

## مقدمه

این خلاصه درس اختصاصاً برای دانشجویانی تدوین شده است که حداقل یک بار مباحث مورد پوشش آزمون کارشناسی ارشد را مطالعه کرده و با مفاهیم و تعاریف ترمودینامیک آشنایی دارند. هدف در اینجا ارائه مباحث و فرمولها به طور فشرده به صورتی است که کمکی برای حافظه و تشخیص سریع مورد کاربرد باشد. احتمال مورد توجه قرار گرفتن هر مبحث توسط طراحان سؤال (براساس تجارب قبلی) به طور نسبی با عددی در مقیاس صفر تا صد آورده شده است.

با آرزوی موفقیت

فرشاد کوثری

در جدول ذیل دروس به سرفصلهای مهم آن طبقه بندی شده و مشخص شده است که در هر سال از هر مبحث چند تست سوال شده است و دانشجوی محترم می تواند زمان باقیمانده تا کنکور را با توجه به اهمیت مباحث مدیریت نماید.

		رشته مکانیک					درس: ترمودینامیک	
نسبت از کل	مجموع ۵ سال	۱۳۸۹	۱۳۸۸	۱۳۸۷	۱۳۸۶	۱۳۸۵	سر فصل	ردیف
		تعداد تست	تعداد تست	تعداد تست	تعداد تست	تعداد تست		
2%	1	1	0	0	0	0	تعاریف و مفاهیم اولیه	1
5%	2	0	1	1	0	0	خواص ترمودینامیکی	2
10%	4	0	1	0	1	2	کار و انتقال حرارت	3
29%	12	2	1	4	3	2	قانون اول ترمودینامیک	4
10%	4	1	1	0	1	1	قانون دوم ترمودینامیک	5
10%	4	1	0	0	0	3	آنتروپی	6
2%	1	0	1	0	0	0	کار برگشت پذیر، برگشت ناپذیری و آگرژی	7
7%	3	0	0	1	2	0	چرخه های توان و تبرید	8
2%	1	0	1	0	0	0	ترمودینامیک مخلوط ها و سایکرومتری	9
10%	4	1	0	0	2	1	واکنشهای شیمیایی و احتراق	10
7%	3	1	0	1	1	0	روابط ترمودینامیکی	11
7%	3	0	1	0	1	1	جریان تراکم پذیر	12
<b>100%</b>	<b>42</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>جمع</b>	

## مبحث اول - خواص و روابط ترمودینامیکی

- معادله حالت: رابطه بین  $v, P$  و  $T$  که به صورت  $P = P(v, T)$  یا  $v = v(T, P)$  داده شده است.  $v, T, P$  مهمترین خواص قابل اندازه گیری در ترمودینامیک می باشند.

مثال ۱: معادله حالت گاز ایده‌ال

$$Pv = MRT$$

$$Pv = RT$$

$$Pv = n\bar{R}T$$

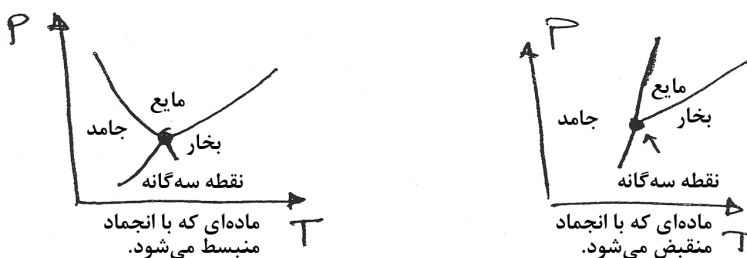
$$\bar{R} = 8.3143 \frac{\text{kJ}}{\text{kmolk}}$$

$$Pv = \bar{R}T$$

مثال ۲: معادله حالت وان در والس

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$$

- نمودار P-T: عمدتاً برای نشان دادن فازهای مختلف ماده به کار برده می شود:



مثال ۳: بخار آب در دمای پایین‌تر از دمای نقطه سه گانه قرار دارد. اگر در دمای ثابت متراکم شود، نحوه تغییر فاز کدام یک از موارد زیر است؟

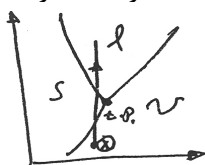
(د) بخار - مایع

(ج) بخار - جامد

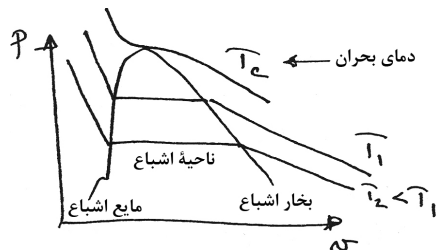
(ب) بخار - جامد - مایع

(الف) بخار - مایع - جامد

حل: با توجه به حالت اولیه که در شکل با ضربدر مشخص شده گزینه ب درست است



- نمودار p-v: عمدتاً برای نشان دادن مسیرهای ترمودینامیکی و تعیین مقدار کار تراکمی - انبساطی به کار گرفته می شود.



یادداشت:

.....

.....

.....

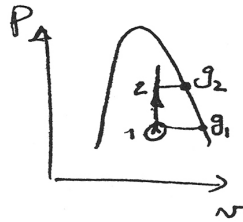
.....

مثال ۴: مخلوط دو فاز مایع و بخار آب در داخل ظرف صلبی موجود است. با دریافت حرارت حجم مخصوص بخار داخل ظرف:

الف) افزایش می‌یابد (ب) کاهش می‌یابد

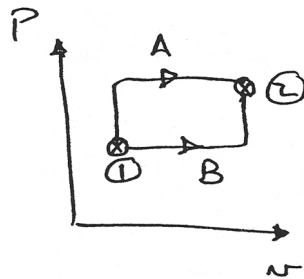
ج) تغییری نمی‌کند (د) ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد

حل: با توجه به مسیر ترمودینامیکی نشان داده شده در شکل واضح است که حجم مخصوص بخار آب کاهش می‌یابد. پس گزینه ب درست است.



- انرژی درونی: یک خاصیت ترمودینامیکی است که در هر حالت ترمودینامیکی مقدار مشخصی دارد. این خاصیت در برگیرنده تمامی انرژی‌های حرکتی و پتانسیلی ذرات پایه‌ای سازنده ماده می‌باشد.

مثال ۵: در شکل دو فرآیند متفاوت A و B بین دو حالت ترمودینامیکی ۱ و ۲ صورت گرفته است در کدام فرآیند تغییر انرژی درونی بیشتر است؟



الف) A (ب) B (ج) هر دو یکسان (ج) نمی‌توان گفت

حل: با توجه به اینکه انرژی درون یک خاصیت ترمودینامیکی است تغییر آن بین دو حالت به مسیر ترمودینامیکی وابسته نیست. پس گزینه (ج) درست است.

- انتالپی  $h$ : یک خاصیت ترمودینامیکی است که در هر حالت به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$h = u + Pv$$

$$H = U + PV$$

مثال ۶: انتالپی به عنوان یک خاصیت ترمودینامیکی تابعی از کدام یک از خواص زیر است؟

الف)  $P$  (ب)  $u$

ج)  $v$  (د) هر دو خاصیت ترمودینامیکی مستقل از هم

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

حل: از آنجا که  $h$  یک خاصیت ترمودینامیکی است تابعی از هر دو خاصیت دلخواه است، گزینه (د) درست است.

- گرماهای ویژه یا مخصوص:

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

گرمای ویژه در فشار ثابت

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

گرمای ویژه در حجم ثابت

دقت شود که  $C_p$  و  $C_v$  در هر حالت ترمودینامیکی برای هر ماده مقدار مشخصی دارند و خاصیت ترمودینامیکی باشند.

- ضریب ژول تامسون  $\mu_J$ : یک خاصیت ترمودینامیکی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_J = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_v$$

این خاصیت معرف تغییر دمای یک ماده در اثر تغییر فشار با قید انتالپی ثابت است. این خاصیت در فرآیندهای اختناق کاربرد دارد. فرآیندهای اختنابی همواره با کاهش فشار همراهند و در آنها طبق قانون اول انتالپی ثابت می‌ماند. اگر سیال در شرایط  $\mu_J > 0$  فرآیند اختناق را اجرا کند دمایش کاهش یافته و در صورتی که در شرایط  $\mu_J < 0$  فرآیند اختناق را اجرا کند دمایش افزایش می‌یابد.

- انتروپی  $S$ : یک خاصیت ترمودینامیکی است که براساس رابطه

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \text{int. sev.}$$

تغییر آن بین دو حالت ترمودینامیکی محاسبه می‌شود.

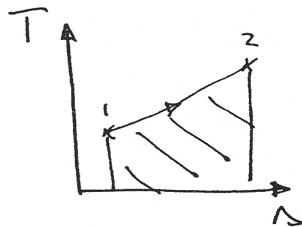
مثال ۷: تغییر انتروپی بین دو حالت دلخواه برای یک فرآیند برگشت پذیر که بین آن دو حالت رخ می‌دهد بیشتر است یا یک فرآیند برگشت ناپذیر؟

حل: با توجه به اینکه انتروپی یک خاصیت ترمودینامیکی است و تغییر آن بین دو حالت مشخص به فرآیند اجرا شده بین این دو حالت بستگی ندارد.

- نمودار  $T-s$ : از این نمودار برای تعیین راندمان حرارتی یک سیکل، تعیین تقریبی مقدار و جهت انتقال حرارت و اینکه کار خالص و انتقال حرارت یک سیکل مثبت یا منفی است استفاده می‌شود.

• مساحت هاشورخورده معرف انتقال حرارت در فرآیند اجرا شده بین ۱ تا ۲ است.

البته مشروط بر اینکه این فرآیند برگشت پذیر درون نباشد.



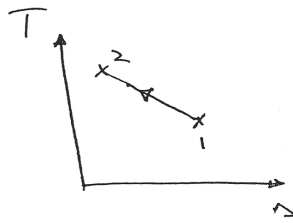
یادداشت:

.....

.....

.....

.....



مثال ۸: در فرآیند ۱ به ۲ آیا انتقال حرارت مثبت است یا منفی؟

حل: علیرغم افزایش دما انتقال حرارت در این فرآیند منفی است چرا که انتروپی کاهش یافته است.

• اگر یک سیکل برگشت پذیر درون در نمودار  $T-\Delta$  پاد ساعتگرد باشد این سیکل یک پمپ حرارتی است در غیر این صورت یک موتور حرارتی است.

**– روابط اساسی ترمودینامیکی:**

$$Td\Delta = dh + pdv$$

$$Td\Delta = dh - vdp$$

هر چند این روابط با فرض یک فرآیند برگشت پذیر درون توسط ماده در داخل یک مجموعه سیلندر و پیستون بدست آمده است و لیکن باید توجه داشت که هیچیک از این فرضها محدودیت روی این رابطه قرار نمی دهد.

**– روابط ترمودینامیکی گاز ایده‌ال**

• انرژی درون گاز ایده‌ال تابعی تنها از دماست.  $u = u(T)$

• انتالپی گاز ایده‌ال نیز تابعی تنها از دماست.  $h = h(T)$

• برای گاز ایده‌ال داریم  $c_{p0} = \frac{dh}{dT}$  و بنابراین با فرض  $h_2 - h_1 = Cp_0(T_2 - T_1)$  (با فرض  $Cp_0$  ثابت)

• همچنین داریم  $Cv_0 = \frac{du}{dT}$  و بنابراین با فرض  $Cv_0$  ثابت  $u_2 - u_1 = Cv_0(T_2 - T_1)$

مثال ۹: در مورد گازهای ایده‌ال کدام دو خاصیت ترمودینامیکی به هم وابسته‌اند؟

الف) دما و فشار (ب) انتالپی و انتروپی

ج) انتالپی و انرژی درون (د) انتروپی و دما

حل: گزینه درست ج است. چرا که با معلوم بودن انتالپی، دما و انرژی درون معلوم خواهند بود

• برای گاز ایده‌ال داریم:  $Cp_0 - Cv_0 = R$

• تغییر انتروپی گاز ایده‌ال:  $\Delta_2 - \Delta_1 = Cp_0 \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

$$\Delta_2 - \Delta_1 = Cv_0 \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

• رابطه بین  $V, P, T$  در فرآیندهای پلی تریپیک

• برای گاز ایده‌ال:  $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$

یا  $T.P^n = cte$

همچنین  $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{1-n}$

یا  $T.v^{n-1} = cte$

• فرآیندهای پلی تریپیک شاخص برای گاز ایده‌ال:

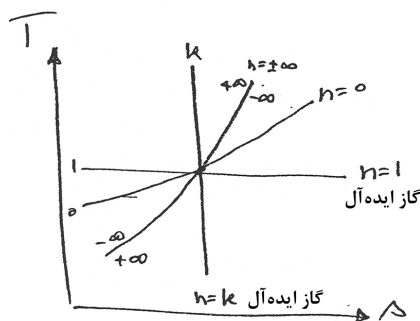
- دمای ثابت:  $n=1$

- فشار ثابت:  $n=0$  (محدود به گاز ایده‌ال نیست)

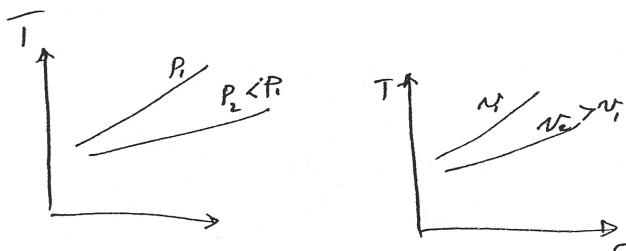
- حجم ثابت:  $n = \pm\infty$  (محدود به گاز ایده‌ال نیست)

- آدیا با تیک برگشت پذیر  $n = k = \frac{C_{p0}}{C_{v0}}$

- فرآیندهای پلی تریپیک در نمودار  $T-s$



• نحوه قرارگیری خطوط فشار ثابت و حجم ثابت در نمودار  $T-\Delta$



• خطوط فشار ثابت و حجم ثابت در نمودار  $T-s$  واگرا هستند.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

مثال ۱۰: گاز ایده‌ال در یک فرآیند پلی‌تروپیک  $n=0.5$  انبساط پیدا می‌کند. در این فرآیند انتقال حرارت:

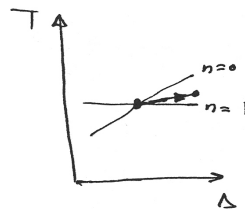
(الف) مثبت است

(ب) منفی است

(ج) صفر است

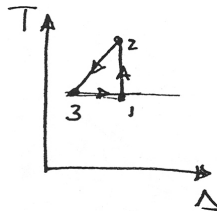
(د) نمی‌توان گفت

حل: با توجه به اینکه  $0 < n < 1$  و اینکه فرآیند با افزایش حجم مخصوص همراه است مطابق نمودار  $T-s$ ، مسیر ترمودینامیکی در راستای افزایش انتروپی بوده و در نتیجه انتقال حرارت مثبت است. گزینه الف درست است.



مثال ۱۱: گاز ایده‌ال یک سیکل ترمودینامیکی متشکل از سه فرآیند به ترتیب آدیباتیک تراکمی، پلی‌تروپیک  $n=-0.5$  و دما ثابت را اجرا می‌کند تعیین کنید که آیا این یک پمپ حرارتی است یا یک موتور حرارتی؟ ضمناً دمای ماکزیمم سیکل در انتهای کدام فرآیند رخ می‌دهد؟

حل: با توجه به فرآیندهای نشان داده شده در نمودار  $T-s$  و این که مسیر ترمودینامیکی سیکل پاد ساعتگرد می‌توان گفت که سیکل یک پمپ حرارتی بوده و دمای ماکزیمم آن در انتهای فرآیند اول رخ می‌دهد. ضمناً دفع حرارت در فرآیند دوم و جذب حرارت در فرآیند سوم رخ می‌دهد.



- تغییر انتروپی بین دو حالت ترمودینامیکی برای مایعات و جامدات:

$$s_2 - s_1 = C \ln \frac{T_2}{T_1}$$

- تغییر انتروپی برای منبع حرارتی

$$S_2 - S_1 = \frac{Q}{T}$$

- استخراج روابط ترمودینامیکی از روابط اساسی ترمودینامیک:

$$du = Tds + Pdv$$

$$T = \left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)_v, -p = \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_s$$

$$(MWI) \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_s = \left( \frac{\partial P}{\partial s} \right)_v$$

$$dh = Tds + vdp$$

$$T = \left( \frac{\partial h}{\partial s} \right)_p$$

$$(MWII) \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_\Delta = \left( \frac{\partial v}{\partial \Delta} \right)_P$$

یادداشت:

.....  
 .....  
 .....  
 .....



$$a = u - T\Delta$$

$$da = -pdv - \Delta dt$$

• تعریف تابع هلمهولتز a:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T \quad (MW3) \quad \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_s$$

• تعریف تابع گیبز g:

$$g = h - Ts$$

$$dg = dh - Tds - sdT$$

$$dg = vdp - sdT$$

$$(MW4) \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T$$

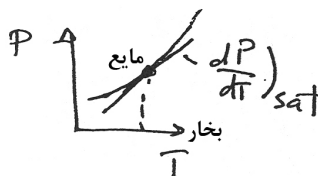
• چهار رابطه ترمودینامیکی ماکسول به طور اختصار با MW در فوق آورده شده

$$\text{رابطه کلازیوس کلاپیرون: } \left(\frac{dp}{dT}\right)_{sat} = \frac{1}{T} \frac{h'' - h'}{v'' - v'}$$

• استفاده این رابطه جهت استخراج انتالپی یا انترویی تغییر فاز در یک دمای ثابت است. برای مثال برای بدست آوردن انتالپی تغییر فاز از مایع به بخار با استفاده از رابطه فوق داریم:

$$h_{fg} = T v_{fg} \left(\frac{dp}{dT}\right)_{sat}$$

که در رابطه فوق  $\left(\frac{dp}{dT}\right)_{sat}$  از شیب منحنی فشار بخار در دمای مورد نظر بدست می آید:



(احتمال کم ۱۰) - رابطه عمومی تغییر انتالپی برای گازهای واقعی:

$$dh = C_p dt + \left[ v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \right] dp$$

(احتمال ۱۰ کم) - رابطه عمومی برای ضریب ژول تامسون  $\mu_J$

$$\mu_J = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{C_p}$$

مثال ۱۲: در شرایط بخصوصی گاز از معادله حالت  $P(v-b) = RT$  تبعیت می کند. رابطه ای برای تغییر انتالپی گاز در شرایط دما ثابت بدست آورید:

$$\text{حل: با توجه به معادله حالت داده شده } \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{P}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

بنابراین:  $v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = b$

حال با توجه به اینکه  $(dh)_T = \left[ v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp$  داریم:  $(dh)_T = b dp$  و در نتیجه  $(h_2 - h_1)_T = b (p_2 - p_1)$

(احتمال کم ۱۰) - رابطه عمومی تغییر انرژی درون برای گازهای واقعی:

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

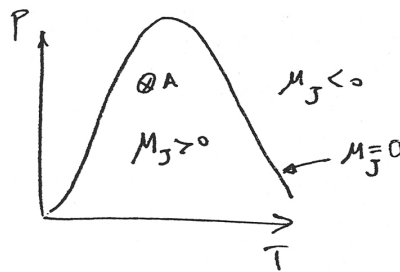
(احتمال کم - رابطه عمومی تغییر انتروپی برای گازهای واقعی:

$$ds = \frac{C_p}{T} dT - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

$$ds = \frac{C_v}{T} dT + \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv$$

(احتمال کم ۳۰) - منحنی وارونگی ژول تامسون:

نواحی حالت‌های ترمودینامیکی که برای آنها  $\mu_J$  مثبت و منفی است را به نمایش درآورده است.



مثال ۱۳: یک خط انتالپی ثابت گذرنده از نقطه A (بالا) به کدام صورت زیر است؟

- (الف)
- (ب)
- (ج)
- (د)

حل: با توجه به تعریف  $\mu_J = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_h$  شیب خط h ثابت گذرنده از نقطه A می‌بایست مثبت باشد پس گزینه د درست است.

یادداشت:

.....

.....

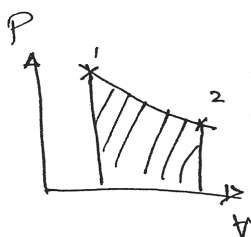
.....

.....

## مبحث دوم - روابط ترمودینامیکی کار (احتمال متوسط ۵۰)

- کار تراکمی - انبساطی: این نوع کار به خاطر جابجایی مرز سیستم یا حجم کنترل در مقابل فشار یا نیروی خارجی صورت می‌گیرد. در صورتی که فرآیند شبه تعادلی یا برگشت پذیر درونی باشد:

$$W_z = \int_1^2 p dV$$



• در هنگام محاسبه کار می‌بایست موجودیتی که کار انجام می‌دهد یا روی آن کار انجام می‌شود مشخص شده باشد.

مثال ۱: یک بادکنک با ورود هوا به داخل آن باد می‌شود. کار انجام شده هوای ورودی روی جداره بادکنک چقدر است؟ (جداره جنس لاستیک دارد به طوری که فشار داخل بادکنک با قطر بادکنک تناسب مستقیم دارد)

حل: با توجه به جنس لاستیک جداره بادکنک:  $P \propto D$ ,  $P \propto \frac{1}{V^3}$  بنابراین  $pV^{-\frac{1}{3}} = \text{cte}$ . حال با توجه به اینکه فرآیند اجرا شده یک فرآیند پلی‌تروپیک  $n = -\frac{1}{3}$  است می‌توان رابطه‌ای برای کار بدست آورد. حال اگر در این فرآیند سوال شده بود که کار انجام شده توسط بادکنک چقدر است؟ منظور کار انجام شده توسط بادکنک روی پیرامون در فشار  $p_0$  می‌بوده است. در این صورت:  $W = P_0 \Delta V$ . بنابراین در سوال که به طور مشخص کار انجام شده توسط حجم کنترل که هوای داخل بادکنک است خواسته شده بود کار از رابطه کار پلی‌تروپیک ولیکن اگر کار کل بادکنک (هوا+جداره) روی پیرامون خواسته شده بود از رابطه  $W = P_0 \Delta V$  بدست می‌آید.

کار انبساطی - تراکمی در فرآیندهای شاخص ترمودینامیکی

• فشار ثابت:  ${}_1W_2 = P(\forall_2 - \forall_1) = P_2\forall_2 - P_1\forall_1$

• حجم ثابت:  ${}_1W_2 = 0$

• دمای ثابت: (با فرض گاز ایده‌آل)  ${}_1W_2 = P_1\forall_1 \ln \frac{\forall_2}{\forall_1}$

• فرآیندهای پلی‌تروپیک  ${}_1W_2 = \frac{P_2\forall_2 - P_1\forall_1}{1-n}$

• فرآیند انبساط آزاد  ${}_1W_2 = 0$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

مثال ۲: یک کیلوگرم هیدروژن و یک کیلوگرم اکسیژن به طور جداگانه از شرایط اولیه یکسان فرآیند فشار ثابتی را تا دمای نهایی یکسان اجرا می‌کنند. کار انجام شده توسط کدام گاز بیشتر است؟ هر دو را گاز ایده‌آل در نظر بگیرید.

حل:

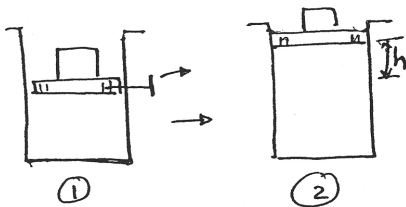
$$\begin{aligned} W_2 &= P_2 \Delta V_2 - P_1 \Delta V_1 \\ &= mR(T_2 - T_1) \\ &= m \frac{R}{M} (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

بنابراین کار بیشتر مربوط به گازی است که جرم مولکولی کمتری دارد. بنابراین هیدروژن کار بیشتری انجام می‌دهد.

### کار انبساطی - تراکمی در فرآیندهای غیر تعادلی:

در این نوع فرآیندها با توجه به مشخص نبودن فشار سیستم در طول فرآیند از رابطه  $W_2 = \int_1^2 PdV$  نمی‌توان برای محاسبه کار استفاده کرد. در اینجا با توجه به اثر معادل صعود وزنه که روی پیرامون گذاشته شده است می‌توان کار را محاسبه کرد.

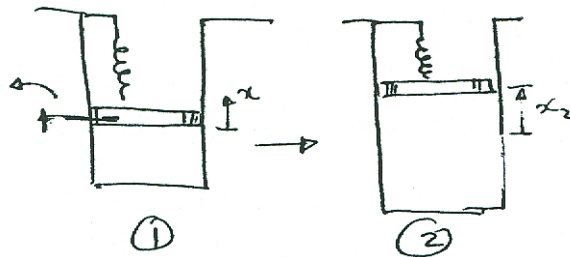
مثال ۳: انبساط غیر تعادلی با وزنه ثابت



در این فرآیند با بیرون کشیدن خار (pin) به طور غیر تعادلی جابجا می‌شود. می‌توان نشان داد که کار در این فرآیند برابر است با

$$W_2 = P_2 \Delta V = mgh$$

مثال ۴: انبساط غیر تعادلی در مقابل فنر:



در اینجا نیز با بیرون کشیدن خار پیستون که در ابتدا در تماس با فنر بوده (بدون اینکه فنر به آن نیرویی وارد کند) در مقابل نیروی فنر جابجا می‌شود. می‌توان نشان داد که کار در این فرآیند برابر است با:

$$\begin{aligned} W_2 &= \frac{1}{2} kx_2^2 \\ &= \frac{1}{2} P_2 \Delta V \end{aligned}$$

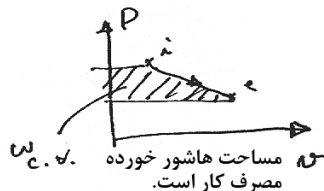
یادداشت:

.....  
 .....  
 .....  
 .....

### کار در شرایط SSSF (حجم کنترل)

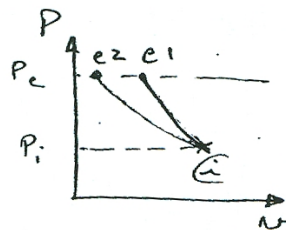
- در شرایط SSSF در صورتی که برگشت‌ناپذیری درون وجود نداشته باشد و اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل قابل چشم‌پوشی باشند داریم:

$$w_{c.v.} = - \int_i^e v dp$$



مثال ۵: دو کمپرسور هوا را به طور SSSF از شرایط ورودی یکسان تا یک فشار نهایی یکسان متراکم می‌کنند. در کمپرسور اول

فرآیند پلی‌تروپیک  $n = \frac{1}{2}$  و در فرآیند کمپرسور دوم  $n = \frac{1}{3}$  است. کار مصرفی کدام کمپرسور کمتر است؟



حل: در کمپرسور اول:  $P = cv^{-\frac{1}{2}}$  و در کمپرسور دوم:  $P = cv^{-\frac{1}{3}}$  (c یک عدد ثابت) بنابراین با توجه به مسیر نشان داده شده کار کمپرسور دوم کمتر است.

- کار توربین، کمپرسور و پمپ آدیاباتیکی

در صورتی که توربین، پمپ و کمپرسور آدیاباتیکی باشند. با توجه به قانون اول داریم

$$w_{c.v.} = h_i - h_e$$

باید توجه داشت که در این رابطه قیدی در مورد برگشت پذیر بودن وجود ندارد ولیکن انتقال حرارت می‌بایست صفر باشد، رابطه

$\omega = - \int v dp$  محدودیت انتقال حرارت صفر را ندارد ولیکن برگشت‌ناپذیری نباید در داخل حجم کنترل وجود داشته باشد. در بدست

آوردن رابطه  $\omega = \int -v dp$  از قانون ترمودینامیک استفاده شده است.

- کار پمپ برگشت‌پذیر: در پمپ فشار مالیات بالا می‌رود ( $v = cte$ ) با توجه به رابطه  $\omega_{c.v.} = - \int v dp$  داریم

$$C^2 = \left( \frac{\partial P}{\partial S} \right)_s$$

$$\Rightarrow \omega_p = v \Delta P$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

• کار در شرایط SSSF برای مسیر ترمودینامیکی پلی تریپیک  $Pv^n = C$ :

$$\text{از رابطه } {}_i\omega_e = -\int vde \text{ داریم: } {}_i\omega_e = n \frac{P_e v_e - P_i v_i}{1-n}$$

$${}_i\omega_e = p_i v_i \text{Ln} \frac{v_e}{v_i} \quad (n = 1)$$

• فشار ثابت بودن فرآیند در نبود کار

در دستگاههایی همچون بویلر، کندانسور و اواپراتور و همچنین مبدلهای حرارتی که در آنها  $\omega_{c.v.} = 0$  در صورتی که از اثرات

برگشتناپذیری چشمپوشی شود با توجه به رابطه  $\omega_{c.v.} = -\int vdp$  خواهیم داشت:  $P=cte$ .

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

## مبحث سوم - قانون اول ترمو (احتمال بالا ۸۰)

### کلی ترین شکل قانون اول:

کلی ترین حالت قانون اول برای یک حجم کنترل است که به صورت زیر بیان می گردد:

$$\dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} = \frac{dE}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \left( h + \frac{V^2}{2} + gz_e \right) - \sum_i \dot{m}_i \left( h + \frac{V^2}{2} + gz_i \right)$$

ضمناً قانون بقای جرم نیز به صورت زیر بیان می شود:

$$0 = \frac{dm}{dt} \Big|_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e - \sum_i \dot{m}_i$$

### حالت های خاص:

(احتمال بالا ۹۰) • سیستم بسته):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt} \quad \dot{m}_i = \dot{m}_e = 0$$

• شکل انتگرال گیری شده در زمان برای آن  $Q_2 - W_2 = E_2 - E_1$

(احتمال بالا ۹۰) • شرایط SSSF:

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_i \dot{m}_i \quad \text{در نتیجه:} \quad \frac{dm}{dt} \Big|_{c.v.} = 0, \quad \frac{dE}{dt} \Big|_{c.v.} = 0$$

$$\dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} = \sum_e \dot{m}_e \left( h + \frac{V^2}{2} + gz_e \right) - \sum_i \dot{m}_i \left( h + \frac{V^2}{2} + gz_i \right)$$

• شرایط USUF

$$\dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} = (E_2 - E_1)_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \left( h + \frac{V^2}{2} + gz_e \right) - \sum_i \dot{m}_i \left( h + \frac{V^2}{2} + gz_i \right)$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

• بقای جرم در شرایط USUF

$$0 = (m_2 - m_1)_{c.v.} + \sum_e m_e - \sum_i m_i$$

• باید توجه داشت که در اکثر مسایل که در شرایط USUF قابل تحلیل هستند اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل قابل اغماض می‌باشند بنابراین

$$Q_{c.v.} - W_{c.v.} = (U_2 - U_1)_{c.v.} + \sum_e m_e h_e - \sum_i m_i h_i$$

• ضمناً در شرایط USUF حالت ترمودینامیکی، در خروجی حجم کنترل با داخل حجم کنترل یکی است (فرض یکنواخت بودن حالت در داخل حجم کنترل)

(احتمال بالا ۹۰) تحلیل قانون تول برای فرآیندهای شاخص (سیستم)

• حجم ثابت  ${}_1Q_2 = U_2 - U_1$

• فشار ثابت  ${}_1Q_2 = H_2 - H_1$

• دما ثابت (گاز ایده‌آل)  ${}_1Q_2 = {}_1W_2 (\Delta U = 0)$

• آدیاباتیک برگشت پذیر  ${}_1Q_2 = 0, {}_1W_2 = -\Delta U = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - k}$  (البته با فرض گاز ایده‌آل)

• انبساط آزاد آدیاباتیک  ${}_1Q_2 = {}_1W_2 = 0$

$\Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow U_2 = U_1$

در صورتی که اجراکننده فرآیند گاز ایده‌آل باشد  $T_2 = T_1$

(بالا ۹۰) - تحلیل قانون اول برای فرآیندهای شاخص حجم کنترل SSSF

- توربین، کمپرسور، پمپ:  ${}_iW_e = h_i - h_e$

- بویلر، کندانسور، اواپوراتور  ${}_i q_e = h_e - h_i$

- مبدلهای حرارتی  $\sum_e \dot{m}_e h_e = \sum_i \dot{m}_i h_i$

- نازل (شیپوره)  $V_e \frac{2}{2} = h_i - h_e$

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

- شیر اختناق  $h_i = h_e$

- تحلیل قانون اول برای فرآیندهای شاخص حجم کنترل USUF

یادداشت:

.....

.....

.....

.....





**تحلیل قانون اول گازهای کامل:**

هنگامی که اجراکننده فرآیند (در هر قالبی) گاز کامل باشد در تحلیل و عبارت قانون اول به جای  $h$  می توان  $C_{p0}T$  و به جای  $u$  می توان  $C_{v0}T$  قرار داد.

**- قانون اول ترمودینامیک در مورد سیکلها:**

در هر چرخه یا سیکل ترمودینامیکی کار خالص چرخه با انتقال حرارت خالص آن برابر است:

$$W_{net} = Q_{net}$$

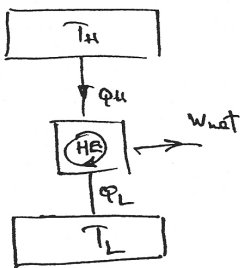
$$\sum_i w_i = \sum_i Q_i$$

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

**- موتور حرارتی و راندمان حرارتی:**

• موتور حرارتی وسیله‌ای است که در یک چرخه ترمودینامیکی عمل کرده و با تبادل حرارت با دو منبع حرارتی سرد و گرم کار خالص مثبت تولید می‌کند.

قانون اول برای موتور حرارتی:  $W_{net} = Q_u - Q_L$



• راندمان حرارتی  $\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H}$

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

**یادداشت:**

.....

.....

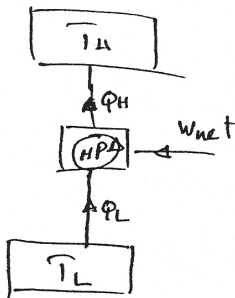
.....

.....

### - پمپ حرارتی و ضریب عملکرد:

• پمپ حرارتی وسیله‌ای است که در یک چرخه ترمودینامیکی عمل کرده و با دریافت کار از پیرامون حرارت را از یک منبع سرد دریافت کرده و به منبع گرم منتقل می‌نماید.

- قانون اول برای پمپ حرارتی  $W_{net} = Q_H - Q_L$



- ضریب عملکرد

$$\beta = \frac{Q_L}{W_{net}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \text{ (سرمایش)}$$

$$\beta' = \frac{Q_H}{W_{net}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \text{ (گرمایش)}$$

$$\beta' - \beta = 1$$

یادداشت:

.....

.....

.....

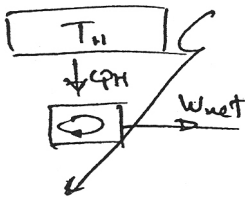
.....

## مبحث چهارم - قانون دوم ترمودینامیک (خیلی بالا ۶۰)

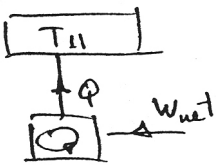
### - در بیان اولیه قانون دوم

#### - بیان کلوین پلانک:

- غیرممکن است بتوان دستگاهی ساخت که در یک چرخه ترمودینامیکی عمل کرده و تنها با یک منبع حرارتی تبادل حرارت کند و تنها عامل دیگرش با پیرامون معادل صعود وزنه باشد.
- شماتیک بیان کلوین پلانک



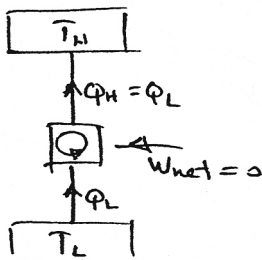
- طبق بیان کلوین پلانک راندمان حرارتی ۱۰۰٪ دست نیافتنی است.
- باید توجه داشت که شرایطی که در شماتیک رو به رو نشان داده شده کاملاً امکان پذیر است. ( $W_{net} < 0$ ) برای چرخه‌ای که تنها با یک منبع در تماس است.



- ضمناً باید توجه داشت که امکان اجرای فرآیند که در آن سیستم تنها با یک منبع حرارتی در تماس باشد و کاری معادل حرارت دریافتی تولید کند نیز وجود دارد. برای مثال کار ایزوترمال که در یک فرآیند ایزوترمال توسط گاز ایده‌ال اجرا شده باشد.

#### - بیان کلازیوس:

- غیرممکن است بتوان دستگاهی ساخت که در یک سیکل ترمودینامیکی عمل کند و تنها تعاملش با پیرامون این باشد که حرارت را از یک منبع سرد گرفته و آن را عیناً (بدون دریافت کار) به یک منبع دما بالا منتقل نماید.
- شماتیک بیان کلازیوس



یادداشت:

.....

.....

.....

.....

- بیان کلازیوس می‌گوید که ضریب عملکرد یک پمپ حرارتی هیچگاه نمی‌تواند بینهایت باشد.
- واضح است که انتقال حرارت در جهت عکس کاملاً امکان‌پذیر است.

### - تعریف فرآیند برگشت‌پذیر:

فرآیند برگشت‌پذیر فرآیندی است که پس از انجام آن بتوان سیستم را به حالت اولیه بازگرداند بطوری که هیچگونه اثر خالصی روی پیرامون گذاشته نشود.

### - عوامل برگشت‌ناپذیری:

۱- انبساط غیرتعادلی ۲- انتقال حرارت در اختلاف دمای غیر صفر ۳- اصطکاک ۴- واکنشهای شیمیایی خودبخودی ۵- مخلوط شدن

### - فرآیند برگشت‌پذیر درونی:

هر گاه در درون سیستم غیریکنواختی فشار و یا دما در طول فرآیند وجود نداشته باشد. (شرایط شبه تعادلی باشد) فرآیند برگشت‌پذیر درونی است.

راندمان حرارتی موتور حرارتی برگشت‌پذیری که بین دو منبع  $T_L$  و  $T_H$  کار می‌کند.

$$\eta_{th,RHE} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad \text{و} \quad \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_C}{T_H}$$

- ضریب عملکرد پمپ حرارتی برگشت‌پذیری که بین دو منبع  $T_L$  و  $T_H$  کار می‌کند.

$$\bullet \quad \text{برای چنین پمپ حرارتی نیز} \quad \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H} \quad \text{و بنابراین}$$

$$\beta_{RHP} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

$$\beta'_{RHP} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

• طبق قضیه اول کارنو راندمان حرارتی موتور برگشت‌پذیری که بین دو منبع حرارتی کار می‌کند از تمامی موتورهای حرارتی دیگری که بین این دو منبع کار می‌کنند بالاتر است.

• طبق قضیه دوم کارنو راندمان حرارتی یک موتور برگشت‌پذیر که بین دو منبع حرارتی در حال کار است فقط به دماهای دو منبع بستگی دارد.

- یعنی به نوع سیال کاری و چگونگی فرآیندهای سیکل بستگی ندارد.

### یادداشت:

.....

.....

.....

.....

**- سیکل کارنو:**

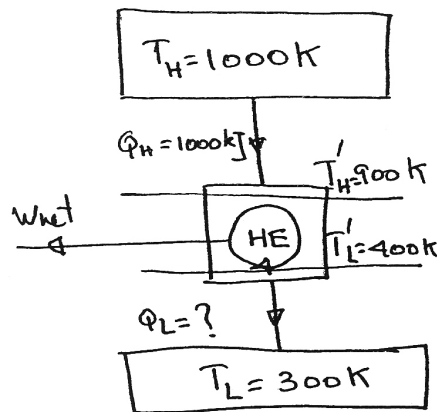
سیکل کارنو یک سیکل برگشت پذیر است که بین دو منبع حرارتی  $T_H$  و  $T_L$  کار می کند فرآیندهای سیکل کارنو عبارتند از: دو فرآیند برگشت پذیر دفع و جذب حرارت دما ثابت در دماهای به ترتیب  $T_L$  و  $T_H$  و دو فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر انبساطی و تراکمی.

- سیکل اریکسون که متشکل از دو فرآیند برگشت پذیر دما ثابت دفع و جذب حرارت در به ترتیب دماهای  $T_L$  و  $T_H$  و دو فرآیند فشار ثابت، نیز یک سیکل برگشت پذیر است که بین دو منبع حرارتی در  $T_L$  و  $T_H$  می تواند کار کند. راندمان این سیکل عیناً همانند سیکل کارنو است.

- سیکل استرلینگ که متشکل از دو فرآیند برگشت پذیر دما ثابت و دفع و جذب حرارت در دماهای به ترتیب  $T_L$  و  $T_H$  و دو فرآیند حجم ثابت، فیزیک سیکل برگشت پذیر است که بین دو منبع در دماهای  $T_L$  و  $T_H$  می تواند کار کند. راندمان این سیکل نیز همانند سیکل کارنو است.

- از آنجائیکه به دلیل اختلاف دمای صفر در فرآیندهای دفع و جذب حرارت سیکل کارنو (یا اریکسون و یا استرلینگ) این فرآیندها غیر عملی و یا بسیار هزینه بر هستند می توان با قبول برگشتناپذیری سیکل کارنوی برگشت پذیر درونی را اجرا کرد.

مثال ۱: سیکل شکل روبه رو بین دو منبع حرارتی در دماهای نشان داده شده در شکل در حال کار است آینه جذب حرارت در دمای پایین تر از دمای منبع دما بالا و دفع حرارت در دمای بالاتر از دمای منبع دما پایین انجام می پذیرد. (برای اینکه سیکل از لحاظ اجرا امکان پذیر تر شود) به ازاء دریافت حرارت به میزان  $Q_H = 1000 \text{ kJ}$  از منبع دما بالا حالت های مختلف این سیکل را ارزیابی کنید.



حل: بالاترین راندمان حرارتی ممکن برای این سیکل  $\left(1 - \frac{T'_L}{T'_H}\right)$  می باشد نه  $\left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)$  چرا که فرآیندهای جذب و دفع حرارت در

دماهای  $T'_H$  و  $T'_L$  صورت گرفته اند. بنابراین بالاترین راندمان حرارتی ممکن  $\eta_{th,RHE} = 1 - \frac{400}{900} = \frac{5}{9}$  است. در این حالت کار

خالص تولیدی  $\left(\frac{5000}{9}\right) \text{ kJ}$  می باشد و طبق قانون اول حرارت دفع شده به منبع دما پایین  $\frac{4000}{9} \text{ kJ}$  است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

• در صورتی که کار تولیدی از  $\frac{5000}{9}$  kJ بیشتر می‌باشد سیکل غیرممکن است.

• در صورتی که کار تولیدی دقیقاً برابر  $\frac{5000}{9}$  kJ باشد سیکل برگشت‌پذیر درونی ولیکن برگشت‌ناپذیر بیرونی است.

• در صورتی که کار تولیدی از  $\frac{5000}{9}$  kJ کمتر باشد سیکل برگشت‌ناپذیر درونی و برگشت‌ناپذیر بیرونی است.

مثال ۲: یک سیکل اریکسون بین دو منبع دما بالای  $T_H = 1000\text{K}$  و دما پایین  $T_L = 300\text{K}$  در حال کار است. راندمان این سیکل در

مقایسه با سیکل کارنویسی که بین همین دو منبع کار می‌کند چگونه است؟

الف) بالاتر است

ج) برابر است

ب) پایین‌تر است

د) بسته به نوع سیال کاری می‌تواند بالاتر، پایین‌تر باشد

حل: هر دو با هم برابرند زیرا هر دو برگشت‌پذیرند و بین دو منبع یکسان در حال کارند. گزینه ج درست است.

مثال ۳: یک سیکل استرلینگ بین دو منبع حرارتی در دماهای  $T_H = 2000\text{K}$  و  $T_L = 300\text{K}$  در حال کار است. نسبت گرمای ویژه

سیال کاری سیکل  $k = 1.3$  می‌باشد. برای بالاتر بردن راندمان بهتر است از یک سیال کاری با  $k \dots$  استفاده کرد.

الف) کوچکتر

ج) تفاوتی نمی‌کند

ب) بزرگتر

د) بسته به فرآیندهای سیکل دارد

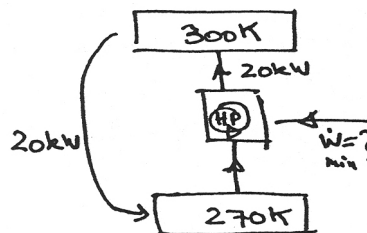
حل: راندمان سیکل استرلینگ همانند کارنو تنها به دمای دو منبع حرارتی بستگی دارد. بنابراین گزینه ج درست است.

مثال ۴: می‌خواهیم از یک پمپ حرارتی برای گرم کردن خانه‌ای در زمستان استفاده کنیم. دمای داخل خانه  $300\text{K}$  و دمای هوای

بیرون  $270\text{K}$  است. اگر بار حرارتی خانه  $20\text{kW}$  باشد، حداقل توان مصرفی پمپ حرارتی چند kW است؟

حل: با توجه به شماتیک روبه‌روی پمپ حرارتی می‌بایست حرارتی که به طور طبیعی از اتاق به بیرون دفع می‌شود را جبران نماید.

کمترین توان مصرفی در صورتی رخ می‌دهد که از پمپ حرارتی برگشت‌پذیر استفاده شود که در این صورت:



$$\beta'_{\text{RHP}} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{300}{300 - 270} = 10$$

از طرف دیگر

$$\beta' = \frac{\dot{Q}_n}{\dot{W}}$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{\text{min}} = \frac{\dot{Q}_H}{\beta'} = \frac{20}{10} = 2\text{kW}$$

یادداشت:

.....  
 .....  
 .....  
 .....

- نابرابری کلازیوس: برای هر سیکل ترمودینامیکی رابطه زیر برقرار است:

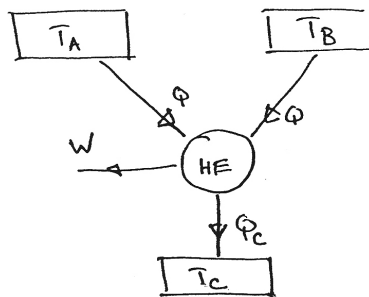
$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

در رابطه فوق T دمای سیال کاری سیکل در طول فرآیندها است. تساوی هنگامی برقرار است که سیکل برگشت پذیر درونی باشد.

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \text{ : سیکل برگشت پذیر درونی است}$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0 \text{ : سیکل برگشت ناپذیر درونی است}$$

مثال ۵: مطابق شکل روبرو یک موتور حرارتی با سه منبع حرارتی در تماس است. رابطه ای برای راندمان حرارتی این سیکل در صورتی که همه فرآیندها برگشت پذیر باشند بدست آورید.



حل: طبق قانون اول:  $W = 2Q - Q_c$

$$\text{از طرف دیگر: } -\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q}{T_A} + \frac{Q}{T_B} = 0$$

$$Q_c = Q \left( \frac{T_c}{T_A} + \frac{T_c}{T_B} \right)$$

$$\eta_{th} = \frac{W}{2Q} \quad \text{حال با توجه به تعریف راندمان حرارتی:}$$

$$= 1 - \frac{Q_c}{2Q} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{T_c}{2} \left( \frac{1}{T_A} + \frac{1}{T_B} \right)$$

- قانون دوم ترمو برای فرآیندهای ترمودینامیکی

$$\bullet \text{ سیستم: } S_2 - S_1 = \int \frac{\delta Q}{T} + S_{sg}$$

$$ds = \frac{\delta Q}{T} + \delta s_{sg}$$

$$ds = \frac{\delta q}{T} + \delta s_{sg}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....



• نکات مهم در رابطه با قانون دوم در فرآیندها (قالب سیستم)

- (۱) در فرآیندهای آدیاباتیکی هیچگاه انتروپی کاهش نمی‌یابد.
  - (۲) اگر در فرآیندی انتروپی کاهش یافت حتماً دفع حرارت وجود داشته است.
  - (۳) یک فرآیندی که در آن انتروپی ثابت مانده است لزوماً برگشت‌پذیر نیست.
  - (۴) اگر در فرآیندی جذب حرارت وجود داشت حتماً انتروپی افزایش می‌یابد.
  - (۵) برای فرآیندهای برگشت‌پذیر تغییر انتروپی و انتقال حرارت هم علامتند.
- حجم کنترل:

$$\left( \frac{ds}{dt} \right)_{c.v.} + \sum_e \dot{m}_e \Delta_e - \sum_i \dot{m}_i \Delta_i = \sum_{c.s.} \dot{Q} + \dot{S}g$$

• در شرایط SSSF,  $\left( \frac{ds}{dt} \right)_{c.v.} = 0$

• برای توربین، کمپرسور، پمپ، نازل، دیفیوزر، شیر انبساط (آدیاباتیکی) با توجه به آدیاباتیکی بودن این دستگاهها در شرایط متعارف کاریشان:

$$\dot{m}(s_e - s_i) = sg$$

• تعریف راندمان ایزنتروپیک برای توربین:

$$\eta_{s,t} = \frac{W_a}{W_s}$$

کار تولیدی توربین ایزنتروپیک از کار تولیدی تمامی توربین‌های آدیاباتیکی که شرایط ورودی و نسبت فشار یکسانی دارند بالاتر است.

• تعریف راندمان ایزنتروپیک برای کمپرسور

$$\eta_{s,c} = \frac{w\Delta}{wa}$$

کار مصرفی کمپرسور ایزنتروپیک از تمامی کمپرسورهای آدیاباتیکی که شرایط ورودی و نسبت فشار یکسانی دارند پایین‌تر است.

## - اصل افزایش انتروپی

• تغییر انتروپی سیستم (یا حجم کنترل) و پیرامون روی هم همواره بزرگتر یا مساوی صفر است.

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{sys} + \Delta S_{surr} \geq 0$$

$$\frac{dS_{net}}{dt} = \left( \frac{dS_{\Delta.c.v.}}{dt} + \frac{dS_{surr}}{dt} \right) \geq 0$$

• از این قانون بهتر است برای تحلیل قانون دوم فرآیندهایی که در آنها سیستم یا حجم کنترل با یک منبع حرارتی در ارتباط است استفاده شود.

• موازنه انتروپی هنگامی برقرار است که تمامی فرآیندها برگشت‌پذیر باشند.

**یادداشت:**

.....

.....

.....

.....

مثال ۶: مایع اشباع آب در دمای  $99.6^\circ\text{C}$  و فشار  $100\text{kPa}$  با دریافت حرارت طی دو فرآیند جداگانه به بخار آب اشباع در همان دما تبدیل می‌شود. فرآیند در داخل مجموعه سیلندر پیستونی اتفاق می‌افتد. در فرآیند اول حرارت از یک منبع حرارتی در دمای  $99.7^\circ\text{C}$  و در فرآیند دوم حرارت از یک منبع حرارتی در دمای  $500^\circ\text{C}$  دریافت می‌شود. تغییر انتروپی در کدام فرآیند بالاتر است؟  
 حل: تغییر انتروپی برای هر دو فرآیند  $s_{fg}$  است. چون حالت‌های ابتدایی و انتهایی برای هر دو فرآیند یکی است.

مثال ۷: در سوال ۶  $\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$  در کدام فرآیند بیشتر است؟

حل: با توجه به اختلاف دمای کم،  $S_g$  در فرآیند اول کمتر است چون به یک فرآیند انتقال حرارت برگشت‌پذیر نزدیک‌تر است. بنابراین  $\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$  در این فرآیند بیشتر است. (یادآوری:  $\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_g$ )

مثال ۸: در یک کانال آدیاباتیک جهت جریان همواره به سمتی است که: (شرایط پایا)

- الف) فشار کاهش یابد.
- ب) سرعت افزایش یابد.
- ج) انتروپی افزایش یابد.
- د) دما کاهش یابد.

حل: با توجه به قانون دوم گزینه ج درست است.

مثال ۹: یک مایع در داخل کانال آدیاباتیکی جریان دارد. در راستای جریان:

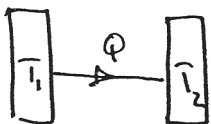
- الف) فشار کاهش می‌یابد
- ب) سرعت افزایش می‌یابد
- ج) دما افزایش می‌یابد
- د) ارتفاع کاهش می‌یابد.

حل: با توجه به قانون دوم ترمودینامیک انتروپی می‌بایست افزایش یابد و با توجه به اینکه برای مایعات:  $\Delta s = C \ln \frac{T_2}{T_1} > 0$

بنابراین در راستای جریان دما افزایش می‌یابد. پس گزینه ج درست است.

### - انتروپی تولیدی در فرآیندهای شاخص برگشت‌ناپذیر درونی

- انتقال حرارت بین دو جسم (منبع) در دماهای متفاوت



$$\Delta S_{\text{net}} = S_g = Q \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

یادداشت:

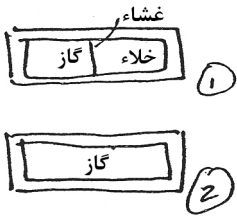
.....

.....

.....

.....

- انبساط آزاد آدیباتیک (گاز کامل)



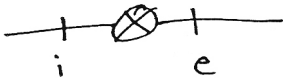
$$U_2 = U_1$$

$$\Rightarrow T_2 = T_1$$

$$\Rightarrow \Delta S = S_g = mR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

با تحلیل قانون اول

- شیر انبساط (گاز کامل)



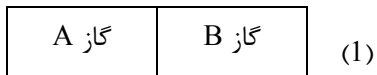
با تحلیل قانون اول  $h_i = h_e$

با توجه به گاز کامل  $T_i = T_e$

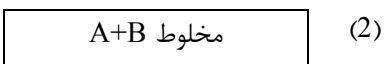
$$s_g = s_e - s_i = C_{p_0} \ln \frac{T_e}{T_i} - R \ln \frac{P_e}{P_i}$$

$$s_g = R \ln \frac{P_i}{P_e}$$

- مخلوط شدن دو گاز



$$\Delta S_{net} = S_j = -\bar{R}(n_A \ln y_A + n_B \ln y_B)$$



یادداشت:

.....

.....

.....

.....

## مبحث پنجم - کار برگشت پذیر، برگشت ناپذیری و قابلیت کاردهی (متوسط رو به کم ۴۰)

- کار برگشت پذیر  $W^{rev}$

- کار برگشت پذیر کمیتهی است که در رابطه با هر فرآیند تعریف می شود و بر اساس آن می توان کیفیت اجرای آن فرآیند را ارزیابی کرد.
- رابطه کار برگشت پذیر:

$${}_1W_2^{rev} = U_1 - U_2 - T_0(S_1 - S_2) + {}_1Q_2 \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \quad \text{(i) سیستم}$$

(ii) حجم کنترل SSSF

$${}_iW_e^{rev} = \sum_i \dot{m}_i \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_i - \sum_e \dot{m}_e \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_e$$

$$T_0 \left[ \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_e \dot{m}_e s_e \right] + \dot{Q}_{C.V.} \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$

(iii) حجم کنترل USUF

$${}_1W_2^{rev} = (U_1 - U_2)_{C.V.} + \left( \sum_i m_i h_i - \sum_e m_e h_e \right)$$

$$- T_0 \left[ (S_1 - S_2)_{C.V.} + \left( \sum_i m_i s_i - \sum_e m_e s_e \right) \right]$$

$$+ \dot{Q}_{C.V.} \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$

در رابطه های فوق  $T_0$  دمای محیط و  $T_H$  دمای منبع حرارتی است که با آن تبادل حرارت صورت گرفته است (تبادل حرارت مثبت یا منفی)

- برگشت ناپذیری  $I$

- برگشت ناپذیری اختلاف کار برگشت پذیر فرآیند و کار واقعی فرآیند است.

$$I = W^{rev} - W^{actual}$$

این کمیته همواره مثبت و در بهترین حالت صفر است.

- روابط برگشت ناپذیری

$$I = T_0(S_2 - S_1) - {}_1Q_2 \frac{T_0}{T_H} \quad \text{(i) سیستم}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

$$= T_0 \left[ (S_2 - S_1) - \frac{1}{T_H} Q_2 \right]$$

$$= T_0 \Delta S_{\text{net}} \geq 0$$

(ii) حجم کنترل SSSF

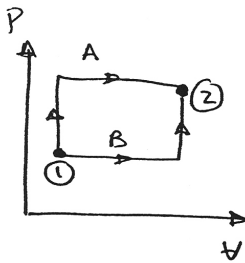
$$\dot{I} = T_0 \left[ \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_i \dot{m}_i s_i \right] - \dot{Q}_{C.V.} \frac{T_0}{T_H}$$

(iii) حجم کنترل USUF

$$I_2 = T_0 \left[ (S_2 - S_1)_{C.V.} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_i \dot{m}_i s_i \right]$$

$$- \dot{Q}_2 \frac{T_0}{T_H}$$

مثال ۱: مطابق نمودار  $P, v$  شکل روبه‌رو دو فرآیند ترمودینامیکی A و B بین دو حالت (1) و (2) رخ داده است. کار برگشت‌پذیر در کدام فرآیند بیشتر است؟ (در هر دو فرآیند  $T_0$  و  $T_H$  یکی است)



الف) فرآیند A (ب) فرآیند B (ج) هر دو با هم برابر است (د) نمی‌توان گفت  
 حل: با توجه به اینکه حالت‌های ابتدایی و انتهایی و  $T_0$  و  $T_H$  در هر دو فرآیند یکی است بنابراین گزینه ج درست است.

مثال ۲: در کدام فرآیند مثال قبلی برگشت‌ناپذیری بیشتر است؟

حل: با توجه به اینکه طبق نمودار  $W_A > W_B > 0$ ، می‌توان نتیجه گرفت که طبق قانون اول  $Q_A > Q_B > 0$ . بنابراین طبق رابطه برگشت‌ناپذیری می‌توان نتیجه گرفت که چون  $(S_2 - S_1) > 0$  برای هر دو فرآیند یکی است، برگشت‌ناپذیری فرآیند A کمتر است.

قابلیت کاردهی (اکسرژی)

- قابلیت کاردهی در رابطه با یک حالت ترمودینامیکی تعریف می‌شود و مقدار آن نشان دهنده حداکثر کاری است که می‌توان تولید کرد به طوری که سیستم یا حجم کنترل به حالت مرده برسد.
- رابطه قابلیت کاردهی

$$\phi = u - u_0 - T_0(s - s_0) - P_0(v_0 - v)$$

(i) سیستم

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

(ii) حجم کنترل SSSF

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

## مبحث ششم - چرخه‌های عملی ترمودینامیکی (متوسط روبه کم ۴۰)

در قسمت عمده این مبحث لازم است معیاری برای مقایسه راندمان‌ها و کار خالص تولیدی معرفی شود.

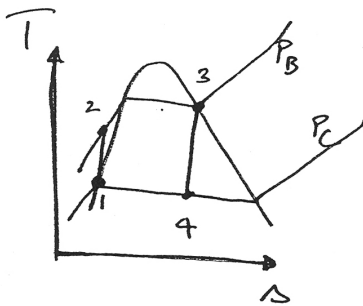
- راندمان حرارتی بر اساس فرمول  $\eta_{th} = 1 - \frac{\bar{T}_L}{\bar{T}_H}$  مقایسه می‌شود. در این رابطه  $\bar{T}_H$  دمای متوسط سیال کاری در طی فرآیند جذب حرارت از منبع دما بالا و  $\bar{T}_L$  دمای متوسط سیال کاری در طی فرآیند دفع حرارت به منبع دما پایین است. واضح است هرچه این نسبت کوچکتر شود راندمان بالا می‌رود.

• در مورد ضریب عملکرد  $\frac{\bar{T}_L}{\bar{T}_H}$  می‌بایست افزایش یابد (دو دما به هم نزدیک شوند) تا ضریب عملکرد افزایش یابد.

- کار خالص سیکل همان انتقال حرارت خالص سیکل است که با توجه به مساحت محصور شده سیکل در نمودار  $T-s$  یا  $P-v$  قابل تشخیص است (البته به شرطی که سیکل برگشت‌پذیر درونی باشد، برای مثال سیکل تبرید تراکم بخار چنین نیست).

- **سیکل رانکین:** مدل ترمودینامیکی نیروگاه بخار

- پارامترهای مشخص کننده: فشار بویلر و فشار کندانسور



- نقاط قرار دادی: (۳) و (۱) (خروج از کندانسور اشباع و خروج از بویلر، بخار اشباع)

- سیکل برگشت‌پذیر درونی است.

- تأثیر بالا بردن فشار بویلر

- افزایش راندمان

- کاهش کیفیت بخار عبوری در توربین

- افزایش کار پمپ

- کاهش حرارت دفع شده به محیط

- تأثیر کاهش فشار کندانسور

- افزایش راندمان

- کاهش کیفیت بخار عبوری در توربین

**یادداشت:**

.....

.....

.....

.....

- افزایش کار پمپ

- دقت شود که در مورد کاهش فشار کندانسور این محدودیت وجود دارد که نباید دمای کندانسور از دمای محیط کمتر شود.

• بیشترین برگشت ناپذیری در بویلر اتفاق می‌افتد: برگشت ناپذیری بیرونی در اثر انتقال حرارت

- تأثیر سوپرهیت کردن بخار خروجی از بویلر

• افزایش راندمان مادامیکه بخار خروجی از توربین وارد ناحیه مافوق گرم نشود.

• افزایش کار خالص

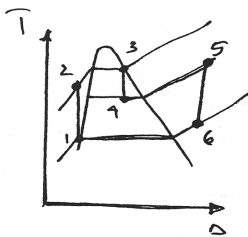
• افزایش حرارت دفع شده به منبع سرد (محیط)

• کار پمپ تغییری نمی‌کند.

• افزایش حرارت جذب شده در بویلر

- سیکل رانکین با گرمایش مجدد:

در  $P_C$  و  $P_B$  یکسان در مقایسه با سیکل ساده:



• افزایش کار خالص سیکل

• تأثیر روی راندمان نامشخص است.

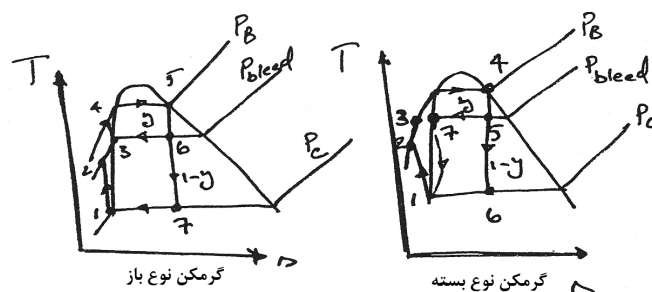
• کار پمپ تغییری نمی‌کند.

• کیفیت بخار عبوری در توربین افزایش می‌یابد.

• حرارت دریافتی در فرآیندهای 2-3 و 4-5

- سیکل رانکین بازیاب:

در مقایسه با سیکل ساده با  $P_C$  و  $P_B$  یکسان



یادداشت:

.....

.....

.....

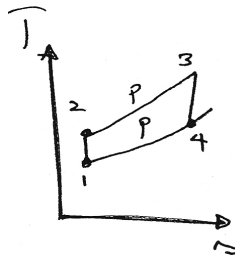
.....

.....

- افزایش راندمان
- کاهش کار خالص
- کاهش حرارت دفع شده
- کاهش حرارت دریافت شده
- تفاوت مشخصی بین دو سیکل بازیافتی وجود ندارد تنها نوع بسته را در هر فشار  $P_{bleed}$  نمی‌توان به کار گرفت. اگر  $P_{bleed}$  بیش از حد پائین بیاید بازیافت حرارت امکان‌پذیر نیست.

**– سیکل برای تون: مدل ترمودینامیکی نیروگاه گازی**

- سیال عامل سیکل هوا به عنوان گاز کامل است.
- پارامترهای مشخص کننده سیکل:



– شرایط ورودی  $P_1, T_1$

– نسبت فشار  $r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$

– دمای ماکزیمم  $T = T_3$

• راندمان سیکل با رابطه  $\eta_{th} = 1 - r_p^{\frac{1-k}{k}}$  داده می‌شود.

• با افزایش نسبت فشار  $r_p$  راندمان افزایش می‌یابد.

• دمای ماکزیمم و شرایط ورودی روی راندمان تأثیری ندارند.

• افزایش دمای ماکزیمم یا کاهش دمای ورودی  $T_1$  کار خالص را افزایش می‌دهد.

**مثال ۱:** راندمان حرارتی و کار خالص توربین گازی را در تابستان و زمستان مقایسه کنید.

در تابستان  $T_1$  بالاتر و در نتیجه با حفظ  $T_{max}$  کار خالص کمتر است. راندمان حرارتی تغییری نمی‌کند.

**یادداشت:**

.....

.....

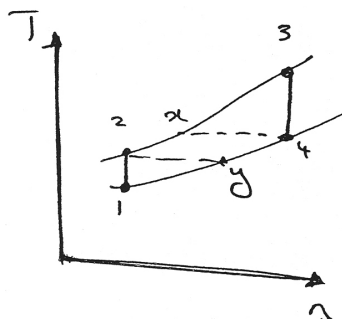
.....

.....



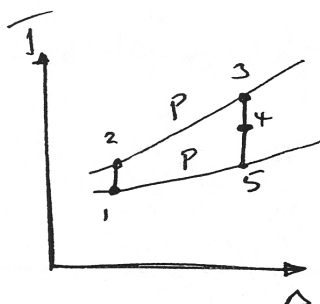
– سیکل برای تون بازیافتی:

در مقایسه با سیکل ساده با همان پارامترها:



- راندمان افزایش می‌یابد.
- کار خالص تغییری نمی‌کند.
- حرارت دفع شده و جذب شده هر دو کاهش می‌یابند. (جذب حرارت:  $x \rightarrow 3$  و دفع حرارت:  $y \rightarrow 1$ )
- راندمان حرارتی این سیکل:
- با افزایش  $T_p$  کاهش می‌یابد.
- با افزایش  $T_{max}$  یا کاهش  $T_1$  افزایش می‌یابد.

– سیکل موتور جت



- کار خالص سیکل صفر است.
- $T_2 - T_1 = T_3 - T_4$
- از واگرا بودن خطوط فشار ثابت استفاده می‌کند.
- فرآیند  $4 \rightarrow 5$  در درون یک شیبوره (نازل) رخ می‌دهد

یادداشت:

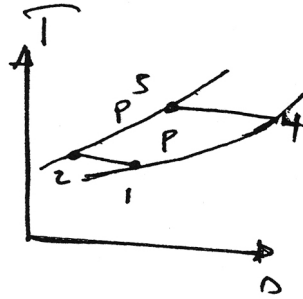
.....

.....

.....

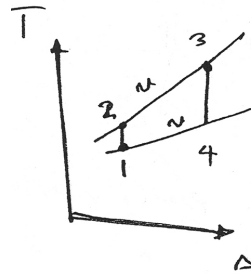
.....

- سیکل برای تون اصلاح شده (سیکل اریکسون)



- راندمان حرارتی فقط به دمای ماکزیمم و مینیمم سیکل بستگی داشته و به نسبت فشار ربطی ندارد.
- راندمان حرارتی  $\eta_{th} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$  است.
- کار خالص و راندمان حرارتی آن از سیکل برای تون با  $T_{max}$ ،  $r_p$  و شرایط ورودی یکسان بالاتر است.

- سیکل اتو:



مدل ترمودینامیکی برای موتورهای درونسوز با سوخت سبک.

- تمامی فرآیندها در داخل مجموعه سیلندر پیستون رخ می دهد (تحلیل در قالب سیستم)
- پارامترهای مشخص کننده سیکل: نسبت تراکم  $r_v = \frac{v_1}{v_2}$ ، دمای ماکزیمم  $T_3$  و شرایط ورودی (نقطه ۱)
- راندمان سیکل تابعی تنها از نسبت تراکم است و با رابطه  $\eta_{th} = 1 - r_v^{1-k}$  داده می شود. طبق این رابطه با افزایش نسبت تراکم راندمان بالا می رود.
- راندمان به دمای ماکزیمم بستگی ندارد.
- افزایش دمای ماکزیمم کار خالص سیکل را افزایش می دهد.

یادداشت:

.....

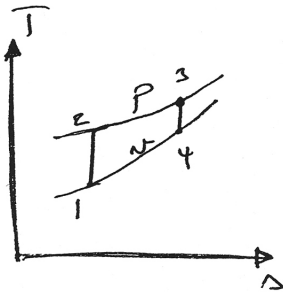
.....

.....

.....

- سیکل دیزل

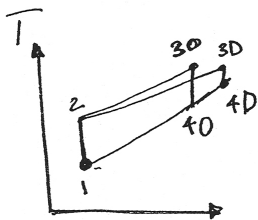
مدل ترمودینامیکی برای موتورهای درونسوز با سوخت سنگین



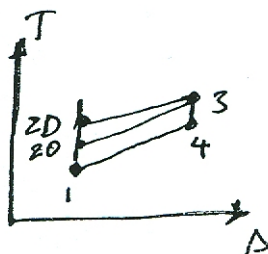
• راندمان حرارتی با  $r_v$  نسبت مستقیم ولی با دمای ماکزیمم (یا نسبت قطع سوخت  $r_c = \frac{v_3}{v_2}$ ) رابطه معکوس دارد.

• پارامترهای مشخص کننده سیکل همانند سیکل اتو است.

- مقایسه سیکل دیزل و سیکل اتو

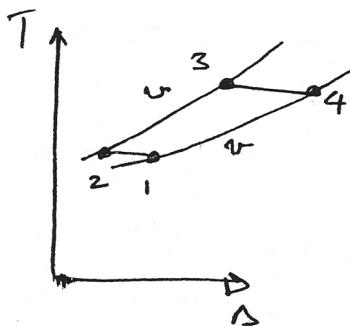


• مطابق شکل به ازاء  $r_v$  شرایط ورودی و دمای ماکزیمم یکسان راندمان سیکل اتو بالاتر است.



• مطابق شکل به ازاء  $(T_1, P_1)$  و  $(T_3, P_3)$  یکسان راندمان سیکل دیزل بالاتر است.

- سیکل استرلینگ (اتو اصلاح شده)



یادداشت:

.....

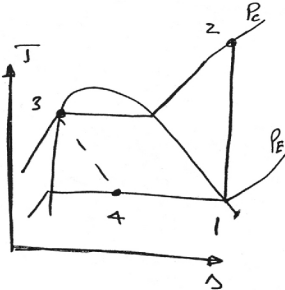
.....

.....

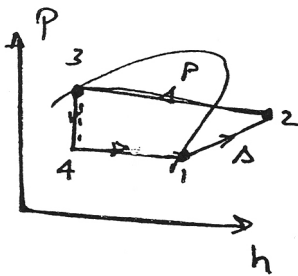
.....

- همانند سیکل اریکسون و سیکل کارنو راندمان این سیکل با نسبت تراکم رابطه‌ای ندارد و فقط تابعی از دماهای ماکزیمم و مینیمم سیکل است.

– سیکل تبرید تراکم بخار



- مدل ترمودینامیکی برای یخچال خانگی، کولر گازی...
- پارامترهای مشخص کننده سیکل فشار کندانسور  $P_C$  و فشار اواپراتور  $P_E$  می‌باشند.
- نقاط قرار دادی سیکل (۱) و (۳) هستند.



- سیکل روی نمودار  $P-h$ :
- ضریب عملکرد افزایش می‌یابد در صورتی که:
- فشار کندانسور کاهش یا فشار اواپراتور افزایش یابد
- مایع خروجی از کندانسور مادیون سرد شود
- سوپرهیت کردن بخار خروجی از اواپراتور تأثیری روی ضریب عملکرد نداشته ولی کار کمپرسور را زیاد می‌کند.

مثال ۲: یک کولر خودرو را در شرایط کاری معمولی در نظر بگیرید. در صورتی که فن کندانسور روشن شود، کار کمپرسور... ظرفیت تبرید... و ضریب عملکرد... می‌یابد.

- |                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| (الف) ثابت، افزایش، افزایش | (ج) کاهش، کاهش، افزایش     |
| (ب) کاهش، افزایش، کاهش     | (د) افزایش، افزایش، افزایش |

یادداشت:

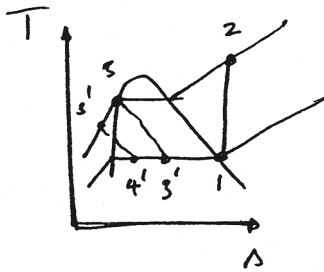
.....

.....

.....

.....

حل: گزینه الف درست است.



با روشن شدن فن کندانسور شرایط از 3 و 4 به 3' و 4' تغییر می کند.

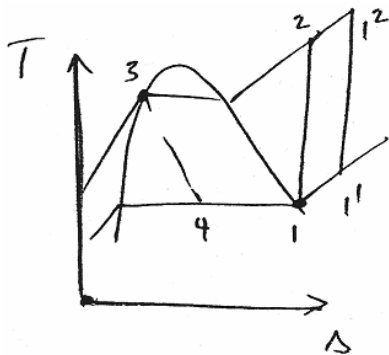
مثال ۳: یک کولر خودرو را در شرایط کاری معمولی در نظر بگیرید. در صورتی که فن داخل ماشین روشن شود، کار کمپرسور..... ظرفیت تبرید..... و ضریب عملکرد .... می یابد.

(ج) افزایش، افزایش، نامعلوم

(الف) کاهش، افزایش، کاهش

(د) افزایش، کاهش، نامعلوم

(ب) ثابت، افزایش، افزایش



حل: گزینه ج درست است.

با روشن شدن فن داخل ماشین در واقع ظرفیت تبرید بالارفته و شرایط از (1,2) به (1',2') تغییر پیدا می کند.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

## مبحث هفتم (متوسط ۵۰)

### ترمودینامیک مخلوط‌ها و سایکرومتری

در این مبحث تمرکز روی مخلوط گازهای ایده‌آل است. یعنی مخلوط از رابطه‌ی گاز ایده‌آل  $PV = n\bar{R}T$  تبعیت می‌کند. برای تحلیل ترمودینامیکی مخلوط‌ها می‌بایست گرمای ویژه معادل  $C_{V_0}, C_{P_0}$  و جرم مولکولی را برای آنها معین نمود. برای تعیین حالت ترمودینامیکی مخلوط‌ها علاوه بر دو خاصیت مانند دما و فشار از مشخصه‌هایی که ترکیب مخلوط را معین می‌کنند نیز می‌بایست استفاده کرد: جزء مولی،

جزء جرمی

$$\sum_i y_i = 1 \quad y_i = \frac{n_i}{n} \quad \text{جزء مولی:}$$

$$\sum_i m_{f_i} = 1 \quad m_{f_i} = \frac{m_i}{m} \quad \text{جزء جرمی:}$$

جرم مولکولی معادل مخلوط

$$M = \sum_i y_i M_i$$

$$M = \left[ \sum_i \frac{m_{f_i}}{M_i} \right]^{-1}$$

گرمای ویژه معادل مخلوط  $C_{P_0}$   
 $C_{V_0}$

$$C_{P_0} = \sum_i C_{P_{0,i}} m_{f_i} l_i$$

$$C_{V_0} = \sum_i C_{V_{0,i}} m_{f_i} l_i$$

گرمای ویژه مولی

$$\bar{C}_{P_0} = \sum_i \bar{C}_{P_{0,i}} y_i$$

$$\bar{C}_{V_0} = \sum_i \bar{C}_{V_{0,i}} y_i$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

مثال ۱: مخلوطی از  $CO_2$  و  $O_2$  با نسبت مولی ۲ به ۱ جرم مولکولی بیشتری دارد یا مخلوطی از  $CO_2$  و  $O_2$  با نسبت مولی ۱ به ۲.  
حل:

با توجه به فرمول جرم مولکولی مخلوط  $M = y_{CO_2} \times 44 + y_{O_2} \times 32$  واضح است که حالت اول جرم مولکولی بیشتری دارد.

مثال ۲: در صورتی که مخلوط  $CO_2$  و  $O_2$  مثال قبل از دما و فشار  $100kPa, 300K$  طی یک فرآیند پلی تریپیک با  $n = 1.3$  تا فشار  $200kPa$  متراکم شود کار به ازاء واحد جرم در کدام یک از دو حالت مثال قبل بیشتر است؟ (داخل سیلندر و پیستون)

حل:

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

با توجه به رابطه پلی تریپیک

پس در هر دو حالت (طبق  $T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$ ) دمای نهایی در انتهای فرآیند یکی خواهد بود. با توجه به رابطه کار پلی تریپیک

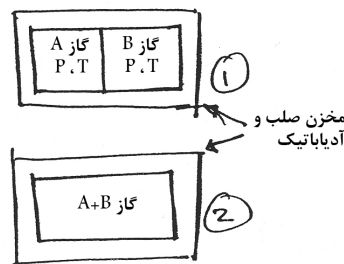
$${}_1W_2 = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n} = \frac{\bar{R}}{M} \left[ \frac{T_2 - T_1}{1-n} \right] \left( \frac{kJ}{ks} \right)$$

بنابراین کار تراکمی برای حالتی که  $M$  بیشتر است کمتر خواهد بود، یعنی حالت اول.

**قانون دالتون:** اگر قرار باشد برای هر یک از گونه‌های داخل یک مخلوط گاز ایده‌آل حالتی تعریف کنیم طبق مدل دالتون دمای هر یک از گونه‌ها دمای مخلوط، حجم هر یک از گونه‌ها حجم مخلوط ولیکن هر یک از گونه‌ها در فشاری معادل جزء فشار کل مخلوط که با رابطه زیر داده می‌شود قرار خواهد داشت:

$$P_i = \frac{n_i}{n} P$$

تحلیل ترمودینامیکی فرآیند مخلوط شدن دو گاز در یک فرآیند آدیاباتیکی و حجم کل ثابت:



کل مجموعه را به عنوان تقسیم در نظر بگیریم:

تحلیل قانون اول:

$$U_1 = U_2$$

$$T_2 = T_1 = T$$

نتیجه این تحلیل این است که

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

از ثابت بودن حجم کل مخزن می‌توان نتیجه گرفت:

$$P_2 = P_1 = P$$

یعنی فشار کل مخزن در انتهای فرآیند برابر فشار هر یک از گونه‌ها در قبل از مخلوط شدن است.

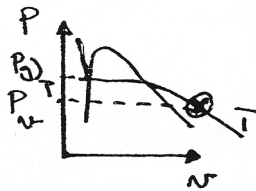
تحلیل قانون دوم:

$$\Delta S_{\text{mix}} = -\bar{R}(n_A \ln y_A + n_B \ln y_B) > 0$$

سایکرومتری: تحلیل ترمودینامیک هوای مرطوب: (بخار آب + هوای خشک)

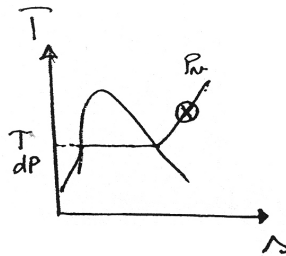
• هوای اشباع: هوایی که در آن بخار آب موجود در هوا در شرایط اشباع بخار باشد.

• رطوبت نسبی ( $\phi$ )  $\phi = \frac{P_v}{P_g}$



• نسبت رطوبت ( $\omega$ )  $\omega \equiv \frac{m_v}{m_a}$

دمای شبنم ( $T_{dp}$ ):  $T_{dp} = T_g)_{P_v}$



دمای حباب تر یا اشباع آدیاباتیک: ( $T_{\text{wb}}$ )

دمای حاصله در صورتی که هوای مرطوب طی یک فرآیند آدیاباتیک تا اشباع شدن از اطرافش بخار و رطوبت دریافت نماید.

مثال ۳: دمای شبنم را برای هوای مرطوبی که دمای آن  $25^\circ\text{C}$  و رطوبت نسبی آن 60% است به طور تقریبی کدام است؟

$T_s (^{\circ}\text{C})$	$P_s (\text{kPa})$
10	1.2276
15	1.7051
20	2.339
25	3.169

یادداشت:

.....

.....

.....

.....



حل: با توجه به تعریف دمای شبنم  $T_{dp} = T_g)_{p_v}$

$$P_v = 0.6 \times 3.169$$

$$\approx 1.9 \text{ kPa}$$

بنابراین دمای شبنم با توجه به جدول بین  $15 - 20^\circ\text{C}$  است.

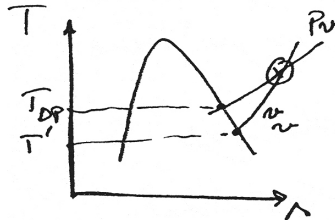
مثال ۴: هوای مرطوب در داخل ظرف صلبی خنک شده تا اولین قطرات آب مشاهده شوند. در این لحظه دمای هوای داخل ظرف از دمای شبنم حالت اولیه:

- الف) بیشتر است      ب) کمتر است      ج) برابر است      د) نمی توان گفت

حل: با توجه به اینکه مسیر ترمودینامیکی طی شده توسط بخار آب داخل مخلوط حجم ثابت است مطابق نمودار با توجه به اینکه شیب خط حجم ثابت از فشار ثابت بیشتر است داریم.

$$T' < T_{DP}$$

گزینه ب صحیح است.

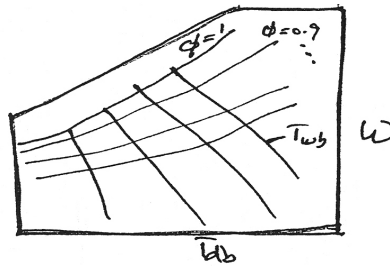


مثال ۵: هوای مرطوب در فرآیند فشار ثابتی گرم می شود. در این فرآیند دمای شبنم هوا

- الف) افزایش می یابد      ب) کاهش می یابد  
ج) تغییری نمی کند      د) نمی توان گفت

حل: با توجه به اینکه بخار آب موجود در هوا نیز مسیر ترمودینامیکی فشار ثابت را اجرا می کند بنابراین دمای شبنم تغییری نخواهد کرد. پس گزینه ج درست است.

نمودار سایکرومتری: یک نمودار خواص مخصوص هوای مرطوب است که در آن می توان حالت های ترمودینامیکی هوای مرطوب و همچنین فرآیندهای سایکرومتری را به نمایش درآورد تمام نقاط روی نمودار فشار کل یکسانی دارند.



یادداشت:

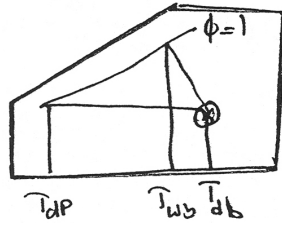
.....

.....

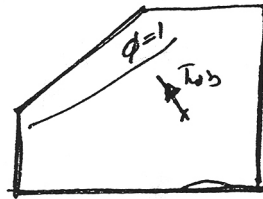
.....

.....

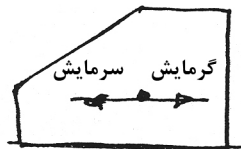
در صورتی که در یک فرآیند فشار کل عوض شود از این نمودار نمی‌توان استفاده کرد. مقایسه دمای حباب‌تر، حباب خشک و نقطه شبنم: برای حالت نشان داده شده در نمودار زیر این مقایسه انجام شده است.



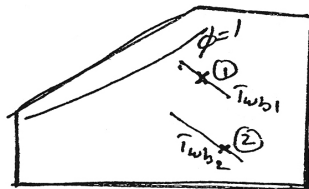
فرآیند سرمایش تبخیری در نمودار سایکرومتری مطابق نمودار است.



فرآیند سرمایش یا گرمایش بدون دادن یا گرفتن رطوبت



مثال ۶: کدام یک از دو حالت نشان داده شده در شکل دمای حباب‌تر بالاتری دارند؟



الف) حالت ۱

ب) حالت ۲

ج) هر دو مساوی

د) نمی‌توان گفت

حل: با توجه به خطوط  $T_{wb}$  ثابت گذرنده از دو حالت گزینه ۱ درست است.

یادداشت:

.....

.....

.....

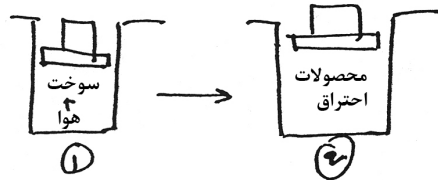
.....

## مبحث هشتم احتراق (متوسط کم ۴۰)

احتراق عبارت است از اکسیداسیون گونه‌های موجود در سوخت‌ها که منجر به رهاسازی انرژی شود.

تحلیل قانون اول فرآیندهای احتراقی

سیستم



$${}_1\phi_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1 =$$

$$= \sum_P \tilde{n}_p \bar{u}_p - \sum_R \tilde{n}_R \bar{u}_R$$

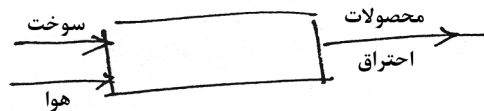
$$= \sum_P \tilde{n}_p (\bar{h} - p\bar{v})_p - \sum_R (\bar{h} - P\bar{v})_R n_R$$

$$\text{با فرض گاز ایده‌آل} = \sum_P \tilde{n}_p (\bar{h} - \bar{R}T)_p - \sum_R h_R (\bar{h} - \bar{R}T)_R$$

$$= \left[ \sum_P \tilde{n}_p \bar{h}_p - \sum_R \tilde{n}_R \bar{h}_R \right] - \bar{R} \left[ T_P \sum_P \tilde{n}_p - T_R \sum_R \tilde{n}_R \right]$$

$\tilde{n}_p$  و  $\tilde{n}_R$  تعداد مول‌های مواد اولیه و محصولات احتراق می‌باشند.

حجم کنترل SSSF



$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_P \dot{n}_p \bar{h}_p - \sum_R \dot{n}_R \bar{h}_R$$

معمولاً با تقسیم کردن برد بی مولی سوخت معادله بر صورت زیر در می‌آید (با فرض  $\dot{W} = 0$ )

$$\frac{\phi^\circ}{\dot{n}_{\text{Fuel}}} = \sum_P n_p \bar{h}_p - \sum_R n_R \bar{h}_R \equiv H_P - H_R$$

$n_R, n_p$  ضرایب استوکیومتری در معادله واکنش شیمیایی هستند.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

احتراق کامل با هوای نظری

احتراقی که در آن تمامی سوخت به طور کامل با هوا واکنش داده و محصولات آن CO<sub>2</sub> و H<sub>2</sub>O بوده و N<sub>2</sub> وارد واکنش نشود.

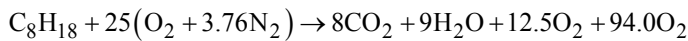
نسبت هوا به سوخت  $\overline{AF}$ , AF

$$\overline{AF} = \frac{\text{تعداد مول‌های هوا}}{\text{تعداد مول‌های سوخت}}$$

$$AF = \frac{\text{کیلوگرم هوا}}{\text{کیلوگرم سوخت}}$$

$$AF = \overline{AF} \times \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{Fuel}}}$$

مثال ۱: نسبت هوا به سوخت را در واکنش زیر بدست آورید:



حل:

$$\overline{AF} = \frac{25(1 + 3.76)}{1} = 119 \frac{\text{kmol Air}}{\text{kmol Fuel}}$$

$$AF = 119 \times \frac{29}{(12 \times 8 + 18)} = 30.3 \frac{\text{kg Air}}{\text{kg Fuel}}$$

مثال ۲: در صورتی که واکنش فوق در فشار look P<sub>a</sub> رخ داده باشد فشار جزئی CO<sub>2</sub> در محصولات واکنش حدوداً چه قدر است؟

حل:

$$P_{CO_2} = y_{CO_2} \times P$$

$$= \frac{8}{8 + 9 + 12.5 + 94} \times 100$$

$$P_{CO_2} = 6.48 \text{ kPa}$$

– هوای نظری

هوای لازم برای احتراق کامل در صورتی که در محصولات احتراق اکسیژن مازاد یا سوخت نسوخته وجود نداشته باشد.

– درصد هوای نظری

$$\text{درصد هوای نظری} = \frac{\text{نسبت هوا به سوخت واقعی}}{\text{نسبت هوا به سوخت نظری}} \times 100$$

$$\text{درصد هوای اضافی} = \text{درصد هوای نظری} - 100$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

– آنتالپی تشکیل  $\bar{h}_f^\circ$  در دما و فشار مرجع  
 $T_{ref} = 288\text{K}$   
 $R_{ref} = 100\text{kPa}$

عناصری که در دما و فشار مرجع پایدار باشند آنتالپی تشکیل صفر دارند.

مواد مرکب و عناصر ناپایدار در  $T_{ref}$  و  $P_{ref}$  بر اساس حرارت مورد نیاز برای تشکیل یک کیلومول از آنها با استفاده از عناصر پایدار سازنده آنها در دما و فشار مرجع – آنتالپی در دما و فشار دلخواه:

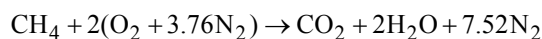
$$\bar{h}(T, P) = \bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h}$$

در صورت گاز ایده‌آل  $\Delta\bar{h} = \int_{T_{ref}}^T \bar{C}_{P_0} \Delta T$

### – ارزش حرارتی سوخت

مقدار حرارت آزاد شده در سوزاندن یک کیلوگرم از سوخت به طور کامل در  $P_{ref}, T_{ref}$

مثال ۳: ارزش حرارتی متان را به دست آورید.



حل: با توجه به اینکه در تعریف، احتراق در دما و فشار مرجع در نظر گرفته شده تمامی  $\Delta\bar{h}$  ها برابر با صفر بوده و بنابراین

$$\frac{Q}{n_{\text{Fuel}}} = \left| \bar{h}_{f, \text{CO}_2}^\circ + 2 \times \bar{h}_{f, \text{H}_2\text{O}}^\circ - \bar{h}_{f, \text{CH}_4}^\circ \right|$$

$$\text{HV} = \frac{1}{M_{\text{CH}_4}} \left| \bar{h}_{f, \text{CO}_2}^\circ + 2 \times \bar{h}_{f, \text{H}_2\text{O}}^\circ - \bar{h}_{f, \text{CH}_4}^\circ \right|$$

### ارزش حرارتی بالایی و پایینی

– ارزش حرارتی بالایی هنگامی است که آب در محصولات احتراق مایع باشد. (HHV)  
 ارزش حرارتی پایینی هنگامی است که آب در محصولات احتراق بخار باشد. (LHV)

$$(\text{HHV} - \text{LHV})_{\text{Fuel}} = n_{\text{H}_2\text{O}} \times h_{fg, 25^\circ\text{C}} \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{Fuel}}}$$

دمای آدیاباتیک شعله

دمای حاصله از احتراق در صورتی که احتراق به صورت آدیاباتیک صورت گیرد.  
 دمای آدیاباتیک شعله از اعمال قانون اول با شرط  $Q = 0$  قابل تعیین است.

### – تأثیر هوای اضافی در احتراق کامل

- افزایش تعداد مول‌ها در محصولات احتراق
- کاهش فشار جزیی تک تک محصولات واکنش
- کاهش دمای شبنم در محصولات احتراق
- کاهش دمای واکنش

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

مثال ۴: در فرآیند احتراق کامل اتان در شرایط SSSF و در دما و فشار مرجع با اضافه کردن هوا حرارت آزاد شده برای یک کیلوگرم سوخت به سمت:

الف) HHV میل می‌کند      ب) LHV میل می‌کند      ج) تغییری نمی‌کند      د) نمی‌توان اظهار نظر کرد

حل:

با توجه به اینکه دمای شبنم کاهش می‌یابد احتمال وجود بخار در محصولات واکنش بیشتر شده و بنابراین حرارت به LHV میل می‌کند پس گزینه (ب) صحیح است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

## مبحث نهم جریان تراکم‌پذیر (کم ۳۰)

جریان تراکم‌پذیر جریانی است که در آن به دلیل تغییرات قابل ملاحظه فشار نتوان چگالی را ثابت فرض کرد.

• معیار برای تراکم‌پذیر بودن جریان عدد ماخ مشخصه جریان است. (M)

$$M \equiv \frac{V}{C}$$

در رابطه فوق V سرعت مشخصه جریان و C سرعت صوت مشخصه جریان است.

- جریان تراکم‌پذیر  $M > 0.3$

سرعت صوت یک خاصیت ترمودینامیکی سیال است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

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

- برای گازهای کامل

$$C = \sqrt{kRT}$$

### جریان مادون صوت و مافوق صوت

-  $M < 1$  مادون صوت

-  $M > 1$  مافوق صوت

-  $M \sim 1$  گذر صوت

- تفاوت فیزیکی مشخص بین جریان مافوق صوت و مادون صوت این است که در جریان مادون صوت هرگونه تغییرات فشاری در پائین

دست جریان روی بالادست اثر گذار است در حالیکه در جریان مافوق صوت این‌طور نیست. (همین‌طور جریان صوتی)

- **خواص سکون:** در هر نقطه از میدان جریان خواص سکون قابل تعریف هستند.

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_{p0}} \quad \text{دمای سکون:}$$

$$T_0 = T \left[ 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right]$$

$$P_0 = P \left[ 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{فشار سکون:}$$

• برای جریان آدیاباتیک دمای سکون در تمامی نقاط یکسان است.

- برای جریان آدیاباتیک و برگشت‌پذیر (ایزونتروپیک) فشار سکون نیز در تمامی نقاط جریان یکسان است.

**یادداشت:**

.....

.....

.....

.....

مثال ۱: هوای دمای 300k و فشار 100kPa محیط اطراف یک کمپرسور را تشکیل می‌دهد در ورودی کمپرسور هوا به سرعت

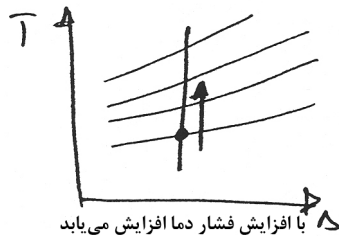
100  $\frac{m}{sec}$  می‌رسد. اگر  $C_{p0} = 1.5 \frac{kJ}{kgk}$  فرض شود درجه حرارت استاتیک هوا در ورود به کمپرسور چند کلوین است؟

حل:

$$T = T_0 - \frac{v^2}{2c_{p0}} = 300 - \frac{100^2}{2 \times 1.5 \times 1000} \quad T = 296.7K$$

### جریان ایزنتروپیک

- جریان همراه با تغییر سطح مقطع بدون انتقال حرارت و اصطکاک.
- در این جریان تغییرات دما و فشار طبق روابط ایزنتروپیک همسو هستند.



- نحوه تغییرات سرعت و فشار با سطح مقطع به شرح زیر است

-  $M < 1$ , سرعت با مساحت ناهمسو

فشار با مساحت همسو

-  $M > 1$ , سرعت با مساحت همسو

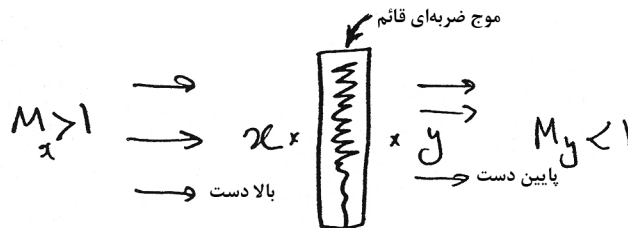
فشار با مساحت ناهمسو

- در جریان ایزنتروپیک دما و فشار سکون در تمامی نقاط جریان یکی است.

- در جریان ایزنتروپیک  $M = 1$  فقط در گلوگاه رخ می‌دهد.

- دقت شود که عبارت فوق به این معنی نیست که هر جا گلوگاه داشته باشیم در آنجا عدد ماخ ۱ است.

### جریان همراه با شوک قائم



یادداشت:

.....

.....

.....

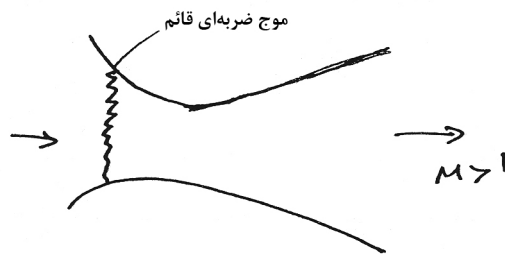
.....



• در موج ضربه‌ای قائم:

۱.  $T_{0,x} = T_{0,y}$
۲.  $M_x > 1$
- $M_y < 1$
۳.  $T_x < T_y$
۴.  $P_x < P_y$
۵.  $\rho_x < \rho_y$
۶.  $P_{0,y} > P_{0,x}$

مثال ۲:



- جریان در شکل مقابل در یک مجرای همگرا و واگرا را در نظر بگیرید. با توجه به اطلاعات روی شکل عدد ماخ در گلوگاه
- |                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| الف) حتماً یک است   | ج) کوچکتر از یک است       |
| ب) بزرگتر از یک است | د) بسته به ماخ ورودی دارد |

حل: گزینه الف صحیح است.

با توجه به اینکه موج ضربه‌ای قائم در قسمت همگرا رخ داده است بالا دست موج مافوق صوت و پایین دست آن مادون صوت است چون در خروجی شیبپوره عدد ماخ بزرگتر از یک است، گذر از مادون صوت به مافوق صوت رخ داده که باید در گلوگاه رخ دهد.

یادداشت:

.....

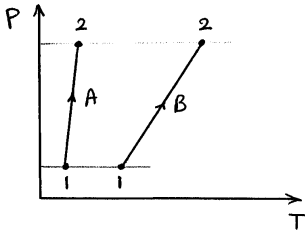
.....

.....

.....

تست‌ها

۱ - دو تانک در بسته حاوی گازهای یکسان دو فرآیند A و B را طی می‌کنند، کدام گزینه صحیح است؟



(۱) جرم تانک A بیشتر از تانک B است.

(۲) جرم تانک B بیشتر از تانک A است.

(۳) در صورت برابر بودن میزان انتقال حرارت جرم A بیشتر از جرم B است.

(۴) در صورت برابر بودن جرم میزان انتقال حرارت A بیشتر از B است.

حل: گزینه ۱ درست است.

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

با توجه به اینکه از معادله گاز ایده‌ال داریم

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{mR}{V}$$

در نتیجه:

بنابراین جرم بیشتر باعث شیب بیشتری برای مسیر در نمودار P-T شده و گزینه ۱ درست است.

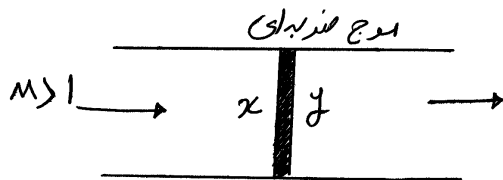
۲ - در یک جریان تراکم‌پذیر، در اثر وقوع موج ضربه‌ای قائم .....  
 (۱) فشار، عدد ماخ و انتروپی افزایش می‌یابد.

(۲) فشار و انتروپی افزایش، ولی عدد ماخ کاهش می‌یابد.

(۳) فشار و عدد ماخ افزایش، ولی انتروپی ثابت می‌ماند.

(۴) فشار و عدد ماخ افزایش، ولی انتروپی کاهش می‌یابد.

حل: گزینه ۲ درست است.



در عرض موج ضربه‌ای قائم فشار و انتروپی افزایش می‌یابد (موج ضربه‌ای پدیده‌ای آدیاباتیک و برگشت‌ناپذیر است) ولی عدد ماخ کاهش می‌یابد.

۳ - فلزی به جرم m کیلوگرم و با گرمای ویژه Cp در دمای T0 و فشار ثابت در مجاورت یک چشمه گرمایی به دمای T1 قرار می‌دهیم.

پس از گذشت زمان معینی، فلز با چشمه گرمایی به حالت تعادل دمایی در می‌آید. تغییر انتروپی کل برابر است با:

$$(\Delta s)_s = mC_p \left( \ln \frac{T_1}{T_0} - \frac{T_1 - T_0}{T_1} \right) \quad (۲)$$

$$(\Delta s)_s = mC_p \left( \ln \frac{T_1}{T_0} + \frac{T_1 - T_0}{T_1} \right) \quad (۱)$$

$$(\Delta s)_s = mC_p \left( \ln \frac{T_0}{T_1} - \frac{T_1 - T_0}{T_1} \right) \quad (۴)$$

$$(\Delta s)_s = mC_p \ln \left( \frac{T_1}{T_0} \right) \quad (۳)$$

حل: گزینه ۱ درست است.

$$\Delta S_{net} = \Delta S_{system} + \Delta S_{منبع}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

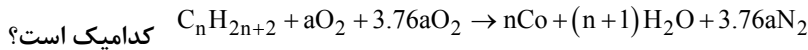
.....

سیستم را جرم فلزی در نظر می‌گیریم:

$$\Delta S_{\text{sys}} = mc \ln \frac{T_1}{T_0}$$

$$\Delta S_{\text{منبع}} = \frac{-Q_{\text{sys}}}{T_1} = \frac{-\Delta U_{\text{sys}}}{T_1} = \frac{-mc(T_0 - T_1)}{T_1} \Rightarrow \Delta S_{\text{net}} = mc \left[ \ln \frac{T_1}{T_0} + 1 - \frac{T_0}{T_1} \right]$$

۴ - نسبت هوا به سوخت مولی را در واکنش:



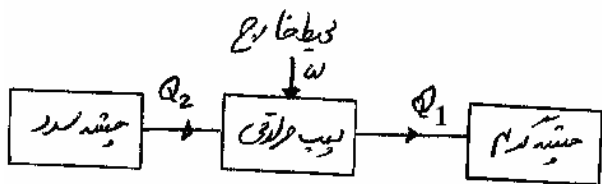
$$3.76(a+1) \quad (۲) \qquad 3.76 \quad (۱)$$

$$1.88(2n+1) \quad (۴) \qquad (2n+2)3.76 \quad (۳)$$

$$\hat{A}F = \frac{3.76(a+1)}{1}$$

بنابراین گزینه ۲ درست است.

۵ - یک پمپ حرارتی مطابق شکل به دو چشمه مرتبط است که چشمه گرم شامل آب به دمای  $T_1$  و چشمه سرد شامل هوا به دمای  $T_2$  است. پمپ حرارتی  $W$  کار می‌گیرد و آب گرم می‌شود و به دمای  $T_1'$  می‌رسد. ضریب موثر پمپ برابر است با:



$$e = \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_1'} \ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (۲)$$

$$e = \frac{1}{1 - \frac{T_1}{T_1'} \ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (۱)$$

$$e = \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_1'} \ln \frac{T_1'}{T_1}} \quad (۴)$$

$$e = \frac{1}{1 - \frac{T_2 - T_1}{T_1'} \ln \frac{T_1'}{T_1}} \quad (۳)$$

حل: گزینه ۳ درست است.

$$B' = \frac{Q_1}{W}$$

طبق تعریف:

$$Q_1 = \Delta U = mc(T_1' - T_1)$$

قانون اول برای جسم گرم:

$$W = Q_1 - Q_2$$

قانون اول برای پمپ حرارتی:

قانون دوم ترمو (موازنه انتروپی) با فرض برگشت‌پذیر بودن پمپ حرارتی:

$$\Delta S_{\text{net}} = \Delta S_{\text{سرد}} + \Delta S_{\text{گرم}} + \Delta S_{\text{پمپ}} = 0$$

$$= \frac{-Q_2}{T_2} + mc \ln \frac{T_1'}{T_1} = 0 \Rightarrow Q_2 = T_2 mc \ln \frac{T_1'}{T_1}$$

یادداشت:

.....

.....

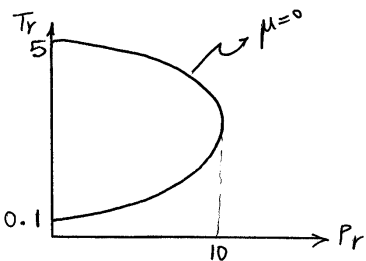
.....

.....

بنابراین:

$$B' = \frac{mC(T_1' - T_1)}{mC(T_1' - T_1) - mCT_2 \ln \frac{T_1'}{T_1}}$$

۶- یک گاز واقعی در دمای  $T_r = 2$  و  $P_r = 1$  از یک لوله فشارشکن عبور می‌کند با توجه به نمودار داده شده دمای خروجی چگونه خواهد بود؟



- (۱) بیشتر می‌شود
- (۲) کمتر می‌شود
- (۳) تغییری نمی‌کند
- (۴) با این معلومات نمی‌توان نظر داد.

حل: گزینه ۲ درست است.

حالت ترمودینامیکی مورد نظر در ناحیه داخل منحنی گنبدی شکل قرار گرفته که در آنجا  $\mu_J > 0$  است. بنابراین در اثر فرآیند اختناق دما کاهش می‌یابد.

۷- یک سیکل گاز ایده‌آل شامل تحولات:

الف) تراکم همدمای در درجه حرارت 300 K

ب) افزایش گرما از 300 K به 600 K در فشار ثابت

ج) انبساط آدیاباتیک برگشت پذیر به درجه حرارت 300 K ، می‌باشد.

راندمان حرارتی این سیکل کدام است؟ ( $\ln 2 = 0.7$ )

- (۱) 30%
- (۲) 60%
- (۳) 40%
- (۴) 20%

حل: گزینه ۱ درست است.

فرآیندهای سیکل مطابق شکل روبرو است:

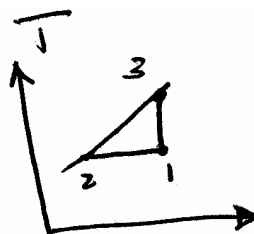
$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H}$$

طبق تعریف:

$$q_L = \int T ds \quad \text{ضمناً فرآیند ۲ فشار ثابت است پس طبق قانون اول } q_H = C_p \Delta T = C_p(T_2 - T_1)$$

همچنین برای فرآیند ۲ داریم:

$$\Delta s = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$



یادداشت:

.....

.....

.....

.....

.....

بنابراین:

$$= 1 - \frac{T_1 C_p \ln \frac{T_2}{T_1}}{C_p (T_2 - T_1)}$$

$$= 1 - \frac{300 * 0.7}{300} = \frac{90}{300} = \frac{3}{10} = 30\%$$

۸ - با توجه به جریان در یک شیبوره همگرا کدام گزینه نادرست است؟

۱) فشار در صفحه خروجی شیبوره همواره با کاهش پس فشار (فشار در انتها و خارج شیبوره)، کاهش می‌یابد.

۲) دبی جرمی زمانی ماکزیمم است که فشار در صفحه خروجی برابر فشار بحرانی باشد.

۳) پدیده خفگی زمانی اتفاق می‌افتد که فشار در صفحه خروجی برابر فشار بحرانی باشد.

۴) گزینه ۱ و ۲

حل: گزینه ۱ درست است.

گزینه های ۲ و ۳ جملات درستی می‌باشند. عبارت گزینه ۱ نادرست است چرا که در هنگام خفگی جریان کاهش فشار پشت (پس فشار) در فشار صفحه خروجی اثری ندارد.

۹ - نمودار سیکل توربین گازی با بازیاب ایده‌آل به صورت شکل زیر است. کار توربین 400 کیلو ژول و دمای ورودی و خروجی

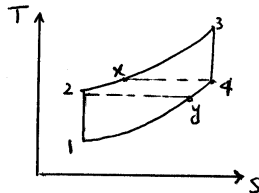
کمپرسور به ترتیب 300k, 460k می‌باشد. راندمان حرارتی سیکل عبارت است از: ( $C_p = 1 \frac{kJ}{kgk}$  هوا)

۱) ۴۰ درصد

۲) ۶۰ درصد

۳) ۳۷ درصد

۴) اطلاعات داده شده برای محاسبه راندمان کافی نیست.



حل: گزینه ۲ درست است.

بازیاب ایده‌آل است پس  $T_4 = T_x$ . قانون اول برای محفظه‌ی احتراق می‌دهد:  $q_H = h_3 - h_x = C_p (T_3 - T_x) = C_p (T_3 - T_x)$

بنابراین  $W_t = q_H$

از طرفی برای کمپرسور از قانون اول داریم:  $W_c = C_{p0} (T_2 - T_1)$

بنابراین

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_H} = \frac{400 - C_p (400 - 300)}{400}$$

$$\eta_{th} = \frac{400 - 160}{400} = \frac{240}{400} = \frac{60}{100} = 0.6$$

یادداشت:

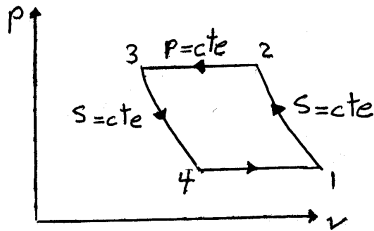
.....

.....

.....

.....

۱۰- در سیکل تبرید نشان داده شده ضریب عملکرد بر حسب نسبت تراکم کدام است؟



$$\beta = \frac{1}{\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1} \quad (2) \quad \beta = \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \quad (4) \quad \beta = \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \quad (3)$$

حل: گزینه ۳ درست است.

سیکل تبرید نشان داده شده در شکل عکس سیکل برایتون است.

راندمان حرارتی سیکل برایتون:

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

بنابراین

$$\frac{q_L}{q_H} = r_p^{\frac{1-k}{k}} \Rightarrow \frac{q_H}{q_L} = r_p^{\frac{k-1}{k}}$$

از طرف دیگر

$$\beta = \frac{1}{\frac{q_H}{q_L} - 1} \Rightarrow \beta = \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

۱۱- 2 kg از یک مایع اشباع در دمای 85°C در یک ظرف تحت فشار ثابت حرارت داده می‌شود. اگر 1400 kJ حرارت به مایع داده

شود کیفیت مخلوط حاصل 35٪ می‌شود. گرمای نهان تبخیر مایع در ظرف بر حسب  $\frac{kJ}{kg}$  برابر است با:

3000 (۴)

2000 (۳)

2500 (۲)

1500 (۱)

حل: گزینه ۳ درست است.

قانون اول در فرآیند فشار ثابت (سیستم)

$$q = m\Delta h = m[(h_f + xh_{fg}) - h_f] = mxh_{fg}$$

$$h_{fg} = \frac{q}{mx} = \frac{1400}{2 \times 0.35} = \frac{1400}{0.7} \times 10 = 2000 \frac{kJ}{kg}$$

یادداشت:

.....

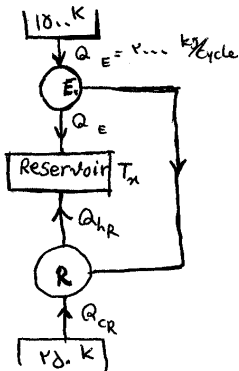
.....

.....

.....

۱۲ - یک موتور حرارتی برگشت پذیر که بر اساس سیکل کارنو کار می کند از منبع به دمای 1500 K گرمای  $Q_E = 2000 \text{ kJ}$  را دریافت می کند. کار خروجی این موتور صرف حرکت یک یخچال کارنو می شود که گرمای  $Q_{CR}$  را از منبعی به دمای 250 K می گیرد. اگر کل گرمای ورودی به منبع مشترک 2500 kJ باشد، دمای این منبع سرد  $T_x$  چقدر است؟

- 500 K (۱)
- 750 K (۲)
- 1000 K (۳)
- 1250 K (۴)



حل: گزینه ۲ درست است.

موتور حرارتی و یخچال کارنو هر دو برگشت پذیرند.

بنابراین:

$$\frac{Q_{L,E}}{Q_E} = \frac{T_x}{T_H} \Rightarrow \frac{Q_{L,E}}{2000} = \frac{T_x}{1500}$$

ضمناً:

$$\frac{Q_{HR}}{Q_{CR}} = \frac{T_x}{250}$$

از طرفی

$$W_R = W_E \Rightarrow Q_E - Q_{LE} = Q_{HR} - Q_{CR}$$

$$2000 - Q_{LE} = (2500 - Q_{LE}) - Q_{CR}$$

$$Q_{CR} = 500 \text{ kJ}$$

$$\Rightarrow Q_{HR} = T_x \times \frac{500}{250} = 2T_x$$

$$Q_{LE} = T_x \times \frac{2000}{1500} = \frac{4}{3}T_x$$

همچنین

$$Q_{HR} + Q_{LE} = 2500$$

$$\Rightarrow 2500 = T_x \left( 2 + \frac{4}{3} \right) = \frac{10}{3}T_x \Rightarrow T_x = 750 \text{ K}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....

۱۳ - افت فشار یک جریان آب در داخل یک لوله کاملاً عایق باعث کدام یک از تغییرات زیر می شود؟

- (۱) افزایش آنتالپی آب (۲) افزایش دمای آب (۳) کاهش دمای آب (۴) کاهش آنتالپی آب

حل: گزینه ۲ درست است.

طبق قانون اول:

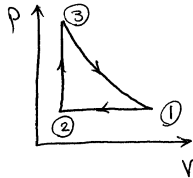
$$h_2 = h_1 \Rightarrow u_2 + p_2 v_2 = u_1 + p_1 v_1$$

چون  $v$  ثابت است:

$$u_2 - u_1 = v(p_1 - p_2) > 0$$

بنابراین دما افزایش پیدا می کند.

۱۴ - در شکل زیر یک فرآیند سیکلی نشان داده شده است که به طور برگشت پذیر توسط مقدار معینی گاز انجام می شود:



فرآیند (۱-۲): تراکم در فشار ثابت که طی آن 25J گرما از سیستم خارج و 50J کار به آن می دهیم.

فرآیند (۲-۳): گرم کردن در حجم ثابت که طی آن 75J گرما جذب سیستم می شود.

فرآیند (۳-۱): انبساط آدیاباتیکی

مقدار کار بر حسب ژول طی فرآیند (۳-۱) چقدر است؟

(۱) 100 (۲) 75

(۳) 50 (۴) با این معلومات نمی توان گفت.

حل: گزینه ۱ درست است.

$$W_{net} = Q_{net}$$

$${}_1W_2 + {}_2W_3 + {}_3W_1 = {}_1Q_2 + {}_2Q_3 + {}_3Q_1 \Rightarrow -50 + 0 + {}_3W_1 = -25 + 75 + 0$$

طبق قانون اول:

$${}_3W_1 = 100J$$

۱۵ - اگر بخواهیم گاز ایده آلی را از فشار  $P_1$  به فشار  $P_2$  به شکل SSSF متراکم کنیم، برای مینیمم کردن کار لازم بهتر است

کمپرسور در چه فرایندی کار کند؟

(۱) فرایند با توان پلی تروپیک خیلی بزرگ

(۲) میزان کار کمپرسور مستقل از توان پلی تروپیک فرایند است.

(۳) فرایند با توان پلی تروپیک برابر یک

$$(۴) \text{ فرایند با توان پلی تروپیک برابر } \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

یادداشت:

.....

.....

.....

.....



حل: گزینه ۴ درست است.

با توجه به اینکه در شرایط SSSF کار با رابطه داده شده است، با توجه به مسیر فرآیند در نمودار  $P-v$  هر چه شیب مسیر طی شده کمتر باشد کار کمتر خواهد بود بنابراین اگر مسیر با رابطه  $PV^n$  داده شده باشد  $n$  کمتر کار کمتری را نتیجه می‌دهد. بهترین گزینه برابر این گزینه ۴ است.

۱۶ - در یک گاز ایده‌آل مقدار  $\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s$  برابر است با:

$$\frac{v}{C_{p0}} \quad (۱) \qquad -\frac{P}{C_{p0}} \quad (۳) \qquad -\frac{P}{C_{v0}} \quad (۴) \qquad \frac{v}{C_{v0}} \quad (۲)$$

حل: گزینه ۳ درست است.

$$Tds = du + Pdv$$

در  $s = C$  برای گاز کامل  $(du = c_{v0} dT)$  داریم:

$$0 = c_{v0} dT + Pdv \Rightarrow \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s = -\frac{P}{c_{v0}}$$

۱۷ - گرما از یک منبع حرارتی به دمای ۱۰۰۰ K به طور مستقیم به یک منبع حرارتی سرد به دمای ۴۰۰ K انتقال می‌یابد. اگر مقدار انتقال حرارت ۱۰۰ kJ باشد تغییر آنتروپی کل در اثر این انتقال حرارت چقدر است؟

$$0.1 \frac{kJ}{K} \quad (۱) \qquad 0.15 \frac{kJ}{K} \quad (۲) \qquad 0.2 \frac{kJ}{K} \quad (۳) \qquad 0.35 \frac{kJ}{K} \quad (۴)$$

حل: گزینه ۲ درست است.

$$\begin{aligned} \Delta S_{net} &= \Delta S_H + \Delta S_L \qquad Q_H = Q_L = 100 \text{ kJ} \\ &= -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 100 \left( \frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right) \\ &= 100 \left( \frac{1}{400} - \frac{1}{1000} \right) \\ &= \frac{100 \times 600}{400000} = 0.15 \frac{kJ}{K} \end{aligned}$$

۱۸ - کدام عبارت همواره صحیح است؟

- (۱) در تحول برگشت پذیر کار انبساط مینیمم است.
- (۲) کار انبساط یک جریان دائم گاز در تحول ایزوترمال کمتر از تحول برگشت پذیر آدیاباتیکی است.
- (۳) در تحول برگشت ناپذیر کار تراکم یک گاز مینیمم است.
- (۴) کار تراکم یک جریان دائم در تحول ایزوترمال کمتر از تحول برگشت پذیر آدیاباتیکی است.

پیلداشت:

.....

.....

.....

.....

حل: گزینه ۲ درست است.

کار در شرایط SSSF در یک کمپرسور هم دما کمتر از کمپرسور آدیاباتیک است. پس گزینه ۲ درست است.

۱۹ - هوا در  $25^\circ\text{C}$  و فشار  $100\text{ kPa}$  از روی یک صفحه مسطح به صورت آرام در جریان است. دمای صفحه ثابت است و عدد ناسلت

موضعی از رابطه  $Nu_x = a Re_x^{0.5} Pr^n$  به دست می آید. اگر  $x$  یک فاصله دلخواه از لبه صفحه باشد، حاصل  $\frac{h_x}{h_{2x}}$  برابر است با .....

$\frac{1}{2}$  (۱)                      ۲ (۲)                       $\frac{1}{\sqrt{2}}$  (۳)                       $\sqrt{2}$  (۴)

حل: گزینه ۴ درست است.

در واکنش با هوا بدلیل وجود نیتروژن فشار جزئی آب پائین تر است پس هم دمای نقطه شبنم و هم دمای شعله آدیاباتیک کاهش می یابد.

۲۰ - دمای منبع گرم یک سیکل ایده آل رانکین  $800\text{ K}$  است. منبع سرد سیکل محیط بیرون است که در دمای  $300\text{ K}$  قرار دارد. اگر

بازده سیکل  $30\%$  و قدرت تولیدی آن  $150\text{ MW}$  باشد، نرخ تولید بازگشت ناپذیری در سیکل چقدر است؟

$125.5\text{ MW}$  (۱)                       $150.5\text{ MW}$  (۲)                       $162.5\text{ MW}$  (۳)                       $200\text{ MW}$  (۴)

حل: گزینه ۳ درست است.

با توجه به شکل

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{W}_{net}}{0.3} = \frac{150}{0.3} = 500\text{ MW}$$

$$\Rightarrow \dot{Q}_L = 350\text{ MW}$$

$$\dot{I} = T_0 \dot{S}_{net}$$

$$\dot{I} = 300 \left[ \left( \frac{dS}{dt} \right)_H + \left( \frac{dS}{dt} \right)_L \right]$$

$$= 300 \left[ -\frac{\dot{Q}_H}{T_H} + \frac{\dot{Q}_L}{T_L} \right]$$

$$= 300 \left[ -\frac{500}{800} + \frac{350}{300} \right]$$

$$= 162.5\text{ MW}$$

گزینه ۳ درست است.

یادداشت:

.....

.....

.....

.....