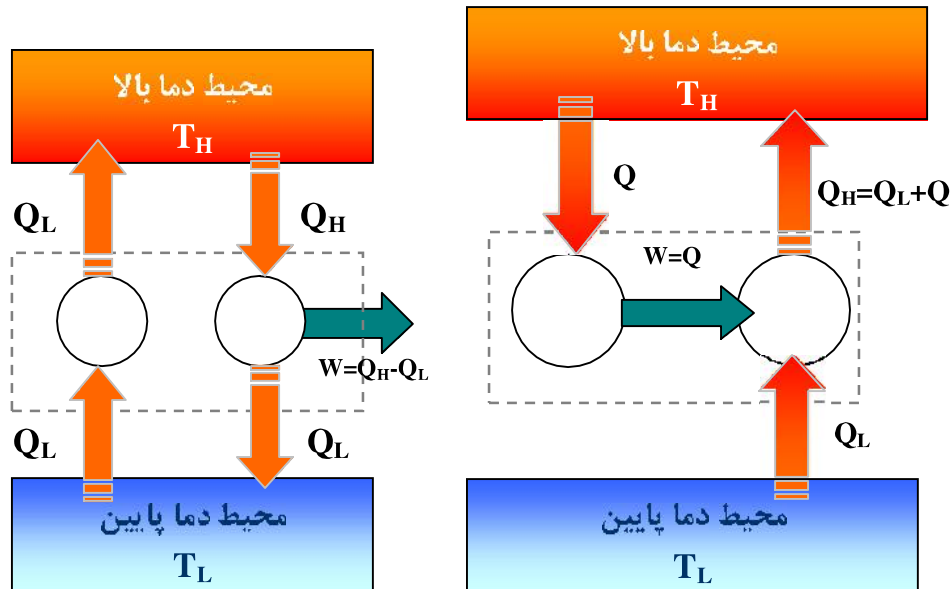


**بیان کلوین پلانک:** غیرممکن است که بتوان دستگاهی ساخت که در یک سیکل کار کند، از یک یا چند منبع حرارتی گرما گرفته و همه این گرما را به کار تبدیل کند بلکه یکدستگاه ممکن دستگاهی است که بخشی از گرمای گرفته از منبع گرم را به منبع حرارتی سرد پس می دهد بعبارت دیگر سیکل نیروگاه بخار بدون کندانسور غیرممکن است و یا بزده حرارتی  $100\%$  غیرممکن است.

### اثبات معادل بودن بیان کلاسیوس و کلوین پلانک

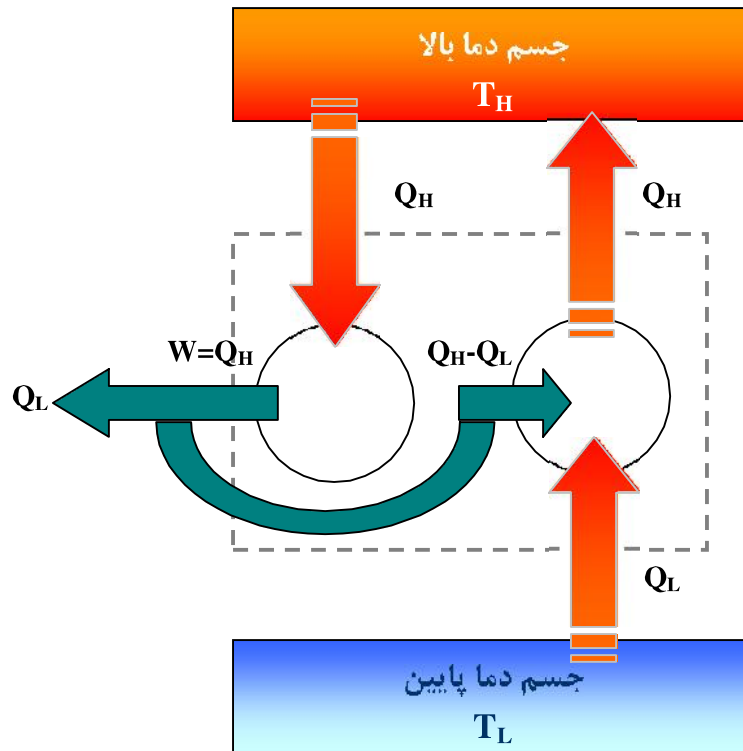
دو بیان کلوین پلانک و کلاسیوس در واقع هر دو بیان یک قانون واحد (قانون دوم ترمودینامیک) می باشند، با توجه به شکل (۵-۶) اگر موتوری وجود داشته باشد که بتواند بدون تسادل با منبع دما پایین کار تولید نماید می توان با استفاده از کار تولید شده یک بخچال را به کار انداخت که مقدار کار خود را تنها از طریق همین موتور تامین کند با در نظر گرفتن کل سیستم ما در واقع یک پمپ حرارتی خواهیم داشت که بدون گرفتن کار از بیرون می تواند گرما را از منبع دما پایین به منبع دما بالا منتقل نماید که البته مطابق با بیان کلوین پلانک غیر ممکن است.

حال در نظر بگیرد پمپ حرارتی موجود باشد که بتواند بدون دریافت کار گرما را از منبع دما پایین گرفته و به منبع دما بالا تحویل دهد، با در نظر گرفتن موتوری که در حین انجام کار با دریافت مقدار انرژی  $Q_H$  مقدار کار تولید نماید و به اندازه مقدار گرمای منتقل شده توسط پمپ حرارتی توصیف شده گرما به منبع دما پایین تحویل دهد با در نظر گرفتن مجموع دو سیستم موتور و پمپ ماشینی خواهیم داشت که بدون مبادله انرژی با منبع دما پایین کار تولید می نماید.



شکل ۵-۶. بیان معادل بودن کلاسیوس با کلوین پلانک

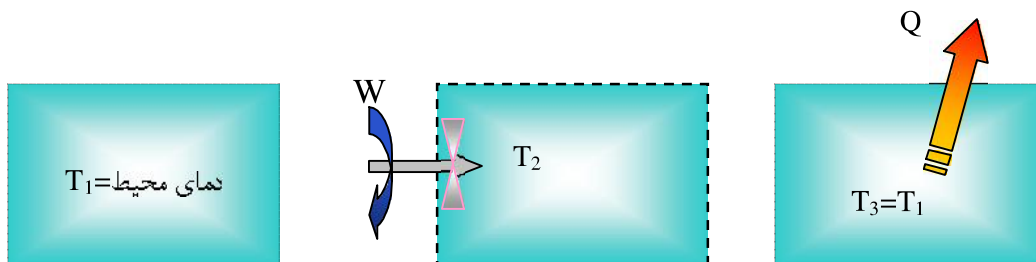
در شکل ۵-۶ (سمت راست) مجموع دو ماشین بدون دریافت کار به اندازه  $Q_L$  حرارت از منبع سرد به منبع گرم انتقال می دهد که همان نقض قانون کلاسیوس می باشد. در مورد شکل سمت چپ مجموع دو ماشین  $Q_H - Q_L$  گرما را به کار تبدیل می نماید و این غیر ممکن است.



شکل ۵-۷. ماشین حرکت دائمی نوع دوم

### ماشین حرکت دائمی نوع دوم (Perpetual Motion Machine of the Second Kind)

مطابق شکل (۵ ۷) یک ماشین ترکیبی به مقدار  $Q_L$  حرارت از اتمسفر گرفته و به کار تبدیل می‌نماید و می‌تواند تا به نهایت حرکت کند. در واقع با نقض قانون دوم به بین کلونین پلانک منجر به ساخت ماشینی شده‌ایم که می‌تواند انرژی مجانی اتمسفر را گرفته و تا ابد کار نماید. لازم به ذکر است که ماشین حرکت دائمی نوع اول ماشینی است که بدون مصرف انرژی کار تولید می‌کند و در واقع قانون اول را نقض می‌کند.



شکل ۵-۸. مخزنی که از سیالی پر شده در تعادل با محیط قرار دارد (سمت چپ)، با انجام کار بر روی حجم کنترلی که در این مرحله عایق شده دمای سیستم افزایش می‌یابد (وسط)، در نهایت با برداشتن عایق گرما از سیستم به محیط منتقل شده و سیستم با محیط به تعادل حرارتی می‌رسد.

### خلاصه مطالب فوق

۱. سیستمی که یک سیکل را طی می‌کند و کار تولید می‌کند حتماً با دو منبع حرارتی سرد و گرم در تبادل حرارتی قرار دارد.

۲. سیستمی که یک سیکل را طی می کند و فقط بایک منبع حرارتی گرما مبادله کند حتماً کار صفر یا منفی دارد. کار صفر یعنی غیر ممکن است مانند مستقیم حرکت دائمی نوع دوم و کار منفی مانند حالت زیر (به شکل ۵-۸) توجه کنید:

$$Q_{2-3} = u_3 - u_1 + W_{1-2} \quad (10-5)$$

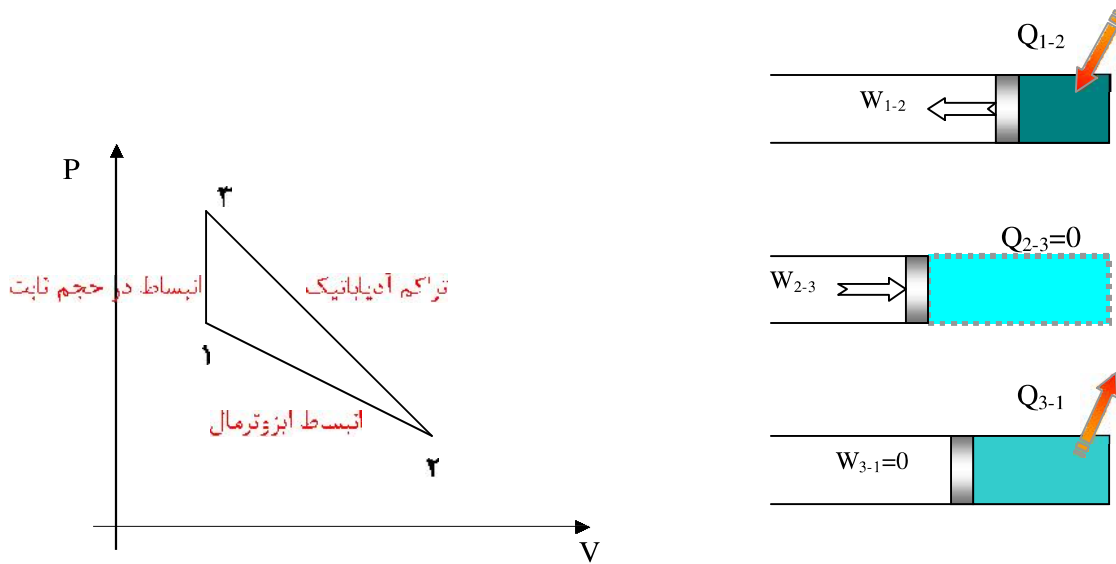
$$T_3 = T_1 \rightarrow u_3 = u_1$$

$$Q_{2-3} = W_{1-2}$$

همه کار بیروانه به گرما تبدیل شده و کار منفی است.

۳. کار نسبت به گرما انرژی با ارزش تری است چون می توان همه کار را به گرما تبدیل کرد در حالیکه برعکس آن غیر ممکن است.

یک مثال دیگر: فرض می کنیم گاز کُملی داریم که مطابق شکل ۵-۹ یک سیکل را طی می کند.



شکل ۵-۹. مثال

برای فرآیند ایزوترمال خواهیم داشت:

$$Pv = const. \quad (11-5)$$

$$Pdv + v dP = 0 \quad (12-5)$$

$$\frac{dP}{dv} = -\frac{P}{v} \quad (13-5)$$

برای فرآیند آدیاباتیك خواهیم داشت:

$$Pv^k = c \rightarrow v^k dP + (k-1)Pv^{k-1} dv = 0 \quad (14-5)$$

$$\frac{dP}{dv} = -\frac{kv^{k-1}P}{v^k} = -k\frac{P}{v} \quad (15-5)$$

برای هوا مقدار

$$k = 1.4$$

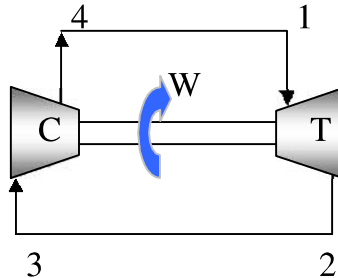
پس شیب فرآیند آدیباتیک بزرگتر است یا از نظر فیزیکی چون کار بطور آدیباتیک انجام می شود پس  $T_3$  باید از  $T_1$  بزرگتر باشد:

ملاحظه می شود که برای طی یک سیکل کار خالص داده ایم  $W_{1-2} > W_{2-3}$  و گرما نیز از دمای  $T_1 = T_2$  گرفته و به منبع حرارتی در دمای بین  $T_1, T_3$  داده ایم:

$$W_{3-1} = 0 \text{ و } Q_{3-1} < 0 \quad (5-16)$$

نکته: در فرآیند 1-2 همه گرما را به کار تبدیل کرده ایم چون  $u_1 = u_2$ . این در تناقض بیان کلون-پلانک نیست چون همه گرما در یک فرآیند و نه در یک سیکل به کار تبدیل شده است.

فرآیند برگشت پذیر: فرآیندی است که اگر انجام شود می توان سیستم و محیط را به حالت اولیه برگرداند مثلاً اگر سیستم در فرآیند رفت به محیط کار داده و گرما بگیرد می توان سیستم را به وضع اول برگرداند و در مسر برگشت کار داده شده را از محیط گرفته و گرما گرفته شده از محیط را به آن پس داد.

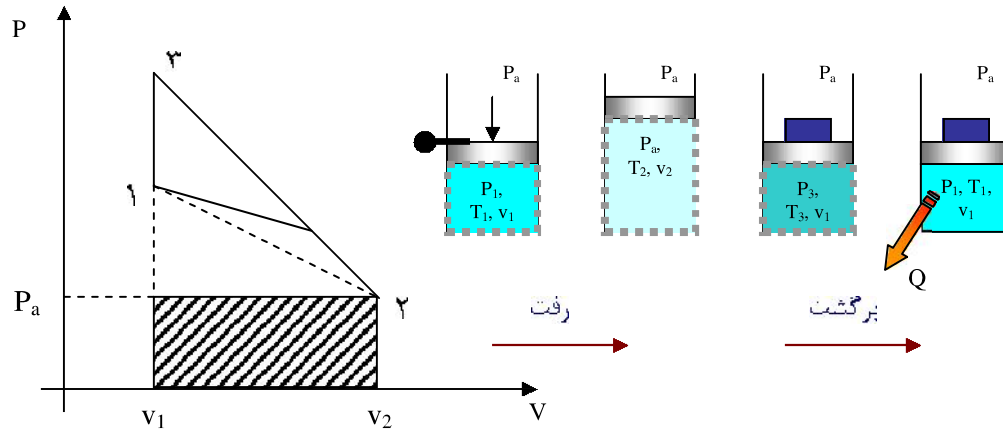


شکل ۵-۱۰. مثال

مثال ۱:

حالت ۱ در توربین به ۲ تبدیل شده و کار تولید می کند. حالت ۳ مانند ۲ است اگر نتوانیم با مصرف کار توربین حالت ۳ را در کمپرسور به حالت ۴ درآوریم و ۴ مانند ۱ باشد آنگاه سیستم به وضع اول برگشته و محیط نیز به حالت اول برمی گردد. چون کار توربین به محیط داده می شود و از محیط به اندازه کار توربین صرف کار کمپرسور خواهد شد. در واقعیت به علت اصطکاک داخلی توربین و کمپرسور کار مورد نیاز کمپرسور بیش از توربین خواهد بود و لذا باید مقداری از محیط کار گرفت تا فرآیند فوق امکان پذیر باشد. فرآیند برگشت پذیر فرآیندی است ایده ال که حد فرآیندهای واقعی در طبیعت می باشد لذا ابتدا فرآیندهای برگشت ناپذیر را مثال رده و آنگاه حد این فرآیند را بصورت فرآیند برگشت پذیر تعریف می کنیم.

مثال ۲. فرآیند ائیساط غیر نعدلی از فشار  $P_1$  تا فشار  $P_a$ .



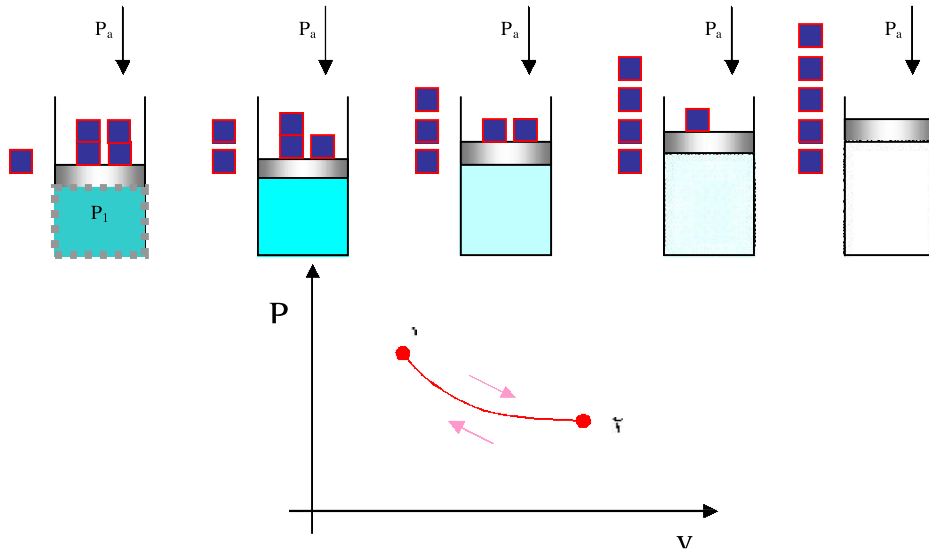
شکل ۵-۱۱. مثال

$$W_{1-2} < W_{3-2}, W_{3-1} = 0 \Rightarrow \oint \delta W < 0 \quad (17-5)$$

$$Q_{1-2}, Q_{2-3} = 0, Q_{3-1} < 0 \Rightarrow \oint \delta Q < 0 \quad (18-5)$$

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (19-5)$$

پس  $Q$  حرارت به محیط داده و  $W$  کار از محیط گرفته ایم برای آنکه محیط به وضع اول برگردد باید همه گرمای داده شده را به کار تبدیل کنیم که غیر ممکن است.



شکل ۵-۱۲. اتساع برگشت ناپذیر

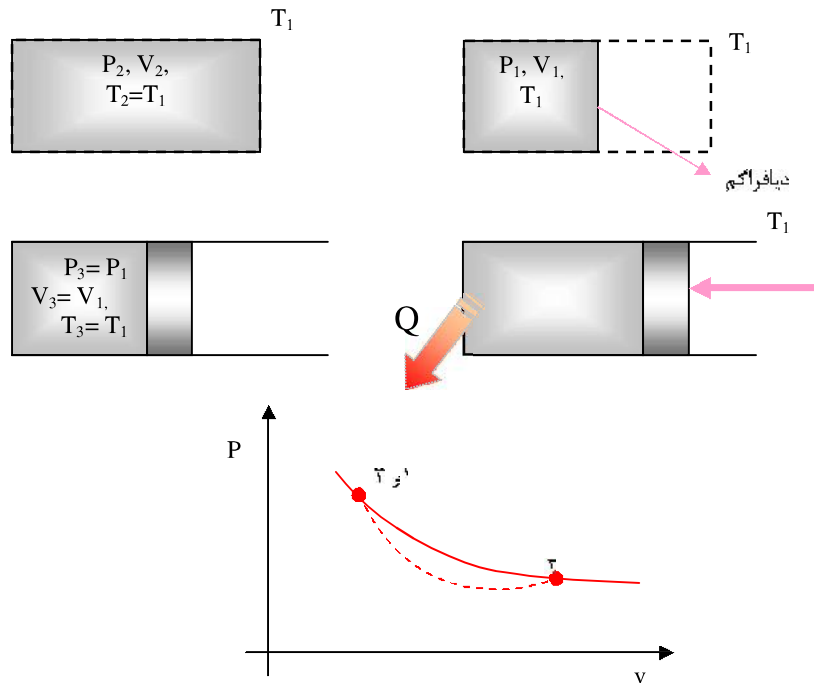
مثال ۳. فرآیند اتساع برگشت پذیر یا شبه تعادلی از فشار  $P_1$  تا فشار  $P_a$

$$P_1 = P_a + \frac{mg}{A_p} \quad (20-5)$$

$$P_2 = P_a$$

سطح مقطع پیستون،  $P_a$  فشار جو می‌باشد. به شرطی که جرمهای کوچک به سمت صفر میل کنند یا به عبارت دیگر به شرط آنکه فرآیند بسیار آهسته انجام شود می‌توان از بند کردن جرم کوچک به اندازه ارتفاع جابجائی کوچک صرف‌نظر کرد و محیط را در مسیر برگشت بدون تغییر فرض کرد.

مثال ۴. فرآیند برگشت ناپذیر انبساط در خلاء حالت خاص انبساط غیر تعادلی گذر کاملی را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۵-۱۳ یک فرآیند انبساط در خلاء را از نقطه ۱ به ۲ طی کند در این حالت کار انجام شده صفر است و چون سیستم عایق است خواهیم داشت  $u_2 = u_1$  حال در مسیر برگشت اگر بخواهیم گاز را به حالت اول برگردانیم لازم است کار تراکم انجام گردد و برای کاهش دما باید از سیستم گرما گرفته شود. ملاحظه می‌گردد که در طول فرآیند برگشت کار داده‌ایم و گرما گرفته‌ایم یعنی:



شکل ۵-۱۳. انبساط برگشتناپذیر در خلاء

$$Q_{1-2} = u_2 - u_1 + W_{1-2} \quad (21-5)$$

$$u_2 = u_1 \rightarrow T_2 = T_1$$

$$Q_{3-2} = u_3 - u_2 + W_{2-3}$$

$$\begin{cases} T_2 = T_3 \\ T_1 = T_2 \end{cases} \Rightarrow T_3 = T_1$$

$$v_3 = v_1 \quad \text{چون}$$

$$P_3 = P_1 \quad \text{پس}$$

$$f \downarrow$$

$$u_3 = u_2$$

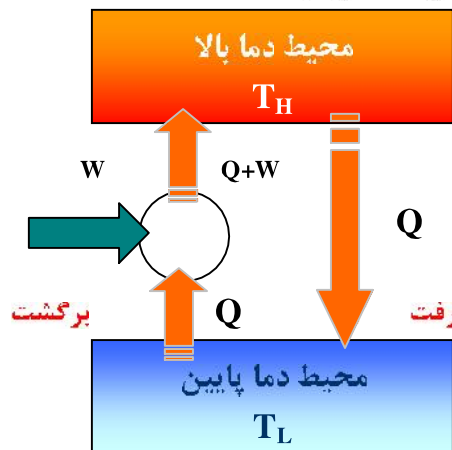
و

$$Q_{3-2} = W_{2-3}$$

بنابراین  $W_{2-3}$  کار از محیط گرفته و  $Q_{3-2}$  گرما به آن داده ایم و بنا به قانون دوم ترمودینامیک نمی‌توانیم همه گرما را به کار تبدیل کنیم، بنابراین فرآیند برگشت ناپذیر است، چون محیط تغییر کرده‌است.

تذکره: مسیر رفت خط‌چین رسم شده‌است که بیانگر آن است که مسیر رفت از نظر ترمودینامیکی نامشخص است و صرفاً نقاط ابتدا و انتهای آن معلوم هستند.

مثال ۵. فرآیند انتقال حرارت برگشت ناپذیر



شکل ۵-۱۴. فرآیند انتقال حرارت برگشت‌ناپذیر

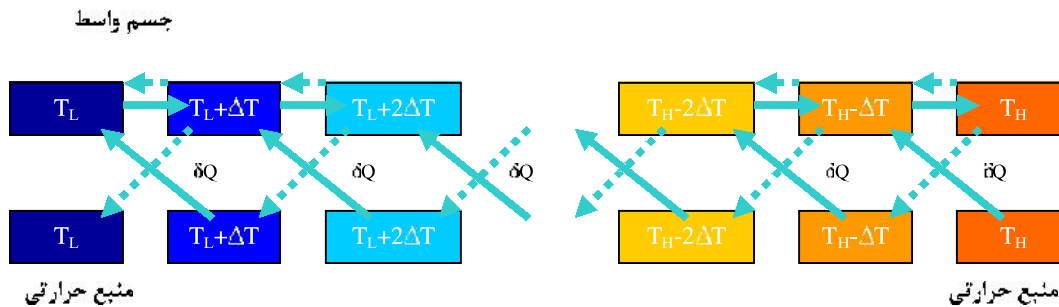
ملاحظه می‌گردد که در مسیر رفت حرارت  $Q$  از  $T_H$  به  $T_L$  رفته و برای برگرداندن  $Q$  به منبع گرم لازم است به مقدار  $W$  کار انجام دهیم. پس در حالت کلی از محیط  $W$  کار گرفته و به منبع گرم داده‌ایم ولی به موجب قانون دوم ترمودینامیک نمی‌توان کار داده‌شده به منبع را که به شکل گرما در آمده دوسره تماماً به کار تبدیل نمود.

مثال ۶. فرآیند انتقال حرارت برگشت پذیر

$$T_2 > T_1$$

(22-5)

به شکل ۵-۱۶ توجه نمایید. در رفت در مجموع توانسته ایم به جسم واسطه  $n\delta Q$  حرارت بدهیم و در برگشت  $n\delta Q$  از آن حرارت بگیریم. در مسیر رفت منبع  $T_L$  تبادل حرارت ندارد و در برگشت  $\delta Q$  حرارت می‌گیرد. در مسیر رفت از منبع  $T_H$  گرم گرفته در مسیر برگشت تبادل حرارت ندارد. جسم واسطه در مسیرهای رفت و برگشت تبادل حرارت مساوی دارد بنابراین به وضع اول برگشته است. پس در مجموع  $\delta Q$  حرارت از منبع  $T_H$  گرفته و آنرا به منبع  $T_L$  داده ایم لذا محیط اندکی دستخوش تغییر شده است در حد اگر تعداد منبع های حرارتی به بی نهایت میل کند فرایند برگشت پذیر خواهد شد لذا فرایند انتقال حرارت برگشت پذیر فرایندی است که از آن اختلاف درجه حرارت بسیار کوچک باشد که در عمل بشرطی ممکن است که سطح تبادل حرارت بین دو منبع بی نهایت بزرگ باشد تا بتوان مقدار معین  $Q$  مبادله کرد.



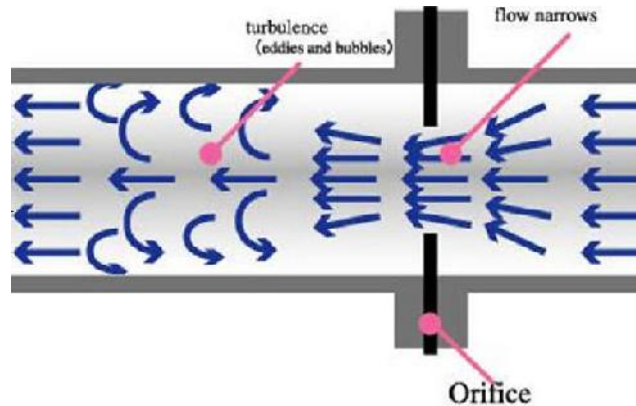
شکل ۵-۱۶. انتقال حرارت برگشت پذیر

مثال ۷. فرایند توام با اصطکاک یا تلفات

در مسیر رفت و برگشت اگر اصطکاک در لوله را در نظر بگیریم نمی‌توان حالت ۱ را به حالت اول برگردانید.

$$\begin{aligned} P_2 < P_1 &\Rightarrow P_3 < P_1 \\ P_3 < P_2 \end{aligned} \quad (۵-۲۳)$$

اختلاف فشارها در روابط فوق به دلیل افت فشار ناشی از اصطکاک در رفت و برگشت می‌باشد. در مورد جریان اریفیس (Orifice) نیز از هر طرف حرکت کنیم افت فشار خواهیم داشت، پس مسیر رفت برگشت ناپذیر است.

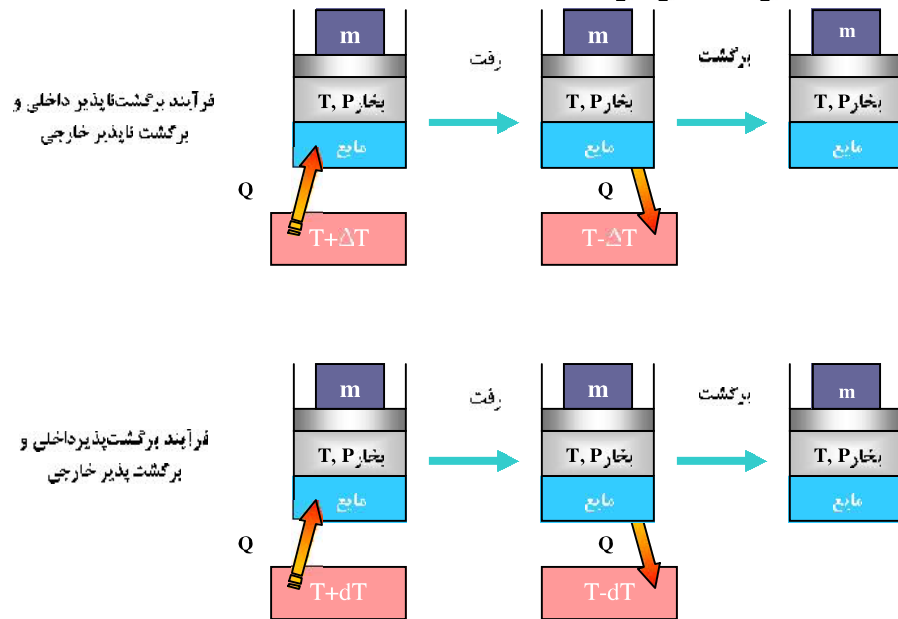


شکل ۵-۱۷. جریان از درون اریفیس



## فرآیند برگشت پذیر داخلی

فرآیندی است که عامل برگشت نپذیری از خارج به سیستم تحمیل می شود و به عبارت دیگر ذات تغییرات حالت سیستم نمی باشد یا دقیق تر سیستم در مسیر رفت و برگشت عیناً از یک سری شرایط یا حالت‌های تعادلی مشابه عبور می کند و مسیر رفت دقیقاً روی مسیر برگشت منطبق است. بعنوان مثال فرآیند ابعساط غیر تعادلی یک فرآیند برگشت ناپذیر داخلی است، زیرا که مسیر رفت و برگشت منسبانه نبوده و یا سیستم در رفت از حالت‌های تعادلی عبور نمی کند مثل زیر یک فرآیند برگشت پذیر داخلی را تشریح می کند.



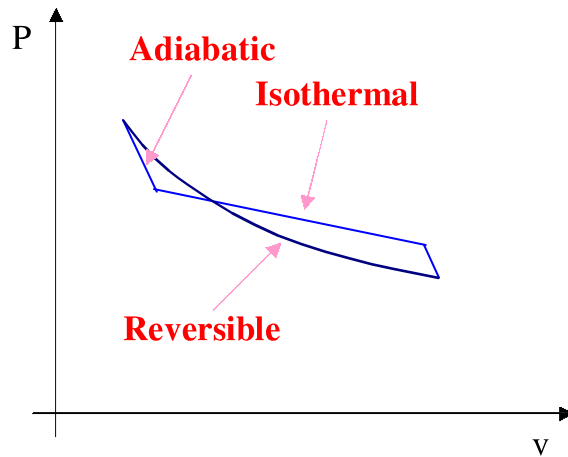
شکل ۵-۱۸. فرآیند انتقال حرارت برگشت پذیر داخلی و برگشت ناپذیر

اختلاف درجه حرارت به صفر میل کرده یا سطح تماس برای انتقال حرارت بی نهایت شده است، ملاحظه می شود که سیستم (مایع و بخار) در هر فرآیند دسرخوش تغییرات مشابهی می شود و برای هر دو فرآیند مسیرهای رفت و برگشت عیناً نظیر هم است. پس فرآیند از نظر داخلی برگشت پذیر است.

## نامعادله کلاسیوس

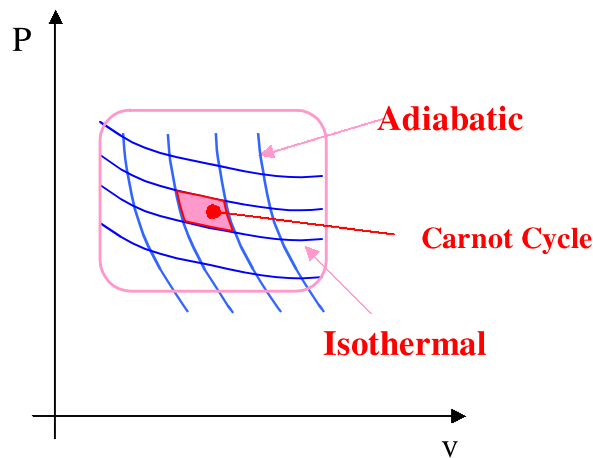
### مقدمه

هر فرآیند برگشت پذیری را می توان بصورت مجموع دو فرآیند برگشت بدیر ایزوثرم و آدیابایک در نظر گرفت.



شکل ۵-۱۹. فرآیند بازگشت پذیر بصورت مجموع دو فرآیند همدمای و آدیباتیک

در این صورت هر ماشین برگشت پذیر مجموعه‌ای از چندین ماشین کارنو است. سیکل کارنو در ادامه مطالب بحث خواهد شد (به صفحه ۷۲ مراجعه نمایید).



شکل ۵-۲۰. فرآیند بازگشت پذیر را می‌توان به عنوان مجموع فرآیندهای آدیباتیک و ایزوترم در نظر گرفت

### نامعادله کلاسیوس

با توجه به شکل (۵-۲۱) داریم:

$$\oint \delta Q = Q_H - Q_L > 0 \quad (۲۴-۵)$$

فرض کنید که ماشین برگشت پذیر باشد آنگاه همانطور که بعداً خواهیم دید در مورد سیکل کارنو

داریم  $\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$  پس با فرض اینکه هر ماشین برگشت پذیر مجموعه‌ای از چندین کارنو است

می‌نویسیم:

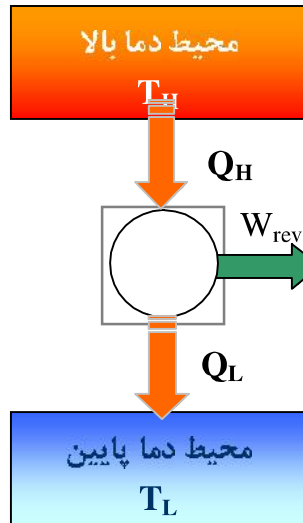
$$\int_{rev} \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0 \quad (۲۵-۵)$$

با فرض آنکه رابطه فوق برقرار باشد داریم:

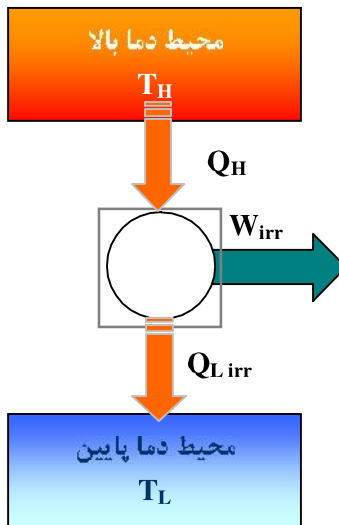
$$T_L \rightarrow T_H \text{ نگر} \Rightarrow \oint_{rev} \delta Q = 0, \oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (26-5)$$

پس همواره داریم:

$$\oint_{rev} \delta Q \geq 0 \rightarrow \oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (27-5)$$



شکل ۵-۲۱. موتور برگشت پذیر



شکل ۵-۲۲. موتور بازگشت ناپذیر

حال فرض کنید موتور را بازگشت ناپذیر کنیم در این صورت کار آن نسبت به حالت بازگشت پذیر

کمتر خواهد شد:

$$W_{irr} < W_{rev} \quad (28-5)$$

$$Q_H - Q_{L_{irr}} < Q_H - Q_{L_{rev}} \quad (29-5)$$

$$Q_{L_{irr}} > Q_{L_{rev}} \quad (30-5)$$

$$\int_{irr} \delta Q = Q_H - Q_{L_{irr}} > 0 \quad (31-5)$$

$$\int_{irr} \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_{Lirr}}{T_L} < 0 \quad (32-5)$$

$$Q_H, T_H, T_L \text{ ثابت} \quad (33-5)$$

بنابراین هنگامی که موتور بازگشت ناپذیر شد معادله  $\oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = 0$  به نامعادله تبدیل شد. هرچه ماشین بیشتر برگشت ناپذیر باشد مثلاً اصطکاک داخلی خیلی زیاد باشد کار خالص کمتر خواهد بود تا جائیکه برگشت ناپذیری به حدی است که کار خالص صفر داریم.

$$\oint_{irr} \delta Q = 0 \quad (34-5)$$

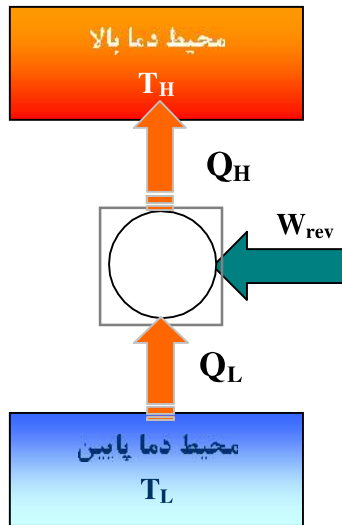
ولی داریم

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_{Lirr}}{T_L} < 0 \quad (35-5)$$

مقدار فوق بیشتر صفر می شود بنابراین همواره داریم:

$$\oint_{irr} \delta Q \geq 0 \quad (36-5)$$

$$\oint_{irr} \frac{\delta Q}{T} < 0$$



شکل ۵-۲۳. پمپ حرارتی برگشت پذیر

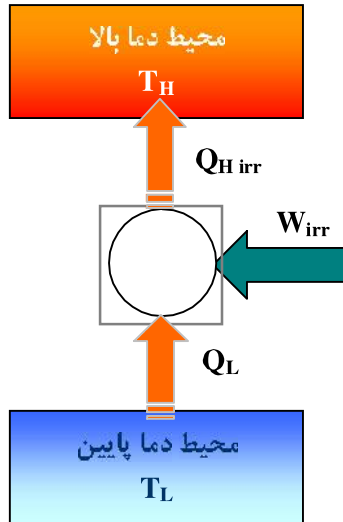
در مورد پمپ حرارتی شکل ۵-۲۳ می توان نوشت:

$$\oint_{rev} \delta Q = -Q_H + Q_L < 0 \quad (37-5)$$

$$\oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

$$T_H \rightarrow T_L \rightarrow \begin{cases} \oint \delta Q = 0 \\ \oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \end{cases}$$

پس همواره داریم  $\oint \delta Q \leq 0$



شکل ۵-۲۴. پمپ حرارتی برگشت‌ناپذیر

اکنون پمپ حرارتی را برگشت‌ناپذیر می‌کنیم (شکل ۵-۲۴) خواهیم داشت:

$$W_{irr} > W_{rev} \quad (۳۸ \text{ هـ})$$

$$Q_{H_{ir}} - Q_L > Q_{H_{rev}} - Q_L$$

$$Q_{H_{ir}} > Q_{H_{rev}}$$

$$\oint_{ir} \delta Q = -Q_{H_{ir}} + Q_L < 0$$

$$\oint_{ir} \frac{\delta Q}{T} = -\frac{Q_{H_{ir}}}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} < 0$$

$T_H, T_L, Q_L$  ثابت

هرچه ماشین را برگشت‌ناپذیر کنیم مقدار  $Q_{H_{ir}}$  بزرگتر می‌شود.

$$\oint \delta Q < 0 \quad (۳۹ \text{ هـ})$$

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

$$\oint \delta Q < 0, \quad \oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

برای کلیه ماشین‌های برگشت‌پذیر داریم:

$$\oint_{rev} \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (۴۰-هـ)$$

برای کلیه ماشین‌های برگشت‌ناپذیر داریم:

$$\oint_{irr} \frac{\delta Q}{T} < 0$$

در حالت کلی برای هر ماشینی می‌توان نوشت:

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

رابطه فوق نامساوی کلاسیوس نامیده می‌شود.

تذکره: از نظر تاریخی نامعادله کلاوسیس از تجربه حاصل شده است. به عبارت دیگر برای هر ماشین حرارتی که بشر ساخته است اندازه گیری‌ها نشان می‌دهد که  $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$  است. طبیعی است که حد این معادله برای فرآیندهای ایده‌آل به تساوی تبدیل می‌شود.

### انرژی خاصیت سیستم بسته

$$\int_{rev} \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (41-5)$$

تشابه بین انرژی سیستم و انرژی سیستم:

$$\oint \delta Q = \oint \delta w \quad (42-5)$$

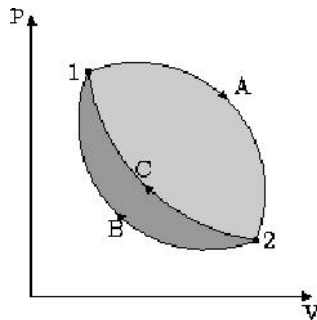
$$\delta Q - \delta w = dE \quad (43-5)$$

به مسیر بستگی ندارد

چون سیکل 1A2B1 برگشت پذیر است

$$\int_{rev} \frac{\delta Q}{T} = 0 \rightarrow \int_{1 rev} \frac{\delta Q}{T} \rightarrow \frac{\delta Q}{T} = ds \quad (45-5)$$

خاصیت سیستم



شکل ۵-۲۵. مسیرهای یک سیکل بسته برگشت پذیر

$$A \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + B \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad (46-5)$$

$$A \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + C \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} = 0$$

$$B \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} = C \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} = \dots = x \int_2^1 \frac{\delta Q}{T}$$

پس مقدار انتگرال  $\int \frac{\delta Q}{T}$  روی مسیر برگشت پذیر به مسیر بستگی ندارد یعنی مقدار  $\int \frac{\delta Q}{T}$  خاصیت سیستم است چون تغییرات آن به مسیر بستگی ندارد و آنرا با S نشان می‌دهیم و انرژی می‌نامیم و داریم:

$$ds = \frac{\delta Q}{T} \quad (47-5)$$

$$\Delta S = \int_1^2 ds = S_2 - S_1 = \int_{1 \text{ rev}}^2 \frac{\delta Q}{T}$$

**مثال:** مطلوبست محاسبه  $u_2 - u_1$  برای فرآیندهای غیر تعادلی و تعادلی (برگشت ناپذیر) 1-2 با توجه به اطلاعات ذیل.

$$T_1 = T_2 = 3000 \text{ و } Q_{1-2, \text{rev}} = 0 \text{ و } W_{1-2, \text{rev}} = ?$$

$$Q_{1-2, \text{rev}} = 300 \text{ kJ و } W_{1-2, \text{rev}} = 350 \text{ kJ}$$

$$300 = u_2 - u_1 + 350$$

$$u_2 - u_1 = -50$$

محاسبه از طریق فرآیند برگشت پذیر انجام شده ولی مقدار  $\Delta u$  به مسیر بستگی ندارد. پس این مقدار برای فرآیند برگشت ناپذیر نیز صادق است.

مطلوبست محاسبه  $S_2 - S_1$  برای فرآیند فوق: با فرض اینکه در فرآیند برگشت پذیر داریم:

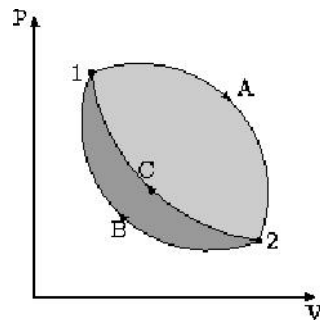
$$s_2 - s_1 = \int_{\text{rev}} \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T} \int \delta Q = \frac{1}{300} \times 300 = 0.1$$

$$\int \frac{\delta Q}{T} = \int \frac{0}{T} = 0 \text{ برای فرآیند برگشت ناپذیر}$$

که با مقدار قبل مغایرت دارد چون نمی توان تغییرات انتروپی را بوسیله مسیر برگشت ناپذیر محاسبه کرد اما چون  $S_2 - S_1$  خاصیت سیستم هستند و توابع نقطه ای هستند پس تغییرات آن اگر برای یک مسیر برگشت پذیر دلخواه بین آن دو نقطه بدست آید این تغییرات برای هر مسیر دیگری هر چند برگشت ناپذیر صادق است. لذا برای مسیر برگشت ناپذیر نیز داریم:

$$s_2 - s_1 = 0.1$$

**تغییرات انتروپی برای یک فرآیند برگشت ناپذیر**



شکل ۵-۲۶. مسیرهای یک سیکل بسته با فرآیند برگشت ناپذیر

$$A \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + B \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \quad (48-5)$$

$$A \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + C \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} < 0 \quad (49-5)$$

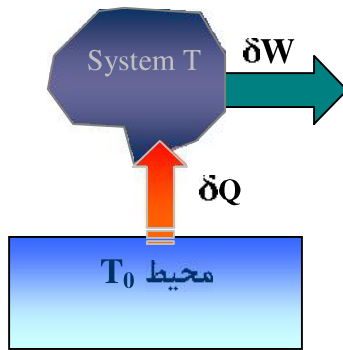
$$B \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} > C \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} \quad (50-5)$$

$$s_1 - s_2 = B \int_2^{rev} \frac{\delta Q}{T} \quad (51-5)$$

$$\int_2^1 ds > \int_2^1 \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_c \quad (52-5)$$

$$ds \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (53-5)$$

$$s_2 - s_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (54-5)$$



شکل ۵-۲۷. تغییر انتروپی محیط و سیستم

اصل افزایش انتروپی

$$ds_{System} \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (55-5)$$

$$ds_{Environment} = -\frac{\delta Q}{T_0} \quad (56-5)$$

$$ds_{\text{کلی}} = ds_{System} + ds_{\text{محیط}} \geq \frac{\delta Q}{T} - \frac{\delta Q}{T_0} \quad (57-5)$$

$$\geq \delta Q \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

$$T_0 > T \rightarrow \Delta s_{\text{کلی}} \geq 0 \quad (58-5)$$

اگر  $T > T_0 \rightarrow \Delta s \geq 0$  دوباره  $\rightarrow$  علامت  $\delta Q$  عوض میشود

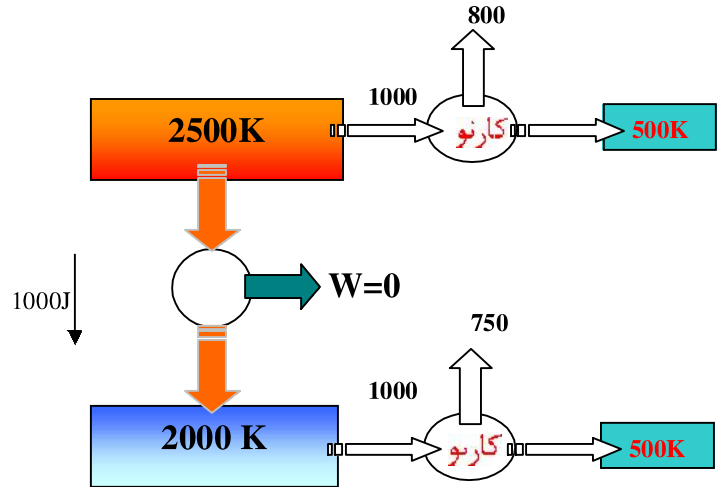
اگر سیستم ایزوله باشد، در آن صورت انتروپی محیط تغییر نکرده و همواره داریم:

$$\Delta s \geq 0 \quad (59-5)$$



## قابلیت کاردهی Available Work

برای یک موتور حرارتی که بایک منبع حرارتی گرم در تماس است عبارتست از حداکثر کار ممکن که می‌توان از موتور نسبت به یک منبع حرارتی در دمای مرجع اخذ نمود. دمای منبع حرارتی مرجع معمولاً کمترین دمای ممکن در اتمسفر زمین فرض می‌گردد. در مثال‌های زیر دمای حداقل مرجع 500K فرض شده‌است.



شکل ۵-۲۸. مثال

کار تولید شده از 1000 ژول در 2500 کنوین، نسبت به دمای سرد 500 کلوین:

$$w_{\max} = 1000 \left(1 - \frac{500}{2500}\right) = 800$$

کار تولید شده از 1000 ژول در 2000 کنوین، نسبت به دمای سرد 500 کلوین:

$$w_{\max} = 1000 \left(1 - \frac{500}{2000}\right) = 750$$

کاهش قابلیت کاردهی (Work Degradation)

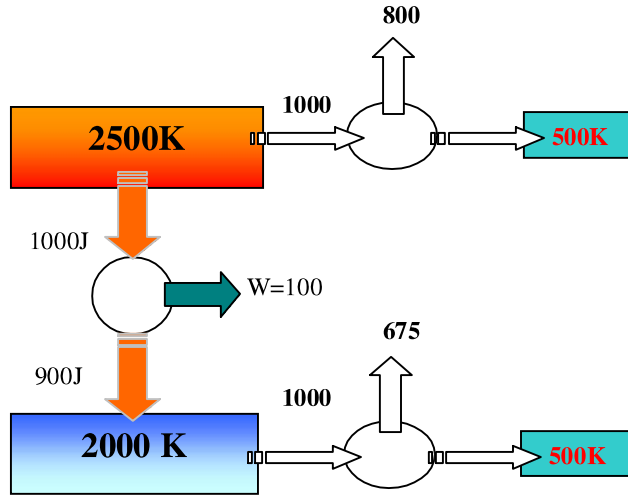
$$D = 800 - 750 = 50$$

$$\Delta s_{\text{sys}} = \Delta s_{\text{سیستم}} = 0$$

$$\Delta s_{\text{محیط}} = \Delta s_H + \Delta s_L = \frac{-1000}{2500} + \frac{1000}{2000} = 0.1$$

$$D = T_0 \Delta S = (500)(0.1) = 50$$

ملاحظه می‌گردد که D حاصلضرب افزایش آنتروپی در ضریب تناسب حداقل دمای مرجع سرد فرض شده است. لذا به ازاء یک دمای مرجع افزایش آنتروپی یک سیستم در واقع بیانگر کاهش قابلیت کاردهی آن است.

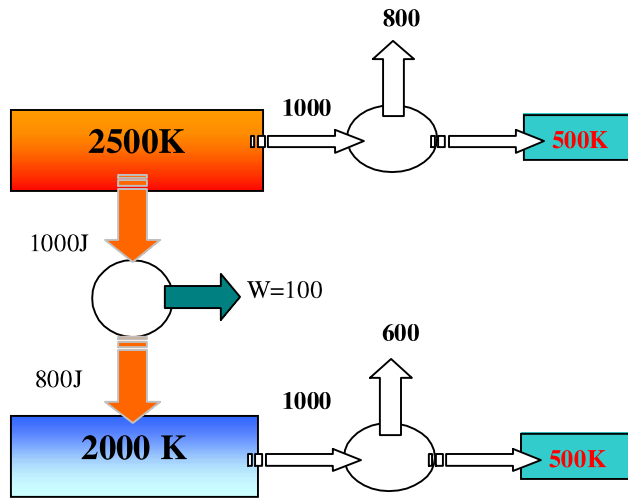


شکل ۵-۲۹. مثال

$$D = 800 - 675 - 100 = 25$$

$$\Delta s_{System} = 0, \Delta s_{حیث} = \frac{-1000}{2500} + \frac{100}{2000} = 0.05$$

$$D = T_o \Delta S = (0.05)(500) = 25$$



شکل ۵-۳۰. مثال

$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_L}{T_L}$$

$$Q_L = (1000) \frac{(2000)}{2500} = 800$$

$$W_{net} = 1000 - 800 = 200$$

$$D = 800 - 600 - 200 = 0$$

$$\Delta s = \frac{1000}{2500} - \frac{800}{2000} = 0$$

$$D = T_0 \Delta S = 0$$

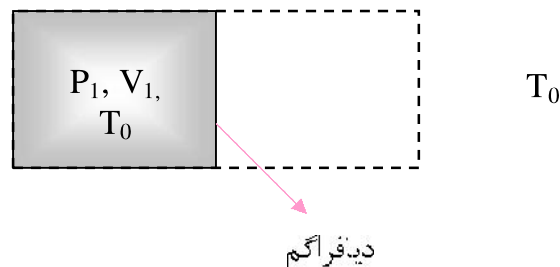
### نتیجه گیری

برای هر فرآیند برگشت ناپذیری داریم  $\int_{irr} \frac{\delta Q}{T} > \Delta s$ ، اگر فرآیند آدیاباتیکی باشد داریم  $\Delta s > 0$ .

وقتی فرآیند برگشت ناپذیری انجام می شود نظیر انتقال حرارت از منبع گرم به منبع سرد می توان  $\Delta S$  خالص را محاسبه کرد و ملاحظه کرد که  $\Delta S > 0$  در عین حال می توان کاهش قابلیت کاردهی را نیز محاسبه کرد نظیر محاسبات فوق و ملاحظه کرد که با انجام فرآیند برگشت ناپذیر مقدار قابلیت کاردهی کاهش می یابد.

در نتیجه با انجام هر فرآیند برگشت ناپذیر یعنی افزایش انترپی عالم میزان قابلیت کاردهی انرژی موجود کاهش می یابد و اگر این را به تمام دنیا تعمیم دهیم نتیجه می گیریم که با استفاده از منابع موجود انرژی جهان هر لحظه انترپی عالم افزایش در عین حال قابلیت کاردهی انرژی پائین می آید. تاجاییکه تمام انرژی قابل تبدیل در دمای بالا به انرژی در دمای پائین مثلاً دمای اتمسفر تنزل پیدا می کند و در آنجا دیگر نمی توان از این انرژی استفاده کرد و چون برای استفاده از این انرژی نیاز به منبع سرد داریم که در جهان موجود نمی باشد.

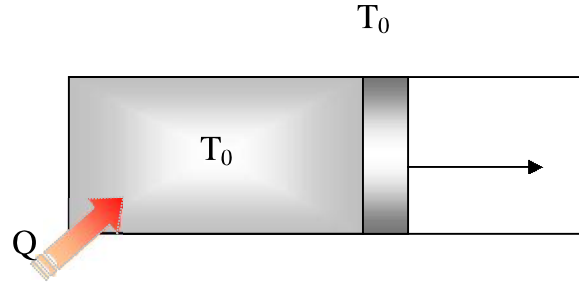
مطالب فوق را از یک فرآیند انتقال حرارت برگشت ناپذیر نتیجه گرفتیم نظیر آنرا می توان از فرآیند زیر نتیجه گرفت.



شکل ۵-۳۱، بساط کنترن نشده

با استفاده از تعریف قابلیت کاردهی داریم:

$$D = T_0 \Delta s = RT_0 \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (۵-۶۰)$$



شکل ۵-۳۲. فرآیند برگشت پذیر انبساط همدم

کار برای فرآیند همدم از حجم  $V_1$  به  $V_2$  را می توان برای گاز کامل بصورت زیر حساب کرد.

$$W_{\max} = RT_0 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (۶۱-۵)$$

همچنین تغییرات انتروپی گاز کامل در فرآیند همدم برابر است با:

$$\Delta s = R_0 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (۶۲-۵)$$

در اثر فرآیند برگشت پذیر انتروپی افزایش یافته است و قابلیت کاردهی از بین رفته است. ملاحظه می کنید که (۶۱-۵) و (۶۲-۵) متناسب هستند. ضریب تناسب دمایی  $T_0$  است.

### تغییرات انتروپی جامدات و مایعات

با توجه به این امر که می توان برای مایعات و جامدات گرمای ویژه را ثابت فرض نمود می توان نوشت:

$$Tds = du + pdv \quad (۶۳-۵)$$

$$dv \approx 0$$

$$Tds \approx du \approx cdt \rightarrow ds = \frac{C}{T} dT \rightarrow s_2 - s_1 \approx C \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right)$$

با فرض  $C = \text{Const}$

مثال: 1kg مایع آب از  $20^\circ\text{C}$  تا  $90^\circ\text{C}$  گرم می شود مطلقاً تغییرات انتروپی آن:

$$s_2 - s_1 = 4.184 \ln \frac{363.2}{293.2} = 0.8958 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

$$s_2 - s_1 = s_f|_{90} - s_f|_{20} = 1.1925 - 0.2966 = 0.8959 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \quad (\text{بکارگیری جداول}):$$

### تغییرات انتروپی گاز کامل

$$Tds = du + Pdv \quad (۶۴-۵)$$

$$ds = C_{v0} dT + \frac{P}{T} \frac{R}{v} dv \quad (۶۵-۵)$$

$$ds = C_{v0} \frac{dT}{T} + \frac{R}{v} dv \quad (۶۶-۵)$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{v_o} \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (67-5)$$

$$Tds = dh - v dP \quad (68-5)$$

$$Tds = C_{p_o} dT - \frac{RT}{P} dP \quad (69-5)$$

$$ds = C_{p_o} \frac{dT}{T} - \frac{R}{P} dP \quad (70-5)$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{p_o} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (71-5)$$

روشهای مختلف محاسبه  $\int C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$  یا  $\int C_v \ln \frac{T_2}{T_1}$ :

الف) با فرض  $C_p = const$

$$s_2 - s_1 = C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (72-5)$$

ب)  $C_{p_o}$  تابعی از دما از جدول A.9

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_p(\theta) \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (73-5)$$

ج) استفاده از روش جدول A.11 و A.10 بصورت زیر:

اگر

$$s_T^o = \int_{T_o}^T \frac{C_{p_o}}{T} dT \quad (74-5)$$

آنگاه

$$s_2 - s_1 = (s_{T_2}^o - s_{T_1}^o) - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (75-5)$$

چون داریم:

$$\int_{T_o}^{T_2} C_{p_o} \frac{dT}{T} - \int_{T_o}^{T_1} C_{p_o} \frac{dT}{T} = \int_{T_1}^{T_2} C_{p_o} \frac{dT}{T} \quad (76-5)$$

مثال 1kg هوا از 300K تا 600K گرم می شود و فشار آن از 400kPa به 300kPa می رسد.

الف-

$$C_{p_o} = 1.0035 \text{ kJ/kg.K}$$

$C_{p_o}$  ثابت جدول A.8

$$S_2 - S_1 = 1.0035 \ln \frac{600}{300} - 0.287 \ln \frac{300}{400} = 0.7781 \text{ kJ/kg.K}$$

ب- جدول A.11

$$T_1 = 300 \rightarrow S_{T_1}^o = 2.5153$$

$$T_2 = 600 \rightarrow S_{T_2}^o = 3.2223$$

$$S_2 - S_1 = 3.2223 - 2.5153 - 0.287 \ln \frac{300}{400} = 0.7896 \text{ kJ/kg.K}$$

جدول هوا برای محاسبه خواص در فرآیند برگشت پذیر آدیباتیک (کاربرد A.10)

$$\begin{cases} Tds = dh - vdp \\ ds = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} dh = vdp \\ C_{p0} dT = vdp = \frac{RTdP}{P} \end{cases}$$

$$\frac{dP}{P} = \frac{C_{p0}}{R} \frac{dT}{T}$$

بین حالت مرجع  $T_o$  و  $P_o$  و هر حالت خاصی انتگرال می گیریم:

$$\ln \frac{P}{P_o} = \frac{1}{R} \int_{T_o}^T C_{p0} \frac{dT}{T}$$

$$\ln \text{Pr} = \frac{1}{R} \int_{T_o}^T C_{p0} \frac{dT}{T} = S_T^o$$

T	Pr	$S_T^o$
100	0.0299	1.4143
200	0.3363	2.1088

برای دو حالت  $(T_1, P_1)$  و  $(T_2, P_2)$  معادله فوق را می توان نوشت:

$$\ln \text{Pr}_1 = \ln \frac{P_1}{P_o} = \frac{S_{T_1}^o}{R}$$

$$\ln \text{Pr}_2 = \ln \frac{P_2}{P_o} = \frac{S_{T_2}^o}{R}$$

بصورتیکه:

$$\text{Pr}_2 = \frac{P_2}{P_o} = \frac{P_2}{P_1} \frac{P_1}{P_o} = \frac{P_2}{P_1} \text{Pr}_1$$

یا

$$\text{Pr}_2 = \frac{P_2}{P_1} \text{Pr}_1$$

مثال 1kg هوا در محفظه سیندر پیستون در فشار 400kPa و دمای 600K بطور آدیباتیک و برگشت پذیر به 150kPa منبسط می شود مطلوبست کار انجام شده در این فرآیند:

$$0 = u_2 - u_1 + w$$

$$0 = s_2 - s_1 = C_{p_o} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$0 = \int C_{p_o} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$T_1 = 600K \rightarrow \begin{cases} u = 434.8 \frac{kJ}{kg} \\ Pr_1 = 16.278 \end{cases}$$

$$Pr_2 = Pr_1 \frac{P_2}{P_1} = 16.278 \times \frac{150}{400} = 6.104$$

با استفاده از جدول A.10 داریم:

$$Pr_2 = 6.104 \rightarrow \begin{cases} T_2 = 457.K \\ u_2 = 327.79 \frac{kJ}{kg} \end{cases}$$

$$w = 434.8 - 327.79 = 107.01 \frac{kJ}{kg}$$

روش ساده برای محاسبات فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر گازهای کامل

فرض اساسی:  $C_{p_o}$  و  $C_{v_o}$  با دما تغییر نمی کنند.

$$\begin{cases} k = \frac{C_{p_o}}{C_{v_o}} \\ C_{p_o} - C_{v_o} = R \end{cases} \rightarrow \begin{cases} C_{v_o} = \frac{R}{k-1} \\ C_{p_o} = \frac{kR}{k-1} \end{cases} \quad (77-5)$$

$$Tds = du + Pdv = C_{v_o} dT + Pdv = 0 \quad (78-5)$$

$$dT = \frac{1}{R} (pdv + vdP) \quad (79-5)$$

$$\frac{C_{v_o}}{R} (Pdv + vdP) + Pdv = 0 \quad (80-5)$$

$$\frac{1}{k-1} (Pdv + vdP) + Pdv = 0 \quad (81-5)$$

$$vdP + kPdv = 0 \rightarrow \frac{dP}{P} + k \frac{dv}{v} = 0 \quad (82-5)$$

$$Pv^k = const \quad (83-5)$$

$$Pv = mRT$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

محاسبه کار در فرآیند آدیباتیک برای گاز کامل و  $c_{po}, c_{vo}$  ثابت

$$Q_{1-2} = m(u_2 - u_1) + W_{1-2} \quad (۸۴-۵)$$

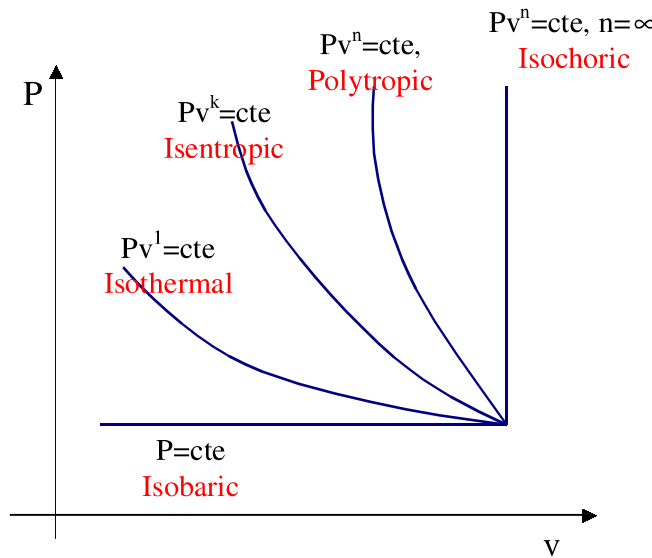
$$W_{1-2} = -m(u_2 - u_1) = -mC_{v_0} (T_2 - T_1)$$

$$w_{1-2} = \frac{mR}{1-k} (T_2 - T_1) = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-k}$$

با استفاده از رابطه کلی کار ( $w_{1-2} = \int P dv$ ) داریم:

$$Pv^k = const \rightarrow w_{1-2} = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-k} \quad (۸۵-۵)$$

فرآیند پلی تروپیک (برگشت پذیر) برای گاز کامل



شکل ۵-۳۳. نمودار P-v فرآیندهای پلی تروپیک

$$Pv^n = const \quad (۸۶-۵)$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n \quad (۸۷-۵)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} \quad (۸۸-۵)$$

$$w_{1-2} = \int_1^2 P dv = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n}, n \neq 1 \quad (۸۹-۵)$$

فرآیند برگشت پذیر همدمای گاز کامل

الف: محاسبه کار فرآیند

$$Pv = C \Rightarrow P_1 v_1 = P_2 v_2 \quad (۹۰-۵)$$

$$w_{1-2} = \int_1^2 P dv = P_1 v_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = mRT \ln \frac{v_2}{v_1} = mRT \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (۹۱-۵)$$



ب: محاسبه انتقال حرارت:

$$du = C_v dT \quad (92-5)$$

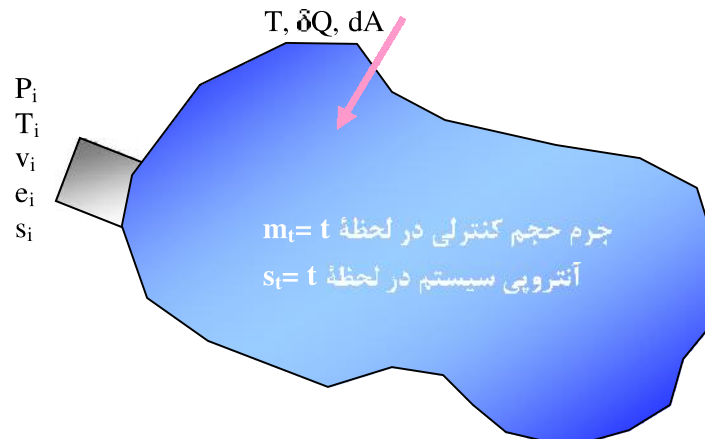
$$dT = 0 \rightarrow du = 0 \quad (93-5)$$

$$Tds = du + Pdv \quad (94-5)$$

$$\int_1^2 Tds = \int_1^2 Pdv \quad (95-5)$$

$$q_{1-2} = \int_1^2 Tds = \int_1^2 Pdv = P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (96-5)$$

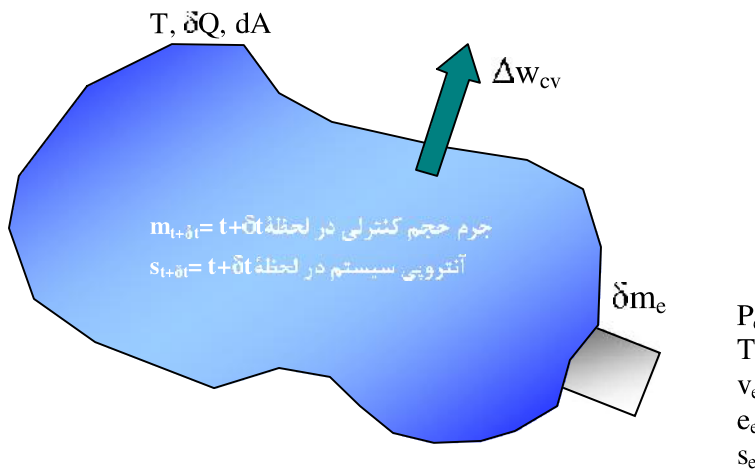
تعمیم قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل



شکل ۵-۳۴. حجم کنترلی در لحظه t

$$m_t + \delta m_i = \text{جرم سیستم در لحظه } t$$

$$S_t + s_i \delta m_i = \text{آنترופی سیستم در لحظه } t$$



شکل ۵-۳۵. حجم کنترلی در لحظه t + delta t

$$m_{t+\delta t} + \delta m_e = \text{جرم سیستم در لحظه } t + \delta t$$

$$S_{t+\delta t} + s_e \delta m_e = \text{آنترופی سیستم در لحظه } t + \delta t$$

$$\frac{dS_{cv}}{dt} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum \frac{Q_{cv}}{T} \quad (97-5)$$

$$S_1 = S_t + s_i \delta m_i \quad (98-5)$$

$$S_2 = S_{t+\delta t} + s_e \delta m_e$$

$$S_2 - S_1 = S_{t+\delta t} - S_t + s_e \delta m_e - s_i \delta m_i$$

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \rightarrow \frac{S_2 - S_1}{\delta t} \geq \frac{1}{\delta t} \left( \frac{\delta Q}{T} \right) \quad (99-5)$$

فرآیند SSSF

$$\frac{dS_{C.V.}}{dt} \geq 0 \rightarrow \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum \left( \frac{\dot{Q}_{C.V.}}{T} \right) \quad (100-5)$$

تک جریان

$$\dot{m}(s_e - s_i) \geq \sum \left( \frac{\dot{Q}_{C.V.}}{T} \right) \quad (101-5)$$

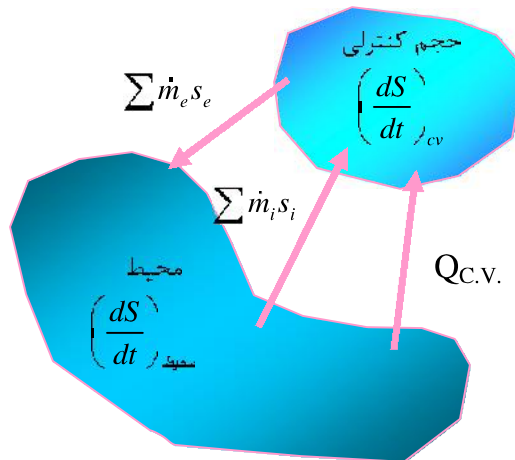
فرآیند آدیباتیک

$$s_e \geq s_i \quad (102-5)$$

فرآیند USUF می‌شود.

$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{C.V.} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i = \int_0^t \left( \frac{\dot{Q}_{C.V.} + L\dot{W}_{C.V.}}{T} \right) dt \quad (103-5)$$

اصل افزایش انتروپی برای حجم کنترل



شکل ۵-۳۶. تبادل گرما و آنتروپی بین سیستم و محیط

$$\frac{ds_{C.V.}}{dt} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum \left( \frac{\dot{Q}_{C.V.}}{T} \right) \quad (104-5)$$

$$\frac{dS_{sur}}{dt} - \sum \dot{m}_s s_e + \sum \dot{m}_i s_i = -\frac{\dot{Q}_{C.V.}}{T_o} \quad (105-5)$$

$$\frac{dS_{Net}}{dt} = \frac{dS_{C.V.}}{dt} + \frac{dS_{sur}}{dt} \geq \sum \left( \frac{\dot{Q}_{C.V.}}{T} \right) - \frac{\dot{Q}_{C.V.}}{T_o} \quad (106-5)$$

$$\begin{cases} \dot{Q}_{C.V.} > 0 & \dot{Q}_{C.V.} < 0 \\ T_o > T & T_o < T \end{cases}$$

$$\frac{dS_{Net}}{dt} = \frac{dS_{C.V.}}{dt} + \frac{dS_{sur}}{dt} \geq 0$$

حالت های خاص  
با فرض جریان دائمی

$$\frac{dS_{C.V.}}{dt} = 0 \text{ پس } \frac{dS_{sur}}{dt} \geq 0 \quad (107-5)$$

فرآیند USUF:

$$\Delta S_{C.V.} = (m_2 s_2 - m_1 s_1)_{C.V.} \quad (108-5)$$

و تاثیر برگشت پذیری روی محیط خواهد بود و از معادله (105-5) می توان  $\frac{dS_{Net}}{dt}$  را به دست آورد.

$$\Delta S_{sur} = -\frac{\dot{Q}_{C.V.}}{T_o} + \sum \dot{m}_s s_e - \sum \dot{m}_i s_i \quad (109-5)$$

کار در فرآیند برگشت پذیر SSSF

$$q + h_i + \frac{v_i^2}{2} + g z_i = h_e + \frac{v_e^2}{2} + g z_e + w \quad (110-5)$$

$$\dot{m}(s_e - s_i) \geq \frac{\dot{Q}_{C.V.}}{T}$$

الف) فرآیند آدیاباتیک و برگشت پذیر

$$s_i = s_e$$

$$Tds = dh - vdP \rightarrow dh = vdP \rightarrow h_i - h_e = \int_i^e vdP \quad (111-5)$$

$$w = h_i - h_e + \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} + g(z_i - z_e)$$

$$w = -\int_i^e vdP + \frac{V_i^2 - V_e^2}{2} + g(z_i - z_e)$$

ب) فرآیند ایزوترمال و برگشت پذیر

$$T(s_e - s_i) = \frac{\dot{Q}_{C.V.}}{\dot{m}} = q \quad (112-5)$$

ما جاگذاری از رابطه  $Tds = dh - vdP$  و با در نظر گرفتن ثابت بودن دما در فرآیند

$$T(s_e - s_i) = h_e - h_i - \int v dP \quad (5-113)$$

با استفاده از (5-110، 112، 123) نتیجه می‌شود:

$$w = -\int v dP + \frac{(V_i^2 - V_e^2)}{2} + g(z_i - z_e) \quad (5-114)$$

تذکره: چون هر فرآیند برگشت پذیری مجموعه‌ای از دو فرآیند برگشت پذیر آدیباتیک و ایزوترمال می‌باشد به همین جهت می‌توان برای هر فرآیند برگشت پذیر SSSF نوشت:

$$w = -\int v dP + \frac{(V_i^2 - V_e^2)}{2} + g(z_i - z_e) \quad (5-115)$$

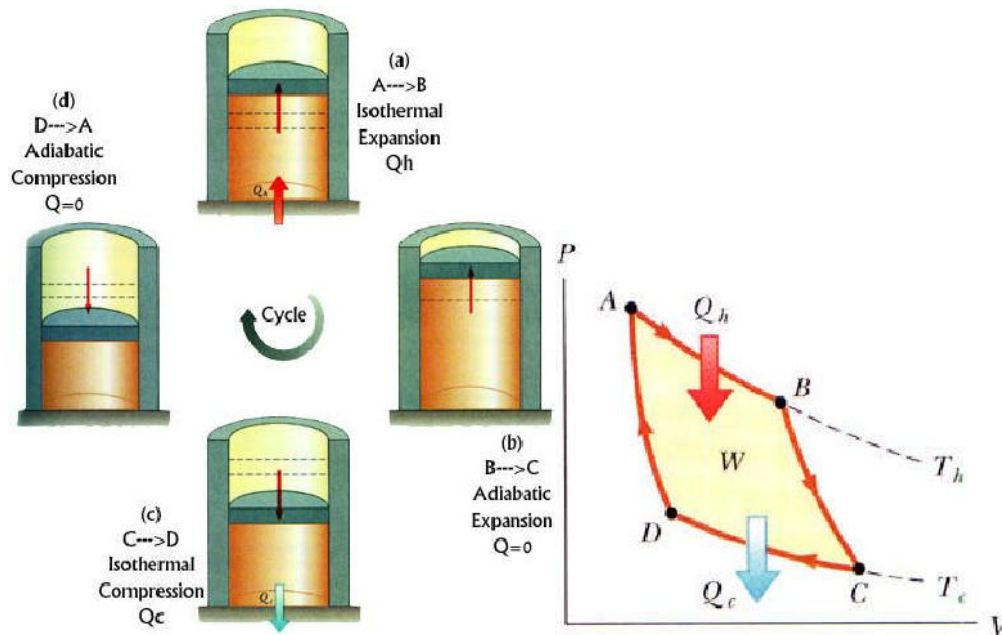
### سیکل کارنو

سیکل کارنو سیکلی برگشت پذیر است و دارای مشخصات زیر است.

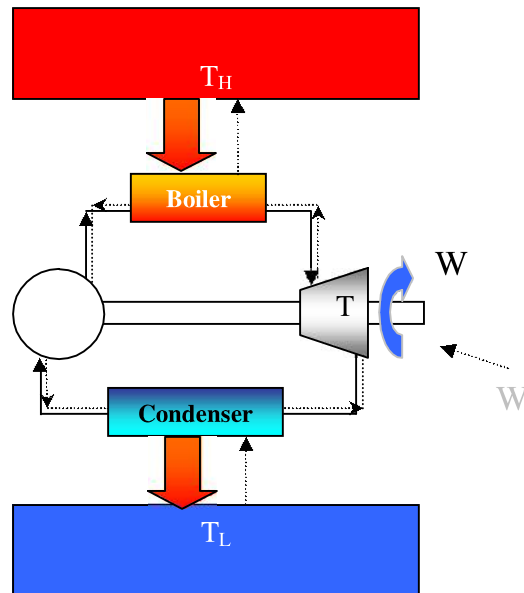
۱. تمام فرایندها برگشت پذیر فرض می‌شوند.
۲. یک فرآیند انتقال حرارت از منبع گرم به سیکل داریم، چون منبع حرارتی دمای ثابتی دارد برای اینکه اختلاف دمای منبع حرارتی و سیال عامل سیکل بی نهایت کوچک باشد لازم است که دمای سیال عامل نیز ثابت بماند و بتوان فرآیندهای انتقال حرارت را برگشت پذیر فرض کرد.
۳. یک فرآیند انتقال حرارت از سیال به منبع سرد.
۴. دو فرآیند آدیباتیک برگشت پذیر فرض آدیباتیک برای آن است که تبدیل حرارت فقط در دو فرآیند داشته باشیم. فرض برگشت پذیری نیز روشن است.

سیکل کارنو

مثال: سیکل کارنو برای سیستم بسته



شکل ۵-۳۷. چرخه موتور کارنو برای یک سیستم بسته



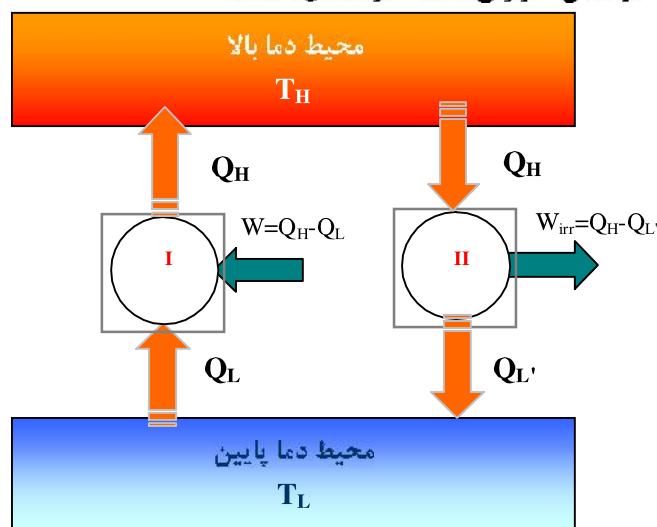
شکل ۵-۳۸. مثال، چرخه کاربو برای یک نیروگاه بخار (خط چین ه، برگشت سیکل هستند).

در عمل ایجاد چنین سیکلی غیر ممکن است و یا از نظر مکانیکی بسیار مشکل است، البته نه از لحاظ برگشت پذیری و ترمودینامیکی بلکه از نظر مکانیکی پمپ کردن یک سیال دو فاز به سمت فشار و دمای بالا بسیار مشکل است.

نکته:

بازده هیچ سیکل برگشت ناپذیری از بازده سیکل کارنو نمی تواند بیشتر باشد زیرا با توجه به شکل (۵-۳۹) می توان نوشت چون بازده سیکل II بیشتر است، پس اگر سیکل بصورت موتور حرارتی کار کند آنگاه  $Q_L < Q_L'$  می شود و مجموعه دو ماشین با یک منبع حرارتی در تماس بوده و همه گرما به کار تبدیل شده است.

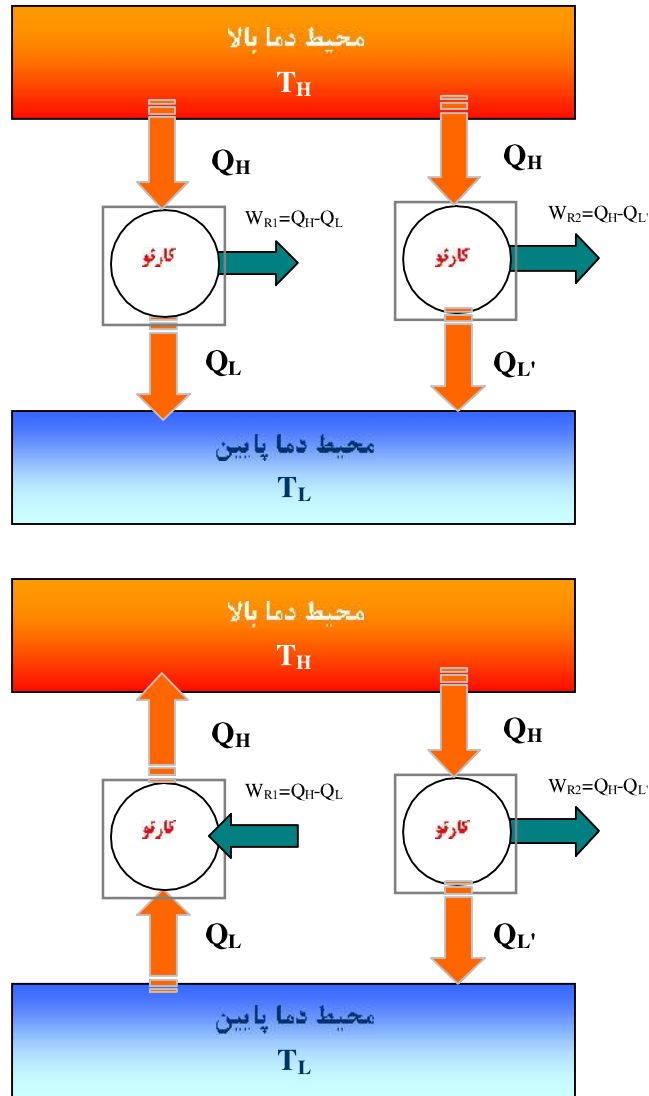
(هر دو سیکل با دو منبع حرارتی مشابه در تماس هستند)



شکل ۵-۳۹. یک موتور کارنو در مقایسه با موتور عددی که بین دو منبع دمایی مشابه کار می کند.

$$W_{L,R} - W_R = Q_H - Q_{L'} - Q_H + Q_L = Q_L - Q_{L'} \quad (118-5)$$

۲. بازده هیچ سیکل کارنوی بیشتر از دیگری نمی باشد (هر دو سیکل با دو منبع حرارتی مشابه در تماس هستند).



شکل ۵-۴. دو موتور کارنو در مقایسه با حالتی که بین دو منبع دمایی مشابه کار می کنند

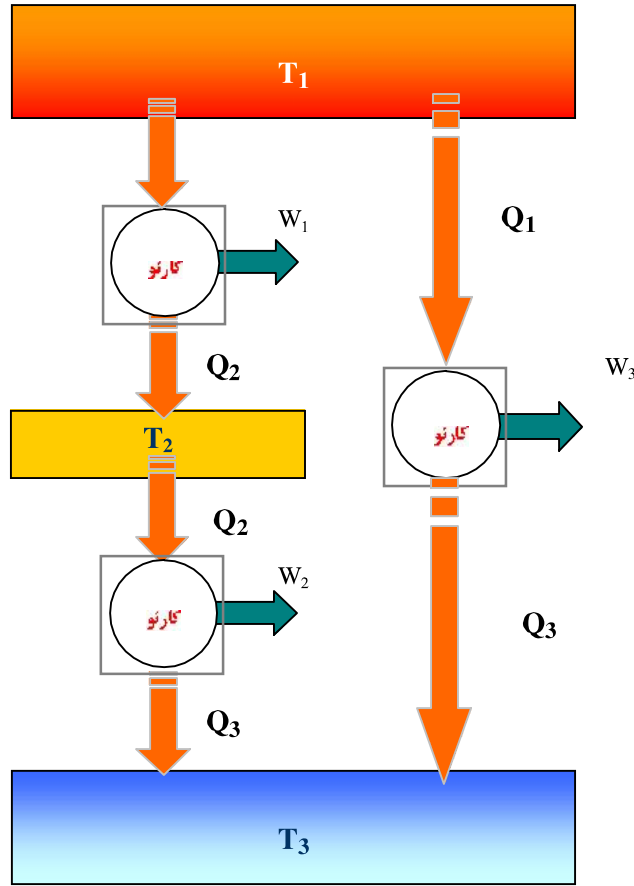
$$W_{R2} - W_{R1} = Q_H - Q_{L'} - Q_H + Q_L = Q_L - Q_{L'} \quad (119-5)$$

ملاحظه می گردد که مجموعه دو ماشین با یک منبع در تماس بوده و همه حرارت را به کار تبدیل می کند که غیر ممکن است

۳. بازده سیکل کارنو تنها تابعی از دمای دو منبع حرارتی سرد و گرم می باشد.

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (120-5)$$

$$\frac{Q_L}{Q_H} = f(T_L, T_H)$$



شکل ۵-۴۱. پزده چرخه کارنو تنهه تابعی از دمای دو منبع حرارتی مرتبط به چرخه می‌باشد

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \varepsilon_1(T_1, T_2) \quad (۲۱ \ ۵)$$

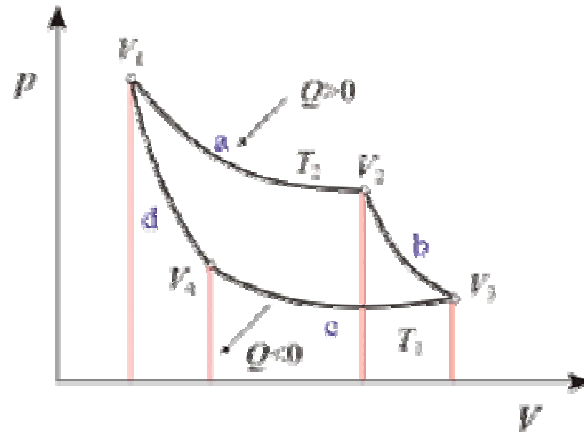
$$\frac{Q_2}{Q_3} = \varepsilon_2(T_2, T_3)$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \varepsilon_3(T_1, T_3)$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \frac{Q_2}{Q_3} \Rightarrow \varepsilon_3(T_1, T_3) = \varepsilon_1(T_1, T_2) \cdot \varepsilon_2(T_2, T_3)$$

$$\Rightarrow \frac{g_1(T_1)}{g_2(T_2)} \cdot \frac{g_2(T_2)}{g_3(T_3)} \Rightarrow \varepsilon_1(T_1, T_2) = \frac{g_1(T_1)}{g_2(T_2)} \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{g_1(T_1)}{g_2(T_2)} = \frac{g(T_1)}{g(T_2)} = \frac{T_1}{T_2}$$

اکنون باید تابع  $g$  را انتخاب کنیم. باید تابعی انتخاب کنیم که تناوبی نبوده و در نقاطی مبهم نباشد  
اگر بصورت خطی انتخاب کنیم



شکل ۵-۴۲. سیکل موتور کارنو با سیال عامل گاز

آنگاه:  $0 \rightarrow T \rightarrow \infty$

اگر به صورت  $\frac{e^{T_1}}{e^{T_2}}$  انتخاب کنیم:  $-\infty \rightarrow T \rightarrow +\infty$

این توابع را لردکلون پیشنهاد کرده است. از نظر ذهنی این یک مقیاس دمایی مطلق است. می‌خواهیم ثابت کنیم که این  $T$  همان دمای کلون در معادله حالت گاز کامل است. کافی است ثابت کنیم:

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_1(\text{گاز})}{T_3} \quad (۱۲۱-۵)$$

$$T_1 = T_2, T_3 = T_4 \quad (۱۲۲-۵)$$

$$\delta Q = C_v dT + PdV$$

$$dT = 0 \Rightarrow \delta Q = PdV \Rightarrow Q_{1-2} = \int_1^2 PdV = Q_{1-2} = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_H$$

$$Q_{3-4} = RT_3 \ln \frac{V_3}{V_4} = Q_L \quad \frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_1}{T_3} \cdot \frac{\ln \frac{V_2}{V_1}}{\ln \frac{V_3}{V_4}}$$

برای فرآیند 2-3

آدیاباتیکی

$$\rightarrow \delta Q = C_v dT + PdV \rightarrow 0 = C_v dT + \frac{RTdV}{V} \rightarrow$$

(۱۲۳ ۵)

$$C_v \frac{dT}{T} = -\frac{RdV}{V} \rightarrow C_v \ln \frac{T_2}{T_3} = -R \ln \frac{V_2}{V_3}$$

فرآیند 4-1



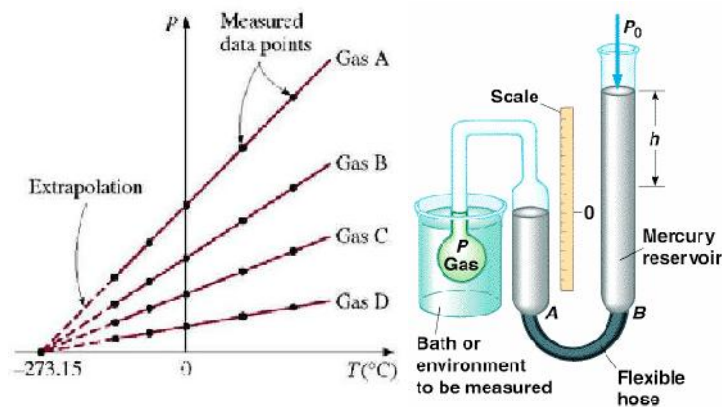
$$\begin{cases} C_V \ln \frac{T_1}{T_4} = -R \ln \frac{V_1}{V_4} \\ C_V \ln \frac{T_2}{T_3} = -R \ln \frac{V_2}{V_3} \\ T_1 = T_2 \\ T_3 = T_4 \end{cases} \rightarrow \frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_4} \rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad (5-124)$$

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_1}{T_3} = \frac{T_H}{T_L}$$

بنابراین نسبت دمایی منبع ها مانند نسبت دمای کلوین مربوط به گاز کامل است. رابطه فوق به مالمکان می دهد که یک دماسنج ذهسی طراحی کنیم بطوریکه به دمای سیال عامل یا نوع دماسنج بستگی نداشته باشد. اگر  $T_L$  را یک دمای مرجع فرض کنیم با اندازه گیری  $Q_H$ ,  $Q_L$  می توان دمای  $T_H$  را تعیین کرد.

**نکته:** دماسنج گازی است وسیله ای که می تواند دمای مطلق را نشان دهد. چون تنها وسیله ای است که تابع وسیله اندازه گیری نیست (شکل را ببینید). همانگونه که می دانید برای گاز کامل دما با حاصل ضرب فشار و حجم متناسب است. از این رو می توان از گاز به عنوان سیال عامل در یک دماسنج حجم ثابت استفاده نمود. با استفاده از این واقعیت که  $PV$  همه گازها در یک دمای واحد به صفر میل می کند منجر به ایجاد یک مقیاس دمایی بر مبنای صفر مطلق شده است. همانگونه که قبلا نیز اشاره شد این مقیاس، مقیاس دمایی کلوین نام دارد که به افتخار لرد کلوین نام گذاری شده است. شکل رابطه خطی بین فشار گاز و دما را برای مقادیر مختلف گازها نمایش می دهد. شیب این خطوط بستگی به تعداد مول های گاز و حجم گاز دارد ولی در هر حال در نهایت همه این خطوط در دمای ثابتی ( $-273.15^\circ\text{C}$ ) به فشار صفر می رسند. رابطه مقیاس دمایی کلوین با درجه سلسیوس به صورت زیر می باشد:

$$T_K = T_C + 273.15 \quad (5-125)$$



**شکل ۵-۴۳.** دماسنج گازی در فشارهای مختلف در نهایت همه گازها در فشار بسیار پایین در دمای واحدی به هم می رسند که معادل  $-273.15$  می باشد که همان مبنای دمای کلوین می باشد

## مراجع برای مطالعه بیشتر

1. R.E. Sonntag, C. Borgnakke and G.J. Van Wylen, **Fundamentals of Thermodynamics**, John Wiley & Sons, New York, 1997
2. M.W. Zemansky and R. H. Dittman, **Heat and Thermodynamics**, McGraw-Hill, 1997
3. Y.A. Cengel and M.A. Boles, **Thermodynamics: An Engineering Approach**, McGraw-Hill, New York, 2002
4. J.S. Hsieh, **Engineering Thermodynamics**, Prentice Hall, 1993
5. A. Bejan, **Advanced Engineering Thermodynamics**, John Wiley & Sons, New York, 1988