصول کارخانه پتروشیمی است و (C.NG) محصول چاه نفت است. (L.N.G) همان (C.N.G) فشرده است.

	Name	General Formula	
زنجیری	Paraffin	C_nH_{2n+2}	اشباع شده
زنجیری	olefin	C_nH_{2n}	
زنجیری	Diolefin	C_nH_{2n-2}	
حلقوی	Naphtene	C_nH_{2n}	اشباع شده
حلقوی	Aromatics :		
حلقوی	Benzen	C_nH_{2n-6}	
حلقوی	Naphtalene	C_nH_{2n-12}	

Paraffin : آخر اسم آنها به (-ane) ختم می‌شود.

olefin : آخر اسمشان به (-ene) یا (-ylene) ختم می‌شود.

Diolefin : آخر اسمشان به (-diene) ختم می‌شود.

Naphtene : اسم آنها با (cyclo) شروع می‌شود.

تحول احتراق (Combustion)

واکنش هر یک از اجزای ماده (سوخت) با اکسیژن را «احتراق» گویند.

$$C + O_2 \xrightarrow{\text{گرما زا}} CO_2$$

واکنش کننده‌ها — Reactance

محصولات — products

$$12\,kg + 32\,kg \longrightarrow 44\,kg$$

* برای متان :

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$$

* برای یک هیدروکربن C_nH_m :

$$C_nH_m + \left(n + \frac{m}{4}\right) O_2 \longrightarrow n\,CO_2 + \frac{m}{2} H_2O$$

* در دماهای بالا (C_o و N_o) هم تولید می شود که خیلی سمی است. لذا موتورهای دیزلی که دمای پایین تری دارند اگر خوب تنظیم شوند آلودگی آنها از موتور بنزینی کمتر است.

ترکیب حجمی هوا { 21 % O_2 ; 78 % N_2 ; 1 % سایر گازها } 79 % N_2

* نسبت مولهای N_2 به O_2 : $\frac{79}{21} = 3.76$

$$C_n H_m + (n + \frac{m}{4}) O_2 + 3.76 (n + \frac{m}{4}) N_2 \longrightarrow$$

$$n CO_2 + \frac{m}{2} H_2O + 3.76 (n + \frac{m}{4}) N_2 \quad (I)$$

* مثلاً برای متان :

$$CH_4 + 2O_2 + 2(3.76) N_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O + 7.52 N_2$$

* هوای لازم بر حسب رابطه (I) را (هوای تئوریک) گویند.

*** برای احتراق متان با 20 % هوای اضافی :
(یا 120 % هوای نظری)

$$CH_4 + 1.2(2) O_2 + 1.2(7.52) N_2 \longrightarrow$$
$$CO_2 + 2H_2O + 9.02 N_2 + 0.4 O_2$$

λ - ضریب هوای اضافی

$$C_n H_m + \lambda \left(n + \frac{m}{4}\right) O_2 + \lambda\, 3.76 \left(n + \frac{m}{4}\right) N_2 \longrightarrow$$

$$n CO_2 + \frac{m}{2} H_2O + 3.76\lambda \left(n + \frac{m}{4}\right) N_2$$

$$+ (\lambda - 1)\left(n + \frac{m}{4}\right) O_2 \quad (II)$$

نسبت هوا به سوخت (Air - fuel Ratio)

جرمی $AF = \dfrac{\text{جرم هوای موجود در احتراق}}{\text{جرم سوخت موجود}}$

مولی $\overline{AF} = \dfrac{\text{تعداد مول هوای موجود در احتراق}}{\text{تعداد مول سوخت موجود}}$

* نسبت هوا به سوخت بر اساس رابطه مربوط به هوای تئوریک را نسبت AF صحیح شیمیائی (تئوریک) یا (استوکیومتریک) - گویند:

$$(\overline{AF})_c = \frac{4.76\left(n + \frac{m}{4}\right)}{1} \leftarrow (II)$$

$$\left(n = \frac{m}{M}\right) \longrightarrow$$

$$(AF)_c = \frac{4.76\ (n + \frac{m}{4})\ (29)}{(n \times 12 + m \times 1)}$$

انتالپی تشکیل (Formation)

$$Q_{C.V} = -393522\ kJ$$

قانون اوّل :

$$Q_{c.v} + H_R = W_{c.v} + H_P$$

$$Q_{c.v} + \overset{\sim}{H_R^{\circ}} = H_P$$

$$Q_{c.v} + \overset{\sim}{\sum_R n_i \bar{h}_f^{\circ}} = \sum_P n_e \bar{h}_e$$

مبنا : انتالپی واکنش کننده ها در $(25^{\circ}C$ و $0.1\ MPa)$ صفر فرض می شود.

$$\rightarrow \quad H_P = Q_{c.v} = -393522 \ kJ$$

* مقدار حرارتی که از واکنش ترکیب یک سوخت باهوا پس از خنک شدن محصولات تا شرایط مبنا آزاد می شود را انتالپی تشکیل گویند (h_f°) :

$$(h_f^\circ)_{CO_2} = -393522 \ kJ$$

قانون اول :

$$\begin{cases} \text{حجم کنترل} & Q_{c.v} + H_R = W_{c.v} + H_P \\ \text{سیستم} & Q_{RP} - W_{RP} = U_P - U_R \end{cases}$$

$$Q_{c.v} + \sum_R \overline{n_i h_i} = W_{c.v} + \sum_P \overline{n_e h_e}$$

$$Q_{c.v} + \sum_R \overline{n_i [\bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}_{298,0.1})]_i} = W_{c.v} + \sum_P \overline{n_e [\bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - h_{298,0.1})]_e}$$

طرز تعیین Δh :

۱- از رابطه گاز کامل $(c_p dT)$
(یا) از جدول A.11

۲- از جداول مربوط به سیالات حقیقی
۳- از نمودارهای عمومی

دمای شعله آدیاباتیک (add. Flame Temp.)

* دمای یک تحول احتراق آدیاباتیک بدون انجام کار و تغییر انرژی‌های جنبشی و پتانسیل را دمای شعله آدیاباتیک گویند.

---

* انتالپی احتراق :

$$h_{RP} = H_P - H_R$$

↓

جدول 12-4

$$h_{RP} = \sum_P n_e \left(\bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}_{298}) \right)_e - \sum_R n_i \left(\bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}_{298}) \right)_i$$

انرژی داخلی احتراق :

$$U_{RP} = U_P - U_R$$

↳ جدول 12-4

$$U_{RP} = \frac{\bar{Z}}{P} n_e \left[(\bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}_{298})) - P\bar{v} \right]_e - \frac{\bar{Z}}{R} n_i \left[(\bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}_{298})) - P\bar{v} \right]_i$$

---

* (ارزش حرارتی) حرارت انتقال یافته در اثر واکنش طی یک تحول ایزوترم است:

ارزش حرارتی = $-h_{RP}$

" " = $-u_{RP}$

فرشاد سرایی - مهندس پایه یک تاسیسات مکانیکی
طراحی - نظارت - اجرا
نظام مهندسی: ۱۰-۴-۰-۱۷۲۷۶
پروانه مهندسی: ۱۰-۴۰۰-۰۲۸۱۵
شماره شهرسازی: ۱۰۴-۰۱۲۲۲

جزوه آموزشی درس ترمودینامیک (۲) آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران – دانشکده فنی (۱۳۷۳)

ارزش حرارتی $= h_{RP} = H_P - H_R$

" " $= u_{RP} = U_P - U_R = (H-PV)_P - (H-PV)_R$

گرمای نهان تبخیر + ارزش حرارتی سوخت = ارزش حرارتی بالا

قانون سوّم ترمودینامیک : آنتروپی تمام مواد خالص در دمای صفر مطلق برابر صفر است.

$$\eta_{comb.} = \frac{\text{FA ایده‌آل}}{\text{FA واقعی}}$$ (راندمان احتراق)

$$\eta_{boiler} = \frac{\text{حرارت داده شده به واحد جرم بخار}}{\text{ارزش حرارتی بالای سوخت}}$$ (راندمان دیگ بخار)

$$\eta_{motor} = \frac{W}{-h_{RP}}$$ (موتور احتراق داخلی)

مسائل - (7 - 13 - 28 - 35) فصل 12

مسئله ۱-۱۲-

معادله احتراق استیکیومتریک :

$$C_4H_{10} + 6.5\,O_2 + 24.44\,N_2 \rightarrow 4\,CO_2 + 5\,H_2O + 24.44\,N_2$$

(تئوریک) $\overline{AF}_c = \frac{6.5 + 24.44}{1} = 30.94$

$$\begin{cases} a\,C_4H_{10} + b\,O_2 + c\,N_2 \rightarrow 7.8\,CO_2 + 1.1\,CO + 8.2\,O_2 + 82.9\,N_2 + d\,H_2O \\ c = 3.76\,b \end{cases}$$

موازنه کربن : $4a = 7.8 + 1.1 \rightarrow a = 2.225$

موازنه H_2 : $5a = 5(2.225) = d \rightarrow$

$d = 11.125$

موازنه O_2 : $b = 7.8 + \frac{1.1}{2} + 8.2 + \frac{11.125}{2} \rightarrow$

$b = 22.113$

$c = 3.76\,b \rightarrow c = 82.9$

$$2.225\,C_4H_{10} + 22.113\,O_2 + 82.9\,N_2 \longrightarrow 7.8\,CO_2 + 1.1\,CO + 8.2\,O_2 + 82.9\,N_2 + 11.125\,H_2O$$

(معادله احتراق واقعی)

$$\overline{AF} = \frac{22.113 + 82.9}{2.225} = 47.2$$

$$\%\ \text{هوای تئوریک} = \frac{47.2}{30.94} \times 100 = 152.5\ \%$$

مسئله 4-12- گاز زغال سنگ بیتومن :

$$\{3\,CH_4 + 14\,H_2 + 50.7\,N_2 + 0.6\,O_2 + 27\,CO + 4.5\,CO_2\}$$

$$+ 1.3(25.9)\,O_2 + \underbrace{3.76(1.3)(25.9)}_{126.6}\,N_2 \longrightarrow 34.5\,CO_2 + 20\,H_2O + 7.77\,O_2 + 177.5\,N_2$$

* حاصل احتراق هر ماده را تک تک بررسی می کنیم و معمولاً CO_2 را کنار می گذاریم :

تعداد مول O_2 لازم برای واکنش :

1- برای CH_4 ← $(2 \times 3) = 6$ مول

2- برای تبدیل H_2 به H_2O ← $\frac{14}{2} = 7$ مول

3- برای تبدیل CO به CO_2 ← $\frac{27}{2} = 13.5$ مول

جمع 26.5 -

موجود در سوخت 0.6

25.9

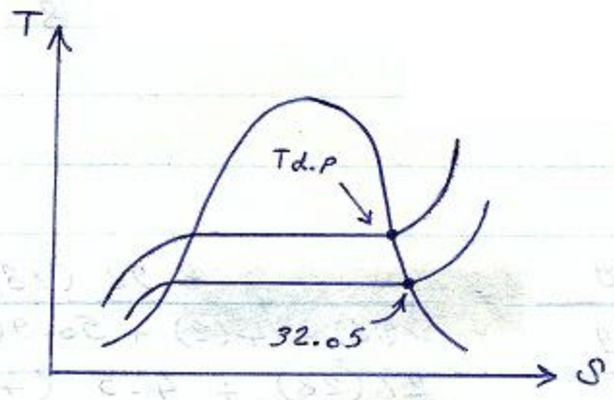
الف - $y_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_{\text{محصولات}}} = \frac{20}{34.5 + 20 + 7.77 + 177.5}$ ← در محصولات

$y_{H_2O} = 0.083$

$P_{H_2O} = y_{H_2O} \times P_{\text{کل}} = 0.083\ (100) = 8.3\ KPa$

A 1.2 جدول ⟶ $T_{d.p} = 42.05^{\circ}C$

ب - $T = 32.05$



* فشار جزئی آب در دمای $32.05^{\circ}C$:

$$P'_{H2O} = 4.812$$

$$P'_{H2O} = y'_{H2O}\, P \longrightarrow y'_{H2O} = \frac{4.812}{100}$$

$$\therefore y'_{H2O} = 0.048$$

$$y'_{H2O} = \frac{n'_{H2O}}{n'_{\text{محصولات}}} \quad (\text{در محصولات}) :$$

$$= \frac{n'_{H2O}}{34.5 + n'_{H2O} + 7.77 + 177.5} = 0.048 \longrightarrow$$

$$n'_{H2O} = 11.08 \text{ مول}$$

(تعداد مول H_2O تقطیر شده) = 20 - 11.06 = 8.92 مول

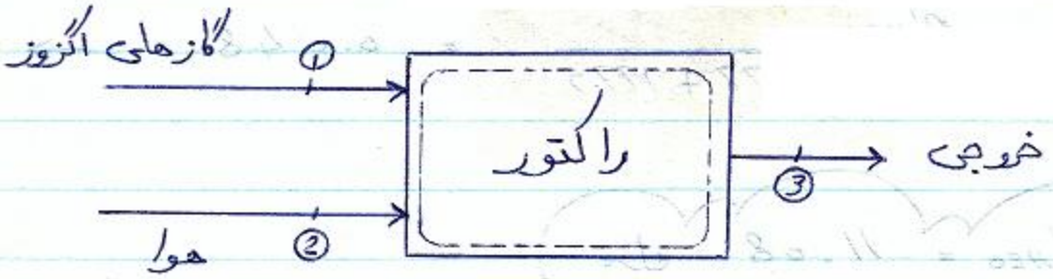
$$\frac{\text{Kg } H_2O \text{ تقطیر شده}}{\text{Kg سوخت}} = \frac{8.92\,(18)}{3(16)+14(2)+50.9(28)+0.6(32)+27(28)+4.5\,(44)}$$

$$= 0.065$$

مسئله 12-5

10 %	CO_2
13 %	H_2O
2 %	CO
3 %	O_2
72 %	N_2

* کارهوا این است که CO را به CO_2 تبدیل کند و به بقیه کاری ندارد.



$$0.02\,CO + x\,O_2 + 3.76x\,N_2 \longrightarrow$$
$$0.02\,CO_2 + \underbrace{(x-0.01)}_{x'}\,O_2 + 3.76x\,N_2$$

③ تعداد مولها در نقطه 8

$$n_{CO_2} = 0.02 + 0.10 = 0.12$$
$$n_{H_2O} = 0.13$$
$$n_{CO} = 0$$
$$n_{O_2} = 0.3 + (x-0.01) = x + 0.02$$
$$n_{N_2} = 0.72 + 3.76x$$

محصولات $n_3 = 0.99 + 4.76x$

$$(y_{O_2})_3 = \frac{(n_{O_2})_3}{n_3} = \frac{x + 0.02}{0.99 + 4.76x} = 0.10$$

② تعداد مول O_2 در نقطه : $x = 0.151$

$$\frac{\text{② تعداد مول هوا در نقطه}}{\text{① تعداد مول گاز اگزوز در نقطه}} = \frac{4.76x}{1} = 0.718 \ \frac{\text{هوا kmol}}{\text{گاز اگزوز kmol}}$$

مسئله 12-8 -

$$C_8H_{18} + \overbrace{1.25(12.5)}^{15.625} O_2 + \overbrace{3.76(1.25)(12.5)}^{58.75} N_2 \longrightarrow$$

$$6.8\,CO_2 + 1.2\,CO + 9\,H_2O + 3.725\,O_2 + 58.75\,N_2$$

$$\bar{Q} + H_R = \bar{W} + H_P$$

$$\bar{Q} - \bar{W} = H_P - H_R \qquad (\bar{Q} = -\bar{W}) \longrightarrow$$

$$-2\bar{W} = H_P - H_R \longrightarrow$$

$$\bar{W} = \frac{H_P - H_R}{-2}$$

$$H_R = \sum_R n_i (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_i$$

جدول 12-3 برای سوختها
جدول A-11 برای گاز کامل

$$H_R = [n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})]_{C_8H_{18}} + [n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})]_{O_2} +$$

$$[n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})]_{N_2}$$

* چون همه در دمای 25° (مبنا) هستند ($\Delta h = 0$).

* $\bar{h}_f^\circ$ (O_2) و (N_2) هوا صفر است.

$$H_R = (1)(-249.952) \quad KJ/Kmol$$

$$H_P = \sum_P n_e (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_e$$

$$H_P = \left[n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})\right]_{CO_2} + \left[n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})\right]_{CO} +$$

$$\left[n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})\right]_{H_2O} + \left[n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})\right]_{O_2} +$$

$$\left[n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})\right]_{N_2}$$

$$H_P = -3432781 \quad KJ/Kmol$$

واحد جرم $W = \dfrac{\bar{W}}{M} = \dfrac{-3432781 - (-249952)}{-2(114)}$

$$W = 13960 \quad KJ/Kg \text{ سوخت}$$

توان $P = W \times \dot{m}_f = 13960\ (0.005)$

$$P = 70 \quad KW$$

فشار جزئی H_2O $\quad P_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n} P$

$$= \frac{9}{60.8 + 1.2 + 9 + 3.725 + 58.75} (100) \longrightarrow$$

$P_{H_2O} = 11.3 \text{ KPa} \xrightarrow{A1.2}$ $T_{d.P} = 47.9\ ^\circ C$

محصولات	درصد حجمی
Co_2	$\frac{6.8}{79.5} \times 100 = 8.6\ \%$
Co	$\frac{1.2}{79.5} \times 100 = 1.5\ \%$
O_2	$\frac{3.725}{79.5} \times 100 = 4.7\ \%$
N_2	$73.9\ \%$
H_2O	$11.3\ \%$

فرشاد سرایی - مهندس پایه یک تاسیسات مکانیکی
طراحی - نظارت - اجرا
نظام مهندسی: ۱۰-۴-۰-۱۷۲۷۶
پروانه مهندسی: ۱۰-۴۰۰-۰۲۸۱۵
شماره شهرسازی: ۱۰۴-۰۱۲۲۲

جزوه آموزشی درس ترمودینامیک (۲) آقای دکتر کورش امیراصلانی تبریز
دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران – دانشکده فنی (۱۳۷۳)

فصل ۱۴ : جریان از شیپوره‌ها و مجراهای تیغه‌ای

انتالپی سکون (کل) : اگر جریان بصورت آدیاباتیک و بدون انجام کار ناگهان به حالت سکون درآید انتالپی حاصل را «انتالپی سکون» گویند.

$$\cancel{q}^{\,0} + h_1 + \frac{V_1^2}{2} + \cancel{gz_1} = \cancel{w}^{\,0} + h_2 + \frac{V_2^2}{2}^{\,0} + \cancel{gz_2}$$

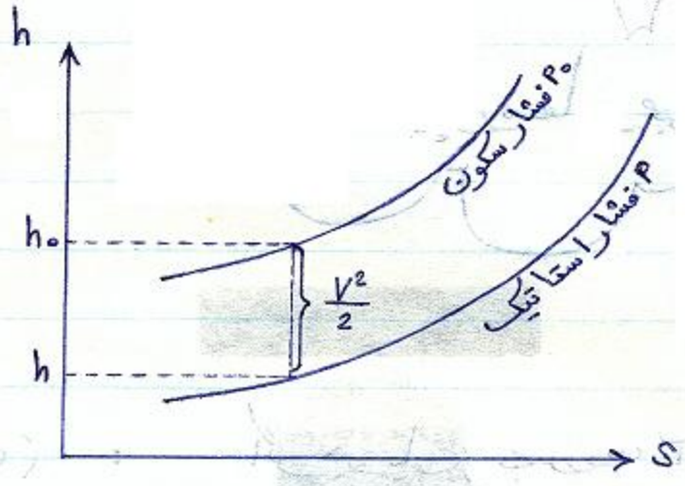
$$h_2 = h_1 + \frac{V_1^2}{2}$$

* یا بطور کلی در هر مقطع :

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2}$$

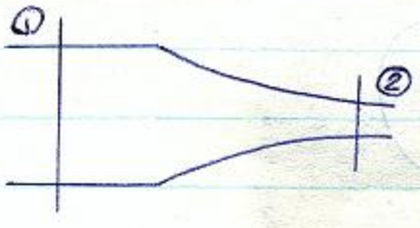
h_0 : «انتالپی سکون»

h : انتالپی استاتیک



برای گاز کامل : $\frac{T_0}{T} = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{K-1}{K}}$

جریان SSSF در طی گذر از یک شیپوره آدیاباتیک - برگشت پذیر



* شیپوره وسیله ای جهت افزایش انرژی جنبشی و دیفیوزر وسیله ای برای افزایش فشار است.

$$P_i V_i A_i = P_e V_e A_e$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e$$

* $q + h_i + \frac{V_i^2}{2} + g z_i = w + h_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e$

(در تحول برگشت پذیر) : $s_e = s_i$

* $T ds = dh - v dp = 0$

* $dh = v dp$

$$h_e - h_i = \int_i^e v dp$$

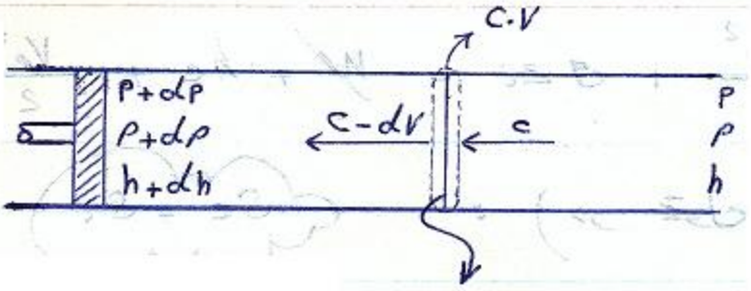
(قانون اول) : $$\int_i^e v dp + \frac{(V_e^2 - V_i^2)}{2} + g (z_e - z_i) = 0$$

* اگر سیال تراکم ناپذیر باشد :

$$v_i (P_e - P_i) + \frac{(V_e^2 - V_i^2)}{2} + g (z_e - z_i) = 0$$

قانون برنولی

سرعت صوت در گاز کامل :



پیشانی موج

* از دیدگاه بیننده سوار بر موج :

از قانون اوّل : $h + \frac{c^2}{2} = (h+dh) + \frac{(c-dV)^2}{2}$

$$(c-dV)^2 = c^2 + \cancel{dV^2} - 2c\,dV$$

* از دیفرانسیل داریم توان ۲ صرفنظر می کنیم :

$$dh - c\,dV = 0 \qquad (1)$$

از پیوستگی : $\rho . c . A = (\rho+d\rho)(c-dV)A$

$$\rho c = \rho c - \rho\,dV + c\,d\rho - \cancel{d\rho\,dV}$$

$$c\,d\rho - \rho\,dV = 0 \qquad (2)$$

قانون دوّم : $T\,dS = dh - v\,dP = 0$

$$dh - \frac{dP}{\rho} = 0 \qquad (3)$$

(۱) و (۲) و (۳) $\longrightarrow$ $\frac{dP}{d\rho} = c^2$

(یا) $\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = c^2$ (۴)

از فصل (۱۰) می دانیم : $\frac{dP}{\rho} - K\frac{d\rho}{\rho} = 0$

$\longrightarrow$ $\frac{dP}{d\rho} = \frac{KP}{\rho}$

(یا) $\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = \frac{KP}{\rho}$ (۵)

(۴) = (۵) $\longrightarrow$ $c^2 = \frac{KP}{\rho}$

در گاز کامل : $\frac{P}{\rho} = RT$

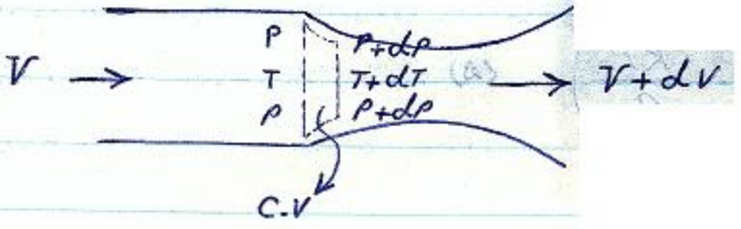
$\longrightarrow$

$$c = \sqrt{KRT}$$

تعریف عدد ماخ (Mach No.) :

$$M = \frac{V}{C} \begin{cases} M < 1 & \text{Sub Sonic} \\ M = 1 & \text{Sonic} \\ M > 1 & \text{Super Sonic} \end{cases}$$

جریان یکنواخت ـ بازگشت پذیر ـ آدیاباتیک و یک بعدی گاز کامل در شیپوره :



قانون اول :

$$h + \frac{V^2}{2} = (h + dh) + \frac{(V+dV)^2}{2}$$

$$dh + V\,dV = 0 \qquad (1)$$

قانون دوم :

$$T\,ds^{\uparrow 0} = dh - \frac{dp}{\rho}$$

$$dh - \frac{dP}{\rho} = 0 \qquad (2)$$

معادله پیوستگی : $\dot{m} = \rho . V . A = cte$

* با دیفرانسیل گیری از عبارت فوق :

$$\rho V dA + \rho A dV + V A d\rho = 0 \qquad \xrightarrow{\div \rho V A}$$

$$\frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} + \frac{d\rho}{\rho} = 0 \qquad (3)$$

(1) و (3) $\rightarrow$ $dV = \frac{-d\rho}{\rho V}$ $\xrightarrow{(3)}$

$$\frac{dA}{A} = \frac{d\rho}{\rho V^2} - \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\frac{dA}{A} = -\frac{d\rho}{\rho}\left(\frac{d\rho}{d\rho}\right) + \frac{d\rho}{\rho V^2}$$

$$\frac{dA}{A} = d\rho\left[-\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{d\rho} + \frac{1}{\rho V^2}\right]$$

$$\frac{dA}{A} = \frac{d\rho}{\rho}\left[\frac{1}{\left(\frac{d\rho}{d\rho}\right)} + \frac{1}{V^2}\right]$$

(اما) : $\frac{dp}{d\rho} = c^2 = \frac{V^2}{M^2}$ ⟶

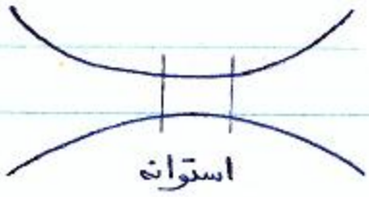
$$\frac{dA}{A} = \frac{dp}{\rho V^2}(1-M^2)$$

شیپوره $dp<0$

- اگر $M<1$: $dA<0$ ⟵ همگرا
- اگر $M>1$: $dA>0$ ⟵ واگرا

دیفیوزر $dp>0$

- اگر $M<1$: $dA>0$ ⟵ واگرا
- اگر $M>1$: $dA<0$ ⟵ همگرا



اگر $M=1$: $dA=0$

خدمات فنی قابل ارائه از طرف شرکت مهندسی پتروپالامحور :

- طراحی سیستم های لوله کشی (Piping)
- طراحی سیستم های مکانیکی ثابت (Fixed Equipment)
- طراحی سیستم های مکانیکی دوار (Rotary Equipment)
- طراحی سیستم های تاسیسات مکانیکی و تهویه مطبوع (Plumbing & HVAC)
- طراحی تاسیسات مکانیکی زیربنائی
- طراحی سیویل و سازه در پروژه های عمرانی و صنعتی

شرکت مهندسی پتروپالامحور

کیفیت تعهد ماست