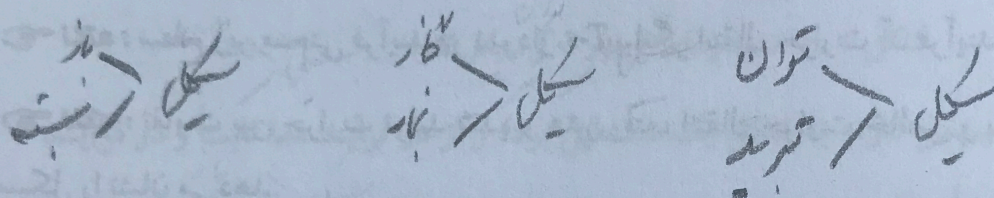


## سیکل های توانی گاز

۱



### ۱-۱- مقدمه

عملیاتی که در آن سیال عامل تعدادی فرآیند را طی کرده و در نهایت به حالت اولیه باز می‌گردد، سیکل نامیده می‌شود. سیکل‌های ترمودینامیکی را می‌توان بسته به فاز سیال عامل، به سیکل‌های گاز و سیکل‌های بخار دسته‌بندی کرد. در سیکل‌های گازی سیال عامل در سرتاسر سیکل در فاز گاز باقی مانده، در صورتی که در سیکل‌های بخار، سیال عامل در بخشی از سیکل در فاز بخار و در بخش دیگر در فاز مایع باشد.

از طرف دیگر سیکل‌های ترمودینامیکی را می‌توان به سیکل‌های باز و بسته نیز تقسیم‌بندی کرد. در سیکل‌های بسته سیال عامل در پایان سیکل به حالت اولیه بازگشته و مجدداً به گردش درمی‌آید، در حالی که در سیکل‌های باز، سیال عامل در پایان هر سیکل با سیال جدید جایگزین می‌شود.

### ۱-۲- ملاحظات پایه در تحلیل سیکل‌های توانی

فرضیات و ساده‌سازی‌های اعمال شده در تحلیل سیکل‌های توانی عبارتند از:

(۱) سیکل شامل هیچ اصطکاکی نیست، لذا هیچ افت فشاری حین جاری شدن سیال عامل در لوله‌ها یا دستگاه‌هایی از قبیل مبدل‌های حرارتی ایجاد نمی‌شود.

(۲) تمامی فرآیندهای انبساط و تراکم در حالت شبه تعادلی رخ می‌دهند.



۳) لوله‌های واصل اجزا گوناگون یک سیستم کاملاً عایق‌بندی شده و انتقال حرارت از آن‌ها ناچیز است.

👉 **نکته:** سیکل‌های ایده‌آل، بازگشت‌پذیر درونی بوده و برخلاف سیکل کارنو لزوماً بازگشت‌پذیر خارجی نیستند.

👉 **نکته:** در فرآیند حالت پایدار بازگشت‌پذیر که تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در آن قابل اغماض باشد، کار محوری به ازای واحد جرم عبارتست از:

$$W = - \int v dp \quad (1-1)$$

در فرآیند بازگشت‌پذیر یک ماده تراکم‌پذیر ساده، مقدار کار مرز متحرک به ازای واحد جرم عبارتست از:

$$W = \int p dv \quad (2-1)$$

👉 **نکته:** سطح زیر منحنی فرآیند در نمودار  $T-s$  بیانگر انتقال حرارت آن فرآیند است.

👉 **نکته:** تفاوت بین حرارت تولید شده و هدر رفته، انتقال حرارت خالص و بالطبع کار حاصل از سیکل را نشان می‌دهد.

👉 **نکته:** بازده حرارتی یک سیکل از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (3-1)$$

یا

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} \quad (4-1)$$

### ۱-۳- سیکل استاندارد هوایی کارنو

همان‌طور که در شکل (۱-۱) مشاهده می‌شود، سیکل کارنو شامل چهار فرآیند بازگشت‌پذیر است. این چهار فرآیند عبارتند از:

(۱) انتقال حرارت هم‌دما

(۲) انبساط آیزنتروپیک

(۳) انتقال حرارت هم‌دما

(۴) تراکم آیزنتروپیک

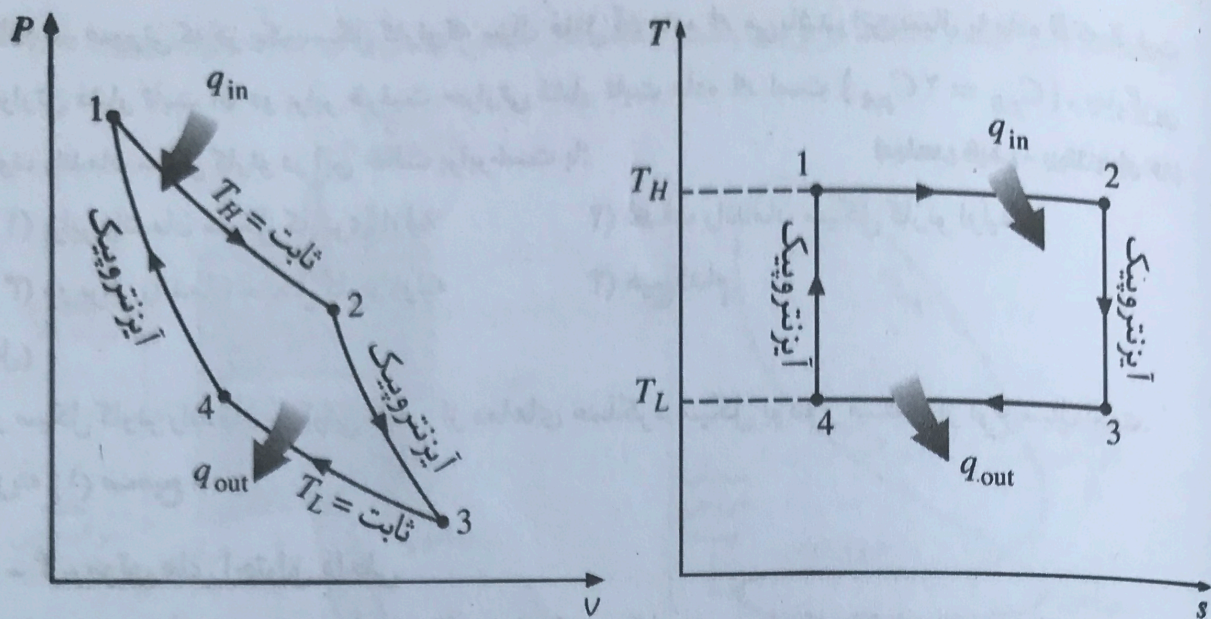
(۲ → ۱) دما ثابت

(۳ → ۲) انتروپی ثابت

(۴ → ۳) دما ثابت

(۱ → ۴) انتروپی ثابت





شکل ۱-۱: نمودارهای  $p-v$  و  $T-s$  سیکل کارنو

**تعریف:** نمودار  $T-s$  سیکل کارنو به شکل یک مستطیل بوده و از دو فرایند دما ثابت و دو فرایند انتروپی ثابت تشکیل شده است.

**تعریف:** بازده حرارتی سیکل کارنو عبارتست از:

$$\eta_{th, carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (۵-۱)$$

$T_H$ : دمای منبع حرارتی دما بالا

$T_L$ : دمای منبع حرارتی دما پایین

**تعریف:** بازده حرارتی سیکل کارنو تنها تابعی از دماهای عملکرد سیکل بوده و مستقل از نوع سیال عامل است.

**تعریف:** به منظور افزایش بازده حرارتی سیکل کارنو به دو طریق می توان اقدام کرد:

(۱) افزایش دمای  $T_H$  در حین ثابت ماندن  $T_L$  (افزایش دمای میانگین که در آن حرارت برای سیستم تولید می شود)

(۲) کاهش دمای  $T_L$  در حین ثابت ماندن  $T_H$  (کاهش دمای میانگین که در آن حرارت از سیستم دفع می شود)

**تعریف:** سیکل استاندارد هوایی کارنو قابل اجرا نبوده و به عنوان یک استاندارد برای مقایسه سایر سیکل ها ارزش دارد.



مثال) در صورتی که در یک سیکل کارنو که سیال عامل آن ماده  $A$  می باشد، این سیال با ماده  $B$  که ظرفیت حرارتی فشار ثابت آن دو برابر ظرفیت حرارتی فشار ثابت ماده  $A$  است ( $C_{pB} = 2C_{pA}$ )، جایگزین شود، راندمان سیکل کارنو در این حالت برابر است با:

(مهندس شیمی - بیوتکنولوژی ۸۴)

- (۱) برابر راندمان سیکل کارنوی اولیه  
(۲) نصف راندمان سیکل کارنو اولیه  
(۳) دو برابر راندمان سیکل کارنو اولیه  
(۴) هیچ کدام

(حل)

در سیکل کارنو راندمان حرارتی تابعی از دماهای عملکرد سیکل بوده و مستقل از نوع سیال است. گزینه (۱) صحیح است.

#### ۱-۴- موتورهای احتراق داخلی

چون در موتورهای احتراق داخلی، سیال عامل یک سیکل ترمودینامیکی کامل را نمی پیماید، (هر چند موتور در یک سیکل مکانیکی کار می کند) موتور در یک سیکل باز کار می کند. همان طور که در شکل (۱-۲-ب) مشاهده می شود، یک موتور احتراق داخلی که به موتورهای رفت و برگشتی نیز مشهورند، شامل محفظه سیلندری است که در آن پیستون بین نقطه مرگ بالا ( $TDC$ ) و نقطه مرگ پائین ( $BDC$ ) حرکت رفت و برگشتی انجام می دهد. فاصله بین  $TDC$  و  $BDC$  کورس پیستون نامیده می شود. مخلوط هوا - سوخت از سوپاپ ورودی وارد سیلندر و محصولات احتراق (دود) از سوپاپ خروجی خارج می شود. در شکل (۱-۲-الف) نمودار  $p-v$  حقیقی سیکل طی شده توسط یک موتور احتراق داخلی نشان داده شده است. در موتورهای احتراق داخلی هوا نقش سیال عامل سیکل و سوخت نقش منبع حرارتی را ایفا می کند.

👉 **تعریف:** نسبت حداکثر حجم شکل گرفته در سیلندر به حداقل حجم آن، نسبت تراکم ( $r$ ) نامیده می شود.

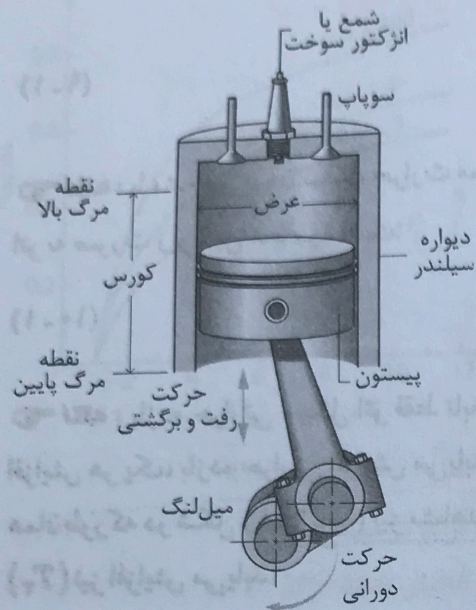
$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}} \quad (۱-۶)$$

👉 **اصطلاح:** «فشار مؤثر متوسط» عبارتست از فشاری که اگر در طی تمام مرحله قدرت (شکل ۱-۲-الف) بر پیستون وارد گردد، کاری برابر با کار واقعی انجام شده، صورت دهد. بنابراین فشار مؤثر متوسط از رابطه زیر قابل محاسبه است:

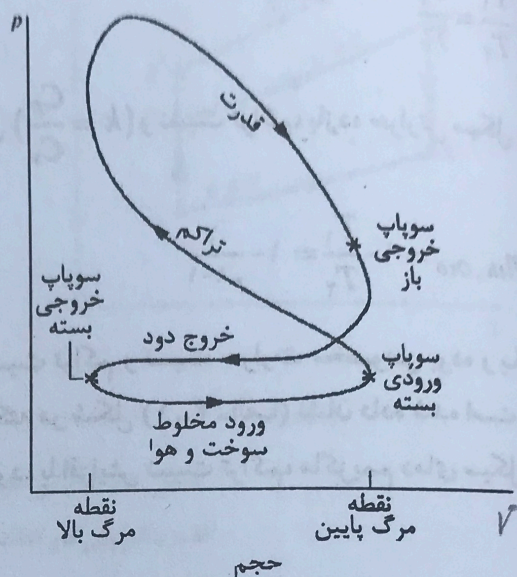
$$MEP = \frac{W_{net}}{(V_{max} - V_{min})} = \frac{w_{net}}{(v_{max} - v_{min})} \quad (kPa) \quad (۱-۷)$$



نکته: هر چقدر  $MEP$  موتور بیشتر باشد، کار خالص بیشتر و در نتیجه بازده بهتری خواهد داشت.



(ب)



(الف)

شکل ۱ - ۲. نمودار  $p-v$  و قسمت‌های متفاوت یک سیلندر در موتورهای احتراق داخلی

### ۱-۵- سیکل استاندارد هوایی اتو

سیکل استاندارد هوایی اتو، سیکل ایده‌آلی است که موتور احتراق داخلی اشتعال جرقه‌ای را با آن تقریب می‌زنند. در شکل (۱-۳) نمودارهای  $p-v$  و  $T-s$  این سیکل نشان داده شده است. سیکل اتو شامل فرایندهای زیر است:

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| (۱) تراکم آیزتروپیک       | (۲ → ۱) حرکت پیستون از نقطه مرگ پایین به نقطه مرگ بالا |
| (۲) انتقال حرارت حجم ثابت | (۳ → ۲) پیستون در حالت سکون در نقطه مرگ بالا قرار دارد |
| (۳) انبساط آیزتروپیک      | (۴ → ۳) حرکت پیستون از نقطه مرگ بالا به نقطه مرگ پایین |
| (۴) انتقال حرارت حجم ثابت | (۱ → ۴) پیستون در نقطه مرگ پایین قرار دارد             |

نکته: سیکل استاندارد هوایی اتو از دو فرآیند حجم ثابت و دو فرآیند انتروپی ثابت تشکیل شده است.

نکته: در سیکل استاندارد هوایی اتو با استفاده از تعریف نسبت تراکم و روابط فرایندهای آیزتروپیک، روابط زیر برقرار است:



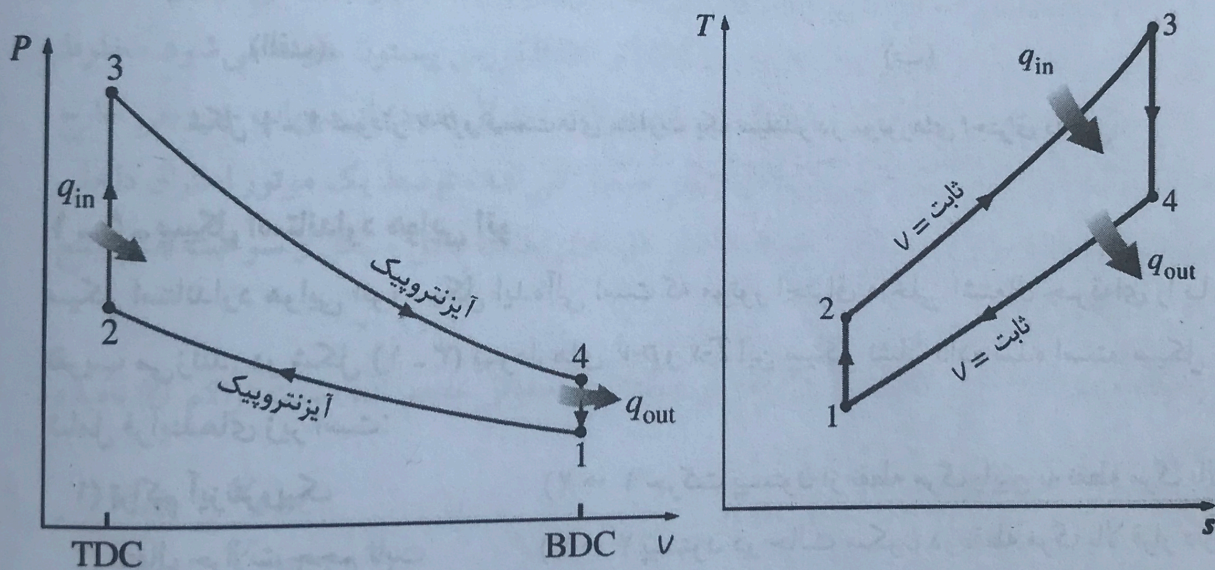
$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} \quad (8-1)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} \quad (9-1)$$

با مشخص بودن نسبت حرارت مخصوص ( $k = \frac{C_p}{C_v}$ ) و نسبت تراکم، بازده حرارتی سیکل اتو به صورت زیر قابل محاسبه است:

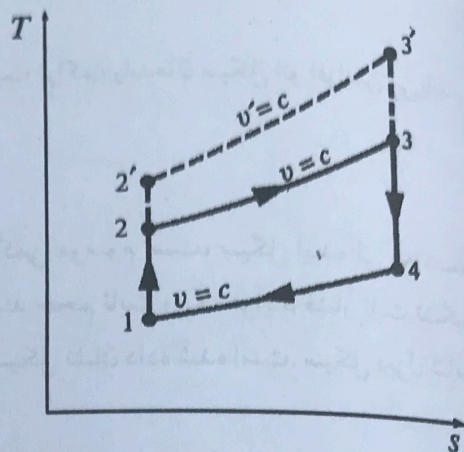
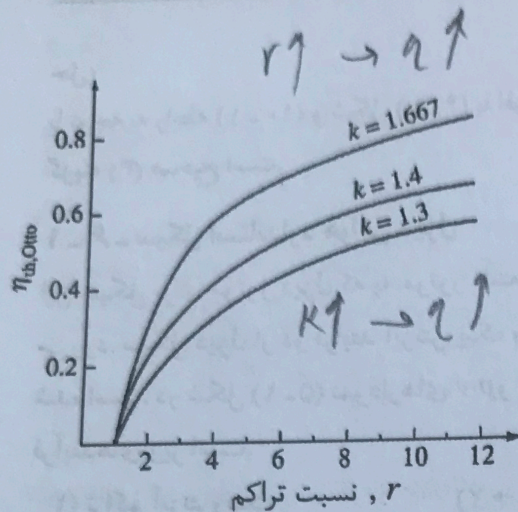
$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (10-1)$$

بازده حرارتی سیکل اتو فقط تابعی از نسبت تراکم و نسبت حرارت مخصوص بوده و با افزایش هر یک، بازده حرارتی افزایش می‌یابد. این نکته در شکل (۱-۴-الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱-۴-ب) نیز مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت تراکم، ماکزیمم دمای سیکل ( $T_3$ ) نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱-۳. نمودار  $T-s$  و  $p-v$  سیکل استاندارد هوایی اتو





(ب)

(الف)

شکل ۱ - ۴. تأثیر تغییر نسبت تراکم در سیکل اتو

الف - افزایش کار خالص در اثر افزایش نسبت تراکم

ب - افزایش بازده حرارتی نسبت به افزایش نسبت تراکم و افزایش نسبت حرارت مخصوص

مثال) در یک سیکل اتو حداکثر و حداقل درجه حرارت هوا به ترتیب  $1350^\circ C$  و  $400^\circ C$  می باشد. اگر راندمان سیکل اتو  $85\%$  راندمان سیکل کارنویی باشد که بین همان درجه حرارت ها کار می کند، نسبت تراکم

سیکل اتو چقدر است؟ ( $k = \frac{C_p}{C_v} = 1.4$ ) (مهندسی مکانیک ۸۱)

۱/۹۹ (۱) ۴/۹۸ (۲) ۵/۵۸ (۳) ۶/۷۳ (۴)

حل)

$$\eta_{th, Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(400 + 273)}{(1350 + 273)} = 0.585 \Rightarrow \eta_{th, Otto} = 0.585 \times \left( \frac{85}{100} \right) = 0.497$$

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \Rightarrow 0.497 = 1 - \frac{1}{r^{0.4}} \Rightarrow r = 5.58$$

گزینه (۳) صحیح است.

مثال) در سیکل اتو برای افزایش راندمان کدام مورد را باید افزایش داد؟

(کارایی به کارشناسی لایپسونگ متالیک آ (اد ۸۰))

(۲) دمای ورودی

(۱) دمای حداکثر سیکل

(۴) فشار ورودی

(۳) نسبت تراکم



حل)

با توجه به رابطه (۱۰-۱) و شکل (۴-۱) با افزایش نسبت تراکم، راندمان سیکل اتو افزایش می‌یابد. گزینه (۳) صحیح است.

### ۱-۶- سیکل استاندارد هوایی دیزل

این سیکل برای موتور دیزل که به موتور اشتعال - تراکمی موسوم است، سیکل ایده‌آلی به شمار می‌رود. سیکل دیزل از دو فرایند آیزتروپیک و یک فرایند حجم ثابت و یک فرایند فشار ثابت تشکیل شده است. در شکل (۵-۱) نمودارهای  $p-v$  و  $T-s$  این سیکل نشان داده شده است. سیکل دیزل شامل فرایندهای زیر است:

(۱) تراکم آیزتروپیک  $1 \rightarrow 2$  حرکت پیستون از نقطه مرگ پایین به نقطه مرگ بالا)

(۲) انتقال حرارت فشار ثابت  $2 \rightarrow 3$  با ثابت ماندن فشار پیستون به سمت نقطه مرگ پایین حرکت می‌کند)

(۳) انبساط آیزتروپیک  $3 \rightarrow 4$  ادامه حرکت پیستون به سمت نقطه مرگ پایین)

(۴) انتقال حرارت حجم ثابت  $4 \rightarrow 1$  پیستون در نقطه مرگ پائین قرار دارد)

👉 **مثال ۱:** در سیکل استاندارد هوایی دیزل، نسبت تراکم آیزتروپیک  $(\frac{v_1}{v_2})$  بزرگتر از نسبت انبساط آیزتروپیک  $(\frac{v_3}{v_4})$  است.

👉 **مثال ۲:** با توجه به همگرایی خطوط فشار ثابت و حجم ثابت در نمودار  $T-s$  می‌توان دریافت که با افزایش حداکثر درجه حرارت سیکل ( $T_3$ )، راندمان سیکل کاهش خواهد یافت. در واقع افزایش حداکثر درجه حرارت سیکل مستلزم افزودن مقدار زیادی حرارت به سیکل بوده در حالی که افزایش کار حاصل از آن نسبتاً کم است.

👉 **مثال ۳:** در موتور دیزل در مرحله تراکم فقط هوا متراکم می‌شود.

👉 **مثال ۴:** با توجه به دماهای عملکردی سیکل، راندمان حرارتی به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\eta_{th, Diesel} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{k T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (11-1)$$

👉 **مثال ۵:** اگر نسبت حجم سیلندر بعد و قبل از فرایند احتراق با  $r_c$  (Cut of ratio) نشان داده شود، راندمان حرارتی سیکل دیزل به صورت زیر قابل محاسبه است. شایان ذکر است که در سیکل اتو  $r_c = 1$  است.



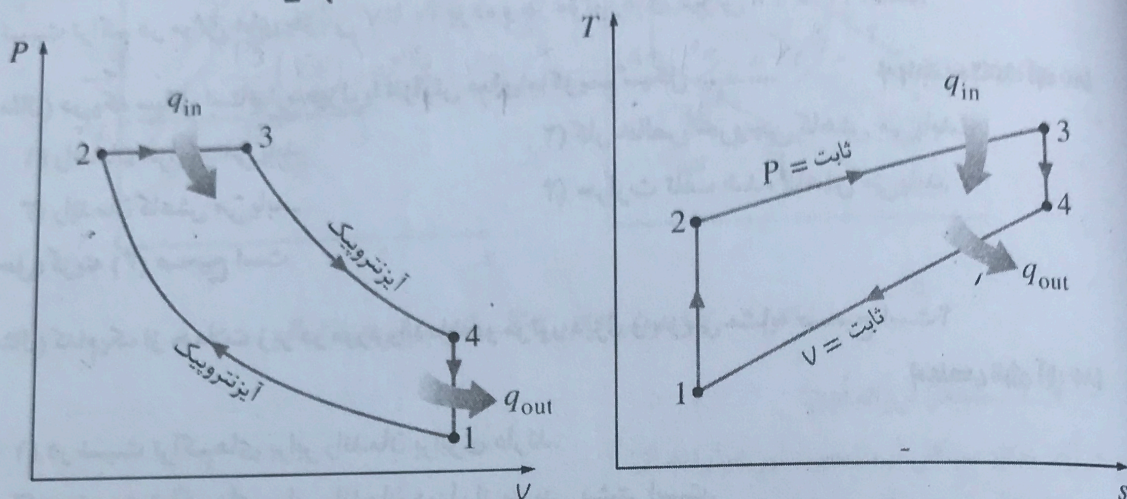
$$r_c = \frac{v_3}{v_4}$$

(۱۲-۱)

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

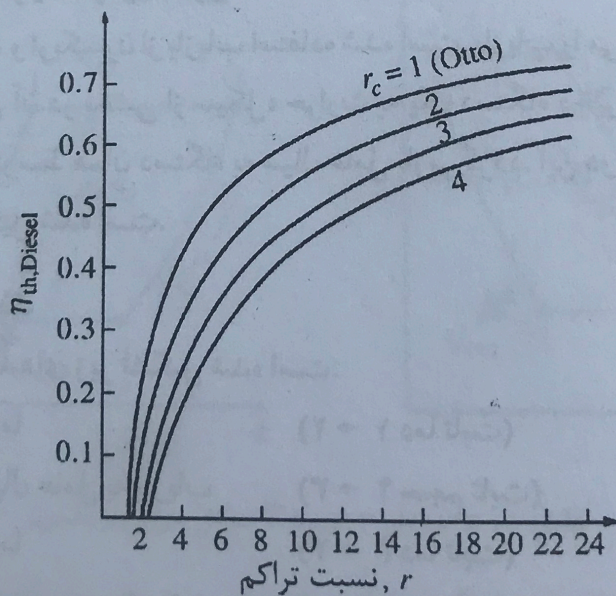
(۱۳-۱) از رابطه (۸-۱) محاسبه می شود.

(۱۳-۱)



شکل ۱-۵: نمودار  $p-v$  و  $T-s$  سیکل استاندارد هوایی دیزل

در شکل (۱-۶) تغییرات راندمان حرارتی سیکل دیزل برحسب نسبت تراکم و  $r_c$  مشاهده می شود. اگر نسبت تراکم سیکل های اتو و دیزل را برابر فرض کنیم، راندمان سیکل اتو بیشتر خواهد بود.



شکل ۱-۶: تغییرات راندمان حرارتی سیکل دیزل برحسب نسبت تراکم و  $r_c$



نکته: اگر سیکل های اتو و دیزل در نسبت تراکمی که در عمل برای هر یک قابل دستیابی است، مقایسه شوند، راندمان سیکل دیزل بیشتر خواهد بود. زیرا در عمل موتورهای دیزلی (اشتعال تراکمی) در نسبت تراکم بزرگتری نسبت به موتورهای بنزینی (اشتعال جرقه ای) کار می کنند. محدوده متعارف نسبت تراکم در موتورهای بنزینی ۷ تا ۱۰ بوده و در موتورهای دیزلی ۱۲ تا ۲۳ است.

مثال) در یک سیکل استاندارد دیزل با افزایش دمای ماکزیمم سیکل ..... (مهندسی مکانیک آزاد ۸۶)

(۱) راندمان افزایش می یابد. (۲) کار خالص خروجی کاهش می یابد.

(۳) راندمان کاهش می یابد. (۴) حرارت تلف شده کاهش می یابد.

حل) گزینه (۳) صحیح است.

مثال) کدام یک از جملات زیر در مورد راندمان دو موتور دیزل و بنزینی مشابه صحیح است؟

(مهندسی انرژی آزاد ۸۶)

(۱) در نسبت تراکم های برابر راندمان برابری دارند.

(۲) در نسبت تراکم های برابر راندمان دیزل از بنزینی بیشتر است.

(۳) در نسبت تراکم های برابر راندمان بنزینی از دیزل بیشتر است.

(۴) هیچ کدام

حل) گزینه (۳) صحیح است.

#### ۱-۷-۱ - سیکل های استرلینگ و اریکسون

در سیکل های استرلینگ و اریکسون از بازیاب استفاده شده است. بازیاب را می توان به عنوان فرآیندی در نظر گرفت که در حین آن در بخشی از سیکل، حرارت به یک دستگاه ذخیره انرژی حرارتی منتقل شده و در بخشی دیگر توسط همان دستگاه به سیال عامل بازمی گردد. این دو سیکل هر یک از چهار فرایند بازگشت پذیر تشکیل شده است.

#### ۱-۷-۱ - سیکل استرلینگ

سیکل استرلینگ از فرآیندهای زیر تشکیل شده است:

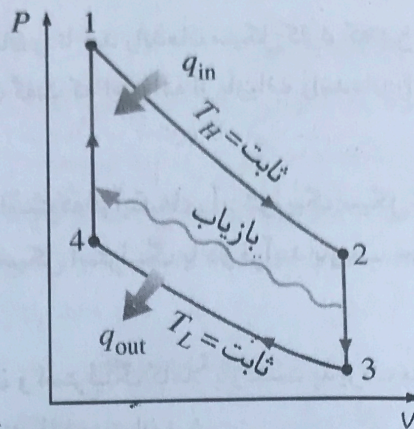
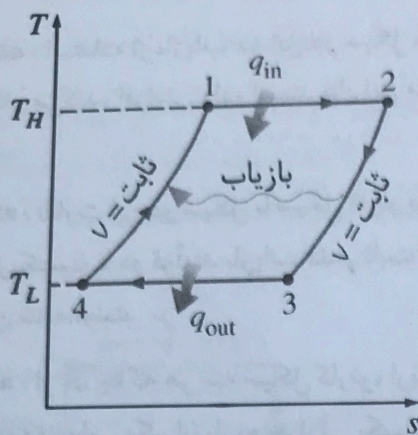
(۱) انتقال حرارت هم دما (۲ → ۱ دما ثابت)

(۲) انتقال حرارت از سیال عامل به بازیاب (۳ → ۲ حجم ثابت)

(۳) انتقال حرارت هم دما (۴ → ۳ دما ثابت)

(۴) انتقال حرارت از بازیاب به سیال عامل (۱ → ۴ حجم ثابت)





شکل ۱-۷. نمودار  $p-v$  و  $T-s$  سیکل هوایی استرلینگ

### ۱-۷-۲- سیکل اریکسون

فرآیندهای سیکل اریکسون نیز عبارتند از:

(۱ → ۲) دما ثابت

(۱) انتقال حرارت هم دما

(۲ → ۳) فشار ثابت

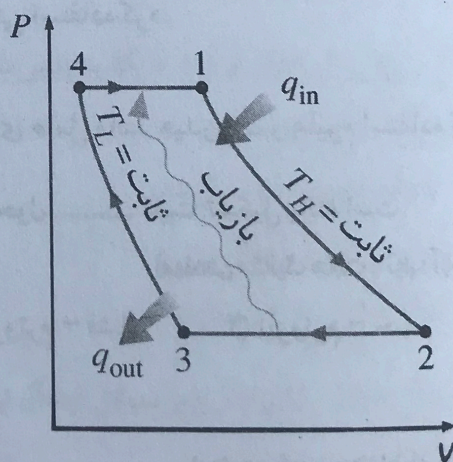
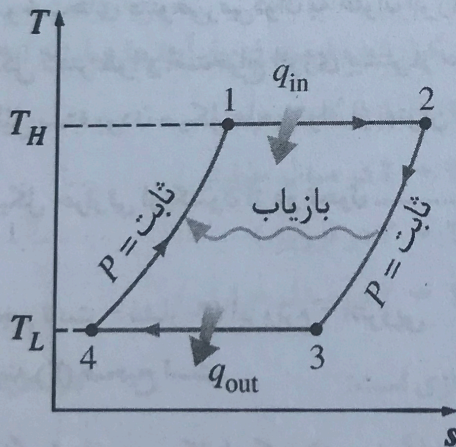
(۲) انتقال حرارت از سیال عامل به بازیاب

(۳ → ۴) دما ثابت

(۳) انتقال حرارت هم دما

(۴ → ۱) فشار ثابت

(۴) انتقال حرارت از بازیاب به سیال عامل



شکل ۱-۸. نمودار  $p-v$  و  $T-s$  سیکل هوایی اریکسون

👉 نکته: در هر دو سیکل استرلینگ و اریکسون انتقال حرارت در فرآیندهای هم دما صورت می‌گیرد. بنابراین سرعت عملکرد سیکل بسیار پایین بوده که این امر از خصوصیات فرآیندهای بازگشت‌پذیر است.



👉 **نکته:** استفاده از بازیاب در این دو سیکل، راندمان را تا حد راندمان سیکل کارنو که بین دماهای مشابه کار می‌کند، افزایش داده است. بنابراین می‌توان گفت که استفاده از بازیاب راندمان را افزایش می‌دهد.

👉 **نکته:** تفاوت این دو سیکل با سیکل کارنو در این است که فرآیندهای آیزوتروپیک سیکل کارنو، در سیکل اریکسون با دو فرآیند بازیاب فشار ثابت و در سیکل استرلینگ با دو فرآیند بازیاب حجم ثابت جایگزین شده است.

👉 **نکته:** از آن جا که هر سه سیکل کارنو، اریکسون و استرلینگ کاملاً بازگشت پذیرند، بنابراین در یک محدوده دمایی یکسان بازده حرارتی یکسانی دارند. لذا می‌توان نوشت:

$$\eta_{th, Stirling} = \eta_{th, Ericsson} = \eta_{th, Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (14-1)$$

👉 **نکته:** دستیابی به چنین سیکل‌هایی از مشکلات عملی برخوردار بوده، اما در توربین‌های گازی با استفاده از تجهیزاتی همچون سردکن میانی و بازیاب کوششی برای نزدیک شدن به سیکل اریکسون صورت گرفته است.

👉 **نکته:** موتورهای استرلینگ و اریکسون، موتورهای احتراق خارجی بوده و سوخت در خارج از سیلندر می‌سوزد. از مزایای موتورهای احتراق خارجی به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- (۱) از سوخت‌های متنوعی می‌توان به عنوان انرژی حرارتی استفاده کرد.
- (۲) آلودگی کمتر هوا و استخراج انرژی بیشتر از سوخت
- (۳) به دلیل بسته بودن سیکل‌ها می‌توان از بهترین سیال‌های عامل مانند هیدروژن و هلیوم استفاده کرد.

مثال) سیکل حرارتی اریکسون از دو تحول ..... و دو تحول ..... ثابت تشکیل یافته است.

(مهندسی مکانیک سافت و تولید آزاد ۷۶)

(۱) حجم ثابت - فشار (۲) ایزوترم - انتروپی (۳) ایزوترم - فشار (۴) ایزوترم - حجم  
حل) گزینه (۳) صحیح است.

مثال) ویژگی اصلی در سیکل اریکسون:

(مهندسی شیمی بیوتکنولوژی آزاد ۸۶)

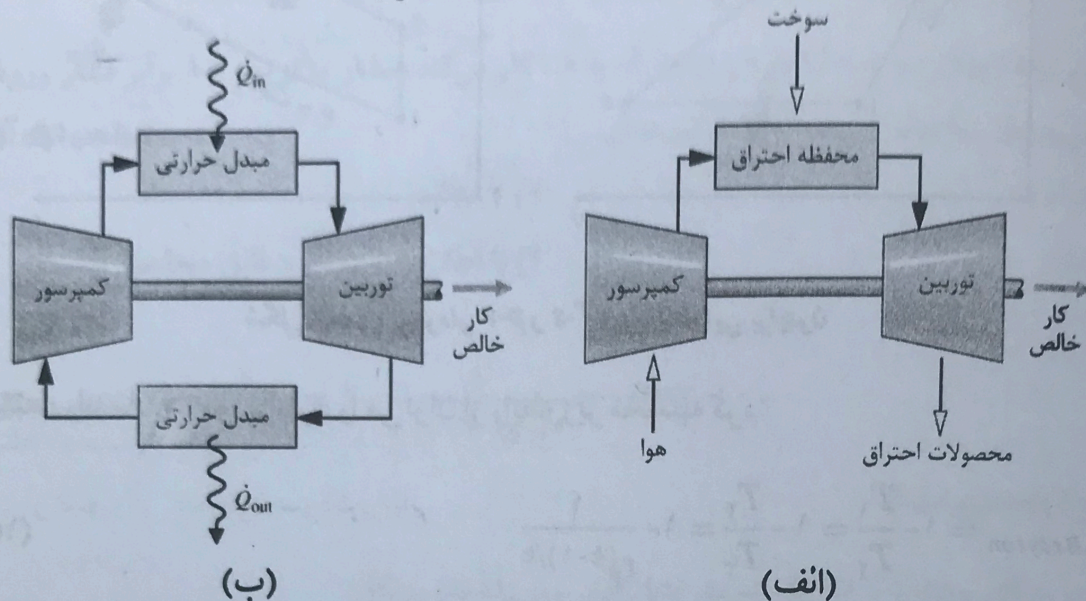
- (۱) تبدیل گاز به مایع است.
- (۲) انجام فرآیند انبساط و تراکم در دمای ثابت است.
- (۳) افزایش میزان ظرفیت انرژی است.
- (۴) ایجاد سرمایش لازم است.

حل) گزینه (۳) صحیح است.



## ۱- ۸- سیکل برایتون

سیکل استاندارد هوایی برایتون، سیکل ایده آل برای توربین گاز ساده به شمار می‌رود. طرح واره توربین گاز ساده با سیکل باز و سیکل بسته در شکل (۱- ۹) نشان داده شده است. در سیکل باز از فرآیند احتراق داخلی و در سیکل بسته از فرآیندهای انتقال حرارت استفاده شده است.



شکل ۱- ۹: طرح واره توربین گاز ساده

الف - سیکل باز، ب - سیکل بسته

سیکل برایتون از چهار فرآیند بازگشت پذیر داخلی تشکیل شده است. این فرآیندها عبارتند از:

- |                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| (۱) تراکم آیزنتروپیک       | (۲ → ۱) در مبدل حرارتی |
| (۲) انتقال حرارت فشار ثابت | (۳ → ۲) در توربین      |
| (۳) انبساط آیزنتروپیک      | (۴ → ۳) در مبدل حرارتی |
| (۴) انتقال حرارت فشار ثابت | (۱ → ۴) در کمپرسور     |

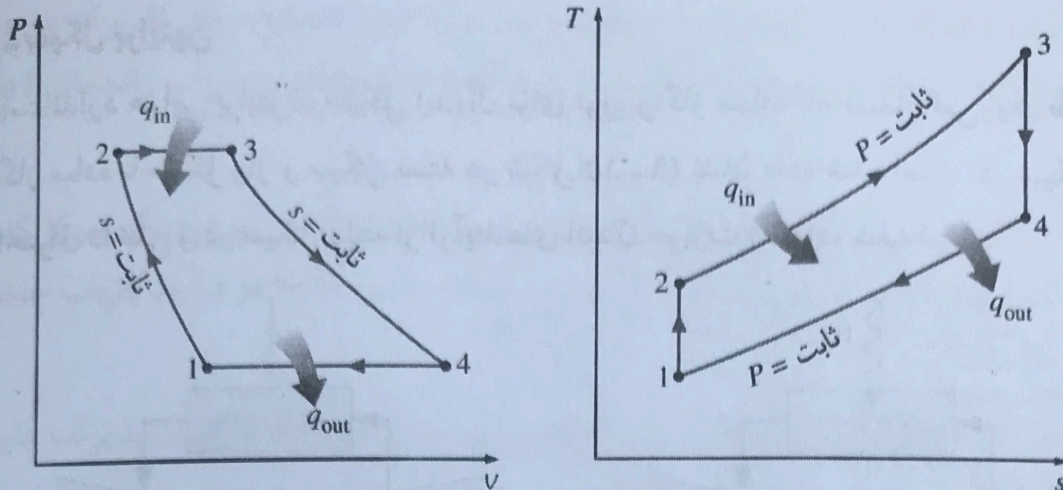
(مهندسی شیمی ۸۲)

مثال) کدام یک از سیکل های زیر سیکل ایده آل نیروگاه گازی است:

- |           |             |
|-----------|-------------|
| (۱) دیزل  | (۲) رنکین   |
| (۳) کارنو | (۴) برایتون |

حل) گزینه (۳) صحیح است.



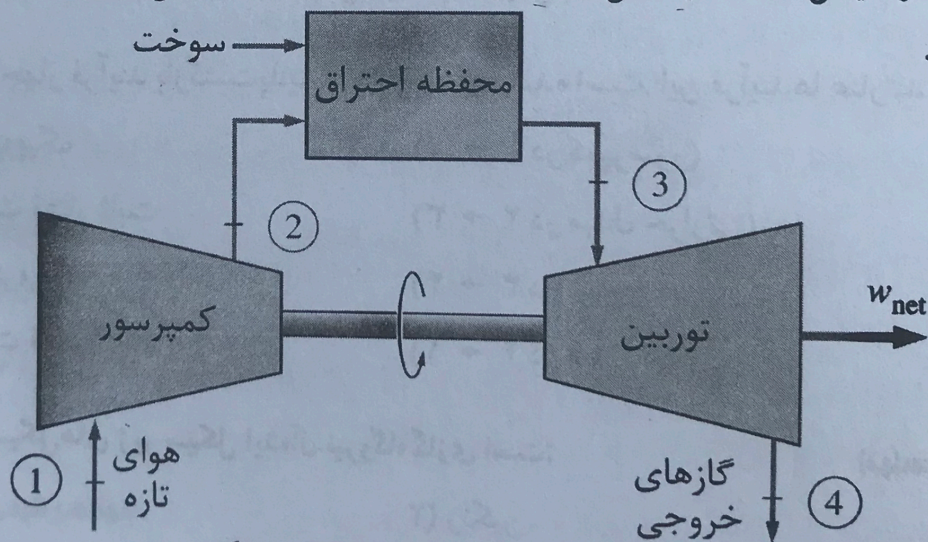


شکل ۱-۱۰: نمودار  $T-s$  و  $p-v$  سیکل هوایی برای تون

👉 **نتیجه:** راندمان سیکل برای تون را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad (۱۵-۱)$$

که  $r_p = p_2/p_1$  (نسبت فشار) و  $k$  نسبت گرمای ویژه است. در واقع  $P_2$  بیشترین فشار سیکل و  $P_1$  کمترین فشار سیکل است. در شکل (۱-۱۱) قسمت های مختلف سیکل باز یک توربین گاز نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۱: سیکل باز یک توربین گاز

👉 **نتیجه:** با توجه به رابطه (۱-۱۵) می توان گفت که راندمان سیکل استاندارد هوایی برای تون، تابعی از نسبت فشار آیزنتروپیک (کمپرسور) بوده و با افزایش نسبت فشار افزایش می یابد.

👉 **نتیجه:** یکی از مهم ترین ویژگی های سیکل برای تون، زیاد بودن کار کمپرسور (پس کار) در مقایسه با کار توربین بوده، به طوری که کمپرسور به ۴۰٪ تا ۸۰٪ توان تولیدی توربین نیاز دارد.



نکته: به منظور بهبود راندمان سیکل حقیقی توربین گاز سه راه وجود دارد:

- (۱) افزایش دمای ورودی توربین (یا افزایش نسبت فشار)
- (۲) افزایش بازده اجزاء توربوماشینی (راندمان توربین و کمپرسور)
- (۳) اضافه کردن اصلاحاتی به سیکل اصلی (بازیاب و سردکن میانی)

مثال) در یک سیکل ساده استاندارد برایتون که با هوا کار می‌کند، فشار ماکزیمم ۱۰ برابر فشار ورودی به کمپرسور است. راندمان این سیکل عبارتست از:

(مهندسی انرژی آزاد ۸۶)

$$(۲) \quad ۰/۴۸۲$$

$$(۱) \quad ۰/۸۰۶$$

$$(۳) \quad ۰/۱$$

(۴) با اطلاعات موجود قابل محاسبه نیست.

حل)

$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} = 1 - \frac{1}{1.0^{(1/4-1)/1/4}} = ۰/۴۸۲$$

گزینه (۲) صحیح است.

مثال) در سیکل برایتون با افزایش نسبت فشار کمپرسور راندمان سیکل:

(مهندسی شیمی - مفاهین هیدروکربن‌ها آزاد ۸۵)

(۱) کاهش می‌یابد.

(۲) تغییری نمی‌کند.

(۳) افزایش می‌یابد.

(۴) بسته به مقدار نسبت فشار ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

حل) گزینه (۳) صحیح است.

#### ۱-۸-۱- انحراف سیکل‌های توربین گاز واقعی از ایده‌آل

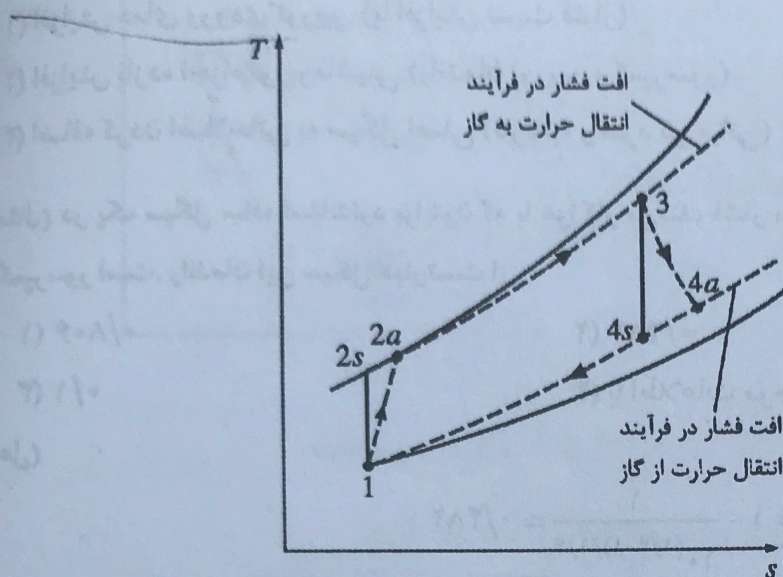
سیکل توربین گاز حقیقی به دلیل بازگشت‌ناپذیری‌های توربین و کمپرسور و همچنین افت فشار در گذرگاه‌های جریان و محفظه احتراق (مبدل حرارتی) با سیکل ایده‌آل تفاوت دارد. در حالت واقعی بازگشت‌ناپذیری‌ها موجب کاهش کار توربین و افزایش کار کمپرسور می‌گردند، لذا کار تولیدی توربین کمتر از حالت ایده‌آل و کار موردنیاز کمپرسور نیز بیشتر از حالت ایده‌آل است. در شکل (۱-۱۲) نقاط ۲a و ۴a حالات واقعی و نقاط ۲s و ۴s حالات آیزنتروپیک (ایده‌آل) می‌باشند. راندمان توربین و کمپرسور در حالت واقعی از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} \cong \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (۱-۱۶)$$



$$\eta_C = \frac{w_s}{w_a} \approx \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

(۱۷-۱)



شکل ۱-۱۲: مقایسه سیکل توربین گازی واقعی و ایده‌آل

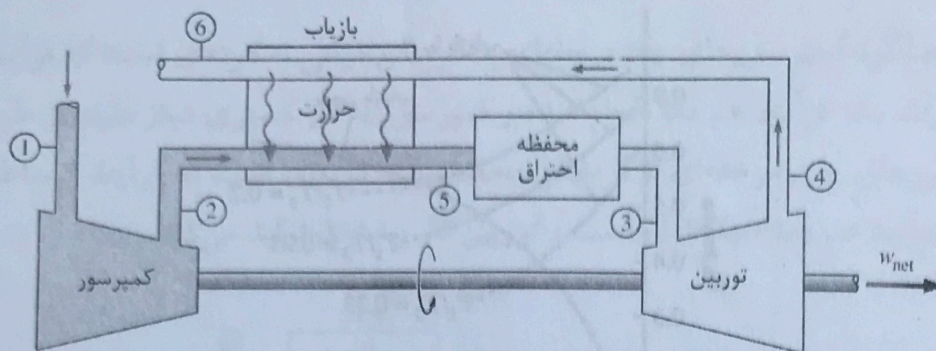
#### ۱-۸-۲- سیکل برایتون همراه با بازیاب

راندمان سیکل توربین گاز را می‌توان با بکارگیری بازیاب بهبود بخشید. از آنجا که دمای گازهای خروجی از توربین نسبت به کمپرسور بسیار بیشتر است، می‌توان به وسیله یک مبدل حرارتی (بازیاب) هوای پرفشار خروجی از کمپرسور را گرم کرد و از هدر رفتن حرارت جلوگیری کرد. این عمل قبل از ورود هوا به محفظه احتراق صورت می‌گیرد. در شکل (۱-۱۳) سیکل باز توربین گاز همراه با بازیاب و نمودار آن نشان داده شده است.

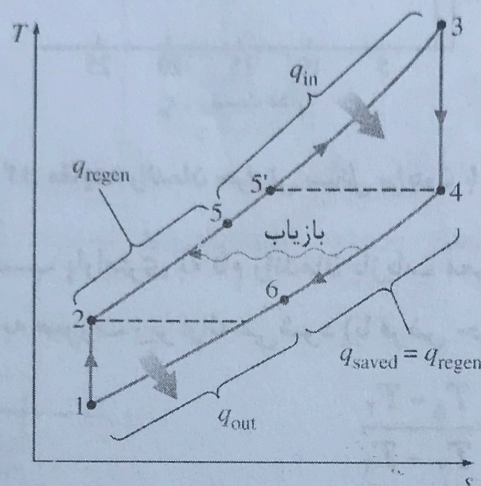
🔍 **نتیجه:** همان‌طور که در شکل (۱-۱۳-ب) مشاهده می‌شود، انتقال حرارت در محفظه احتراق فقط برای افزایش درجه حرارت از  $T_5$  به  $T_7$  لازم است.

🔍 **نتیجه:** در سیکل برایتون همراه با بازیاب از انرژی گازهای خروجی دفع شونده به محیط، برای پیش گرم کردن هوای ورودی به محفظه احتراق استفاده می‌شود، بنابراین راندمان حرارتی افزایش می‌یابد.





(الف)



(ب)

شکل ۱- ۱۳: سیکل باز توربین گاز همراه با بازیاب و نمودار  $T-s$  آن

👉 **نتیجه:** راندمان حرارتی سیکل برایتون با بازیاب از رابطه زیر محاسبه می شود:

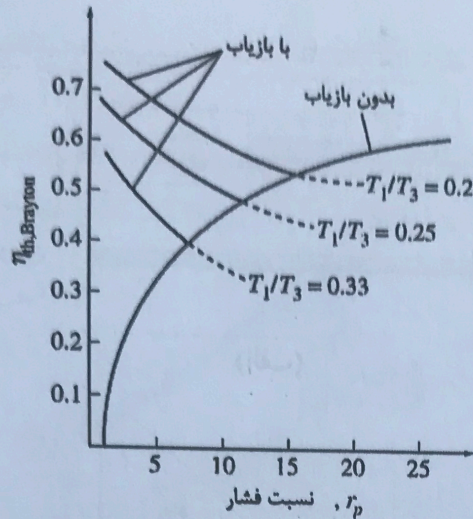
$$\eta_{th, regen} = 1 - \left( \frac{T_1}{T_3} \right) (r_p)^{(k-1)/k} \quad (۱۸-۱)$$

در این رابطه  $T_1$  و  $T_3$  به ترتیب کمترین و بیشترین دماهای سیکل هستند. در سیکل برایتون همراه با بازیاب، راندمان حرارتی به دو عامل نسبت فشار و نسبت کمترین و بیشترین دمای سیکل وابسته است.

👉 **نتیجه:** در سیکل ساده توربین گاز همراه با بازیاب، با افزایش نسبت فشار، راندمان سیکل کاهش خواهد یافت که این برخلاف سیکل برایتون است.

👉 **نتیجه:** در یک بازیاب ایده آل دمای هوای ورودی به محفظه احتراق برابر با دمای گازهای خروجی از توربین است. ( $T_{5'} = T_4$ )





شکل ۱- ۱۴: مقایسه راندمان حرارتی سیکل برایتون با و بدون بازیاب

☞ **نتیجه:** تأثیر بازیاب برحسب پارامتری به نام راندمان بازیاب معرفی می شود. راندمان بازیاب با توجه به شکل (۱- ۱۳- ب) به صورت زیر ارائه می شود (با فرض حرارت مخصوص ثابت):

$$\epsilon = \frac{q_{\text{regen, act}}}{q_{\text{regen, max}}} = \frac{h_5 - h_2}{h_5' - h_2} = \frac{T_5 - T_2}{T_5' - T_2} \quad (۱۹-۱)$$

☞ **نتیجه:** با استفاده از بازیاب با سطح انتقال حرارت بزرگ، راندمان بهتری ایجاد خواهد شد، اما این امر باعث افزایش افت فشار نیز می شود. بنابراین برای تعیین بازیاب باید افت فشار و راندمان بازیاب به طور همزمان در نظر گرفته شود.

### ۱- ۸- ۳- سیکل توربین گاز همراه با سرد کن میانی، گرمایش مجدد و بازیاب

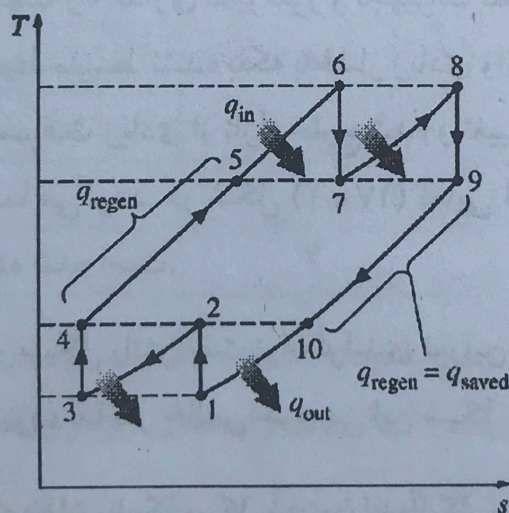
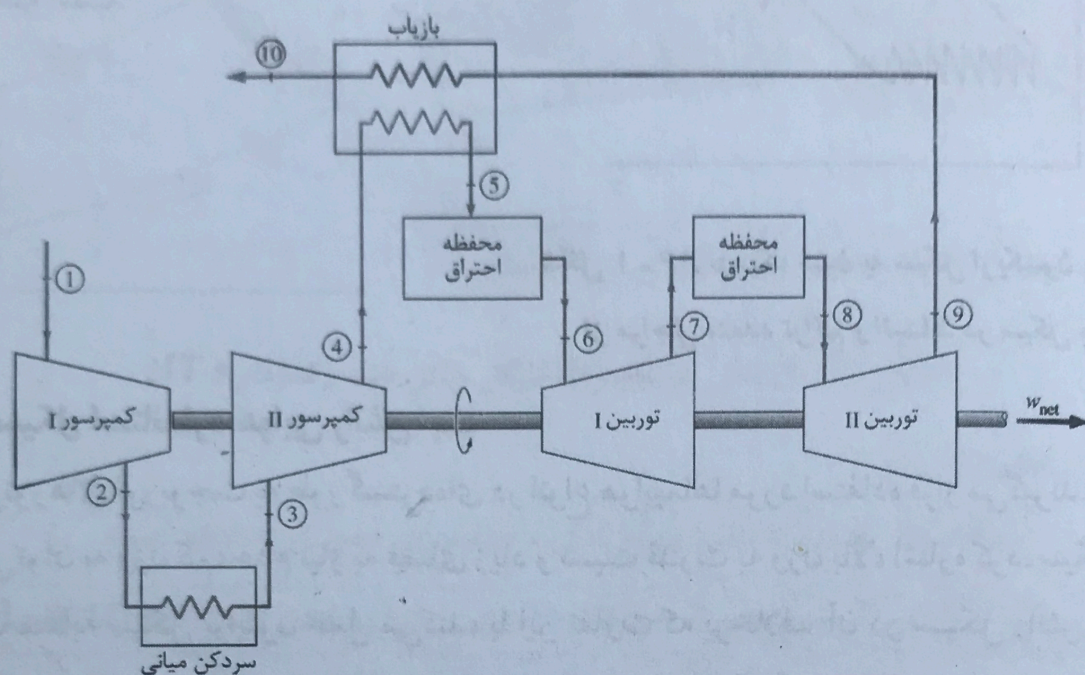
همان طور که در قبل گفته شد استفاده از بازیاب در سیکل اریکسون، راندمان را تا حد راندمان سیکل کارنوبی که بین دماهای مشابه کار می کند، افزایش می دهد. اما در عمل ایجاد تراکم و انبساط همدمای بازگشت پذیر مورد نیاز سیکل اریکسون غیرممکن است. در عمل نزدیک شدن به این سیکل، با استفاده از تراکم چند مرحله ای به همراه سرد کن میانی و انبساط چند مرحله ای با گرمایش مجدد و استفاده از بازیاب میسر خواهد بود. این امر در شکل (۱- ۱۵) نشان داده شده است.

☞ **نتیجه:** می توان نشان داد که برای این سیکل، بیشترین راندمان زمانی حاصل می شود که مراحل تراکم و یا انبساط از نسبت فشارهای یکسانی برخوردار باشند. برای سیکل شکل (۱- ۱۵) بیشترین راندمان زمانی حاصل می شود که:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} \quad \& \quad \frac{P_6}{P_5} = \frac{P_8}{P_7} \quad (۲۰-۱)$$



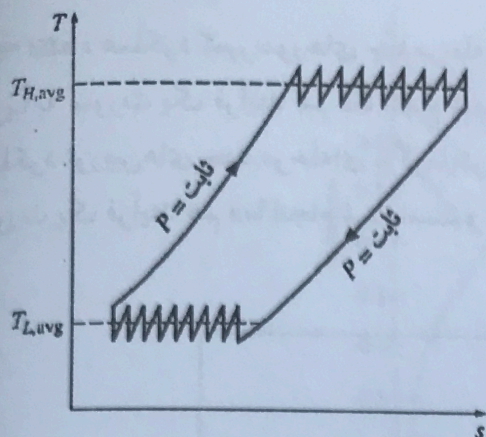
**نکته:** عملکرد کمپرسورهای چند مرحله‌ای با سرد کن میانی به گونه‌ای است که فرآیند تراکم تقریباً به صورت یک فرآیند هم دما انجام شده و کمپرسور به کار کمتری نیاز دارد. از طرف دیگر عملکرد توربین‌های چند مرحله‌ای با گرمایش مجدد نیز به گونه‌ای است که فرآیند انبساط تقریباً به صورت یک فرآیند هم دما انجام شده است و توربین کار بیشتری تولید می‌کند.



شکل ۱-۱۵: سیکل توربین گاز همراه با سرد کن میانی، گرمایش مجدد و بازیاب و نمودار  $T-s$  آن

**نکته:** عملکرد کمپرسور و توربین‌های چند مرحله‌ای در واقع براساس یک اصل ساده استوار است که: کار خالص تراکم یا انبساط به طور مستقیم با حجم مخصوص سیال متناسب است. بنابراین در زمان تراکم حجم مخصوص سیال تا حد ممکن باید کم بوده و در زمان انبساط حجم مخصوص سیال باید از بیشترین حد ممکن برخوردار باشد.





👉 **نتیجه:** اگر از مراحل متعدد تراکم و انبساط استفاده شود، می‌توان به سیکل اریکسون نزدیک شد (شکل ۱-۱۶). اما در عمل به دلیل افت‌های ایجاد شده، حد اقتصادی تعداد مراحل، معمولاً دو یا سه مرحله است.

شکل ۱-۱۶: نزدیک شدن به سیکل اریکسون با استفاده از مراحل متعدد تراکم و انبساط در سیکل برایتون

### ۱-۹- سیکل استاندارد هوایی رانش جت

امروزه موتورهای توربوجت به طور گسترده‌ای در انواع هواپیماها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از دلایل این امر می‌توان به وزن کم، عدم نیاز به فضای زیاد و نسبت قدرت به وزن بالا، اشاره کرد. سیکل رانش جت دقیقاً مشابه سیکل برایتون عمل می‌کند، با این تفاوت که برخلاف آن در سیکل رانش جت، از توان تولیدی در توربین فقط جهت راه اندازی کمپرسور و تجهیزات کمکی استفاده می‌شود. بنابراین گاز خروجی از توربین تا فشار محیط منبسط نشده بلکه با فشار زیادی وارد نازل می‌شود. سپس با افزایش سرعت و کاهش فشار، گاز با سرعت زیادی از نازل خارج شده و تغییر اندازه حرکت ایجاد شده باعث اعمال نیروی پیشران بر هواپیما می‌گردد. در شکل (۱-۱۷) نمایی از تجهیزات سیکل رانش جت به همراه نمودار  $T-s$  آن نشان داده شده است.

👉 **نتیجه:** با توجه به اینکه در سیکل رانش جت توان تولیدی توربین فقط جهت راه اندازی کمپرسور و تجهیزات کمکی استفاده می‌شود، لذا کار خالص خروجی این سیکل صفر است.

مثال) یک موتور جت هواپیما که مطابق با یک سیکل برایتون ایده‌آل کار می‌کند را در نظر بگیرید. نسبت تراکم در دیفیوزر یک به دو و در کمپرسور یک به سه می‌باشد. دمای خروجی از محفظه احتراق  $880^\circ\text{C}$  می‌باشد. اگر فشار ورودی به موتور جت یک اتمسفر بوده باشد، مطلوب است محاسبه راندمان حرارتی موتور؟

(مهندسی هوافضا) (۸۳)

(۴) ۴۰٪

(۳) ۳۳٪

(۲) ۲۷٪

(۱) ۲۰/۵٪

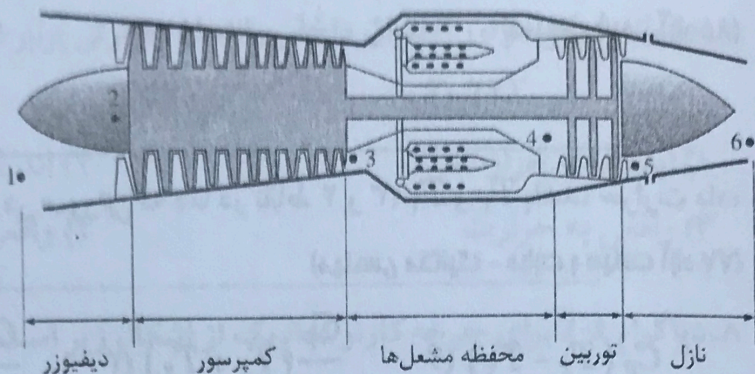
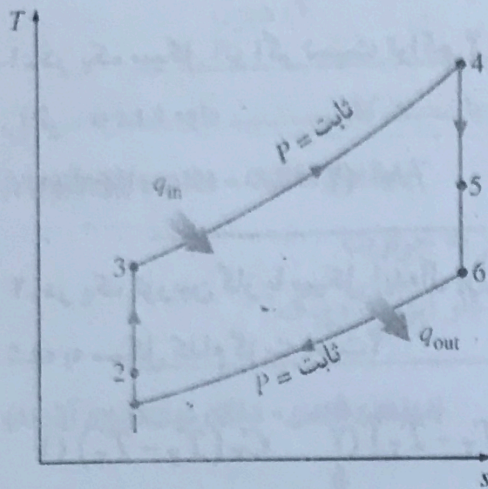
(حل)

$$r_p = 2 \times 3 = 6$$



$$\eta_{th, Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} = 1 - \frac{1}{\frac{(1/2-1)}{1/2}} = 0.40$$

گزینه (۴) صحیح است.



شکل ۱-۱۷: نمایی از تجهیزات سیکل رانش جت و نمودار  $T-s$  آن

## ۱-۱۰- خلاصه

در جدول زیر خلاصه‌ای از فرآیندهای سیکل‌های مختلف این فصل ارائه شده است.

نام سیکل	فرآیند آیزتروپیک	فرآیند دما ثابت	فرآیند فشار ثابت	فرآیند حجم ثابت
کارنو	۲	۲	-	-
اتو	۲	-	-	۲
دیزل	۲	-	۱	۱
استرلینگ	-	۲	-	۲
اریکسون	-	۲	۲	-
برایتون	۲	-	۲	-

👉 **نکته:** فقط سیکل‌های استرلینگ و اریکسون فرآیندهای آیزتروپیک ندارند.

👉 **نکته:** فقط سیکل‌های ایده‌آل کارنو، استرلینگ و اریکسون دارای فرآیندهای دما ثابت هستند. بقیه فرآیندهای این سیکل‌ها را نیز می‌توان به روش زیر به ذهن سپرد:

$$(Oscar) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{اس} \rightarrow \text{استرلینگ} \dots\dots\dots \text{حجم ثابت} \leftarrow \text{ح} \\ \text{ک} \rightarrow \text{کارنو} \dots\dots\dots \text{آیزتروپیک} \leftarrow \text{ا} \\ \text{ار} \rightarrow \text{اریکسون} \dots\dots\dots \text{فشار ثابت} \leftarrow \text{ف} \end{array} \right\} \leftarrow \text{حاف (Half)}$$