

# BRAYTON ÇEVİRİMİ: GAZ TÜRBİNLERİ İÇİN İDEAL ÇEVİRİM

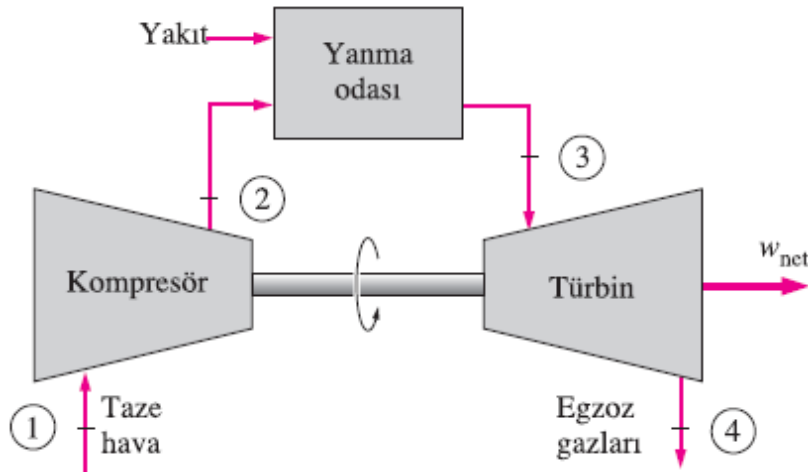
Yanma işleminin yerini sabit basınçta bir dış kaynaktan ısı girişi, egzoz işleminin yerini de sabit basınçta çevre havaya ısı atılması işlemi alır. İş akışkanının kapalı bir çevrimde dolaştığı bu ideal çevrime **Brayton** çevrimi denir ve aşağıda sıralanan dört içten tersinir hal değişiminden oluşur:

1-2 İzantropik sıkıştırma (bir kompresörde)

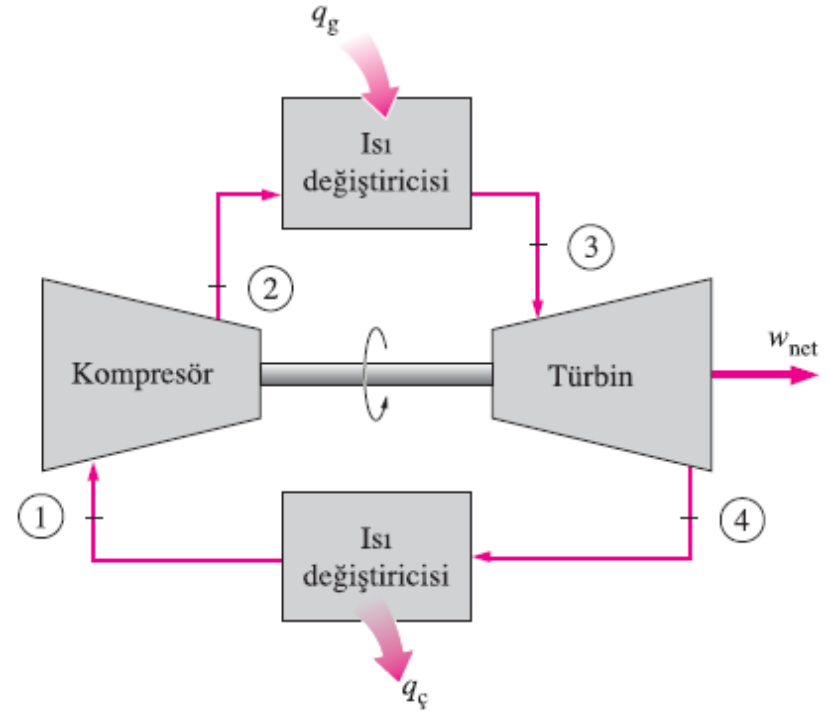
2-3 Sabit basınçta ısı girişi

3-4 İzantropik genişleme (bir türbinde)

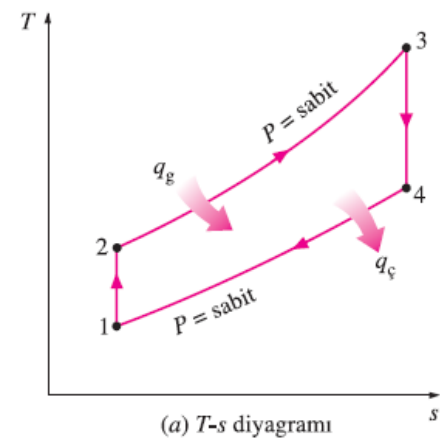
4-1 Sabit basınçta ısı çıkışı



Açık çevrime göre çalışan bir gaz türbini.



Kapalı çevrime göre çalışan bir gaz türbini.



Basınç oranı

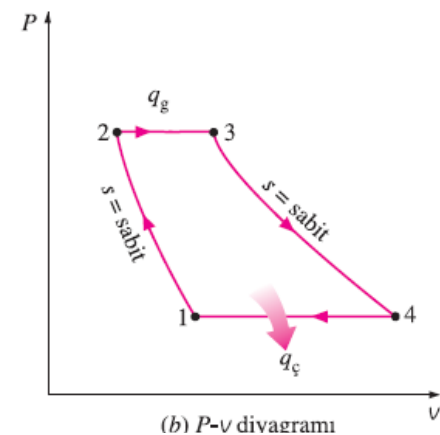
$$r_p = \frac{P_2}{P_1}$$

$$(q_g - q_ç) + w_g - w_ç = h_ç - h_g$$

$$\eta_{th,Brayton} = \frac{w_{net}}{q_g} = 1 - \frac{q_ç}{q_g} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

$$q_g = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

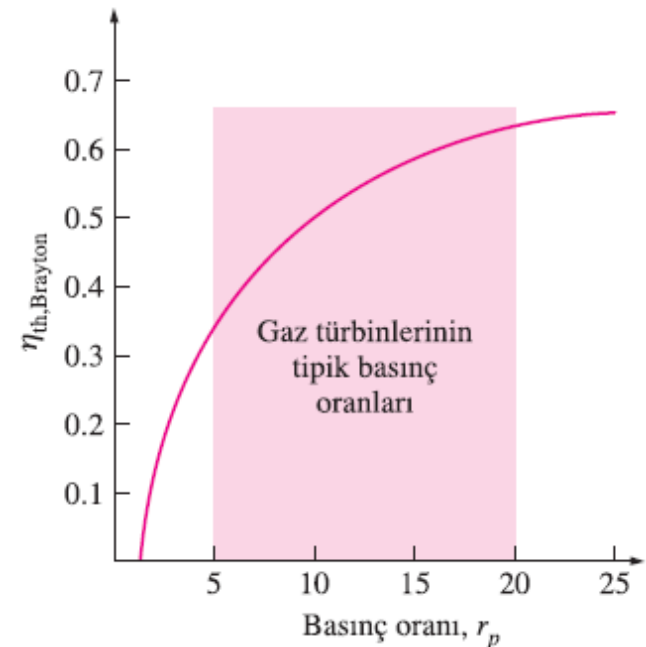
$$q_ç = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$



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

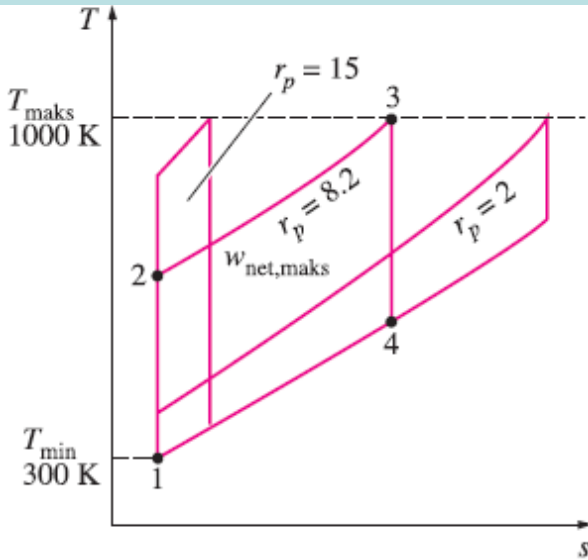
$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

İdeal Brayton çevriminin ısı veriminin basınç oranına göre değişimi.



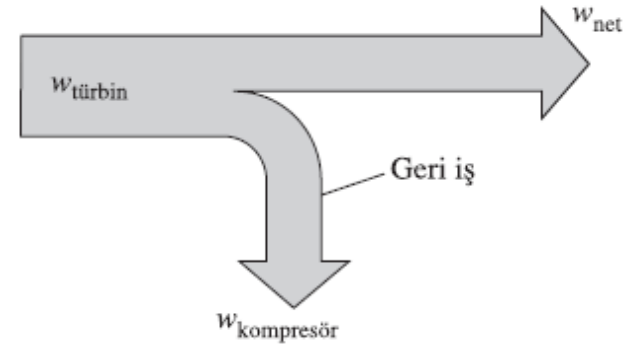
İdeal Brayton çevriminin T-s ve P-v diyagramları.

Gaz türbinleri günümüzde yaygın olarak *uçaklarda* ve *elektriksel güç üretiminde* kullanılmaktadır.



Çevrimdeki en yüksek sıcaklık yanma sonunda (3 halinde) oluşmaktadır ve türbin kanat malzemesinin dayanabileceği en yüksek sıcaklıkla sınırlıdır. Bu kısıtlama çevrimin basınç oranını da sınırlamaktadır.

Gaz türbinlerinde hava, yakıtın yanması için gerekli oksitleyiciyi sağlar ve çeşitli elemanlardaki sıcaklıkları güvenli sınırlar içinde tutabilmek için soğutucu görevi yapar. İkinci işlevin yerine getirilebilmesi için, gaz türbinlerinde tam yanma için gerekenden daha fazla hava kullanılır. Kütlesel hava-yakıt oranının 50 veya üzerinde olması olağandır.



Belirli  $T_{min}$  ve  $T_{maks}$  için Brayton çevriminin net işi artan basınç oranıyla önce artar,  $r_p = [ (T_{maks}/T_{min})^{k/[2(k-1)]}$ , basınç oranında en yüksek değere ulaşır ve sonra tekrar azalır.

Kompresörü çalıştırmak için kullanılan işin türbin işine oranına, geri iş oranı denir.

# Gaz Türbinlerinin Gelişimi

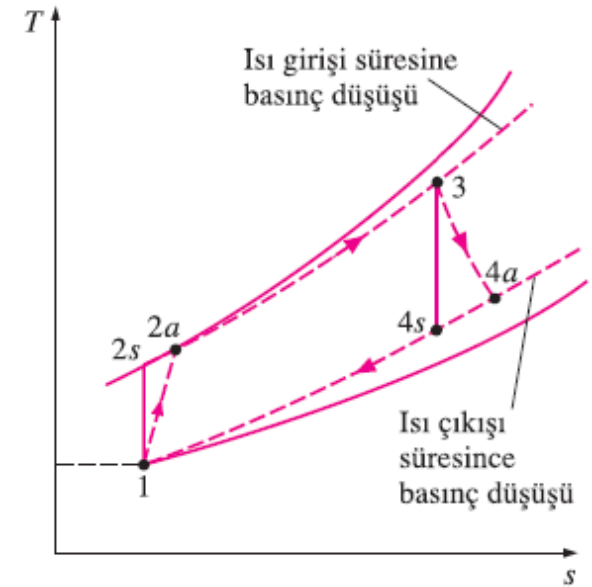
1. Türbin giriş (veya yanma) sıcaklığının artırılması:
2. Turbomakinelerin verimlerinin artırılması:
3. Temel çevrimde bazı değişikliklerin yapılması:

## Gerçek Gaz Türbini Çevriminin İdeal Çevrimden Farklılığı

**Sebepleri:** Türbin ve kompresörlerdeki tersinmezlikler, basınç düşüşleri, ısı kayıpları.

### Kompresör ve Türbinin adyabatik Verimleri

$$\eta_K = \frac{w_s}{w_a} \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad \eta_T = \frac{w_a}{w_s} \cong \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

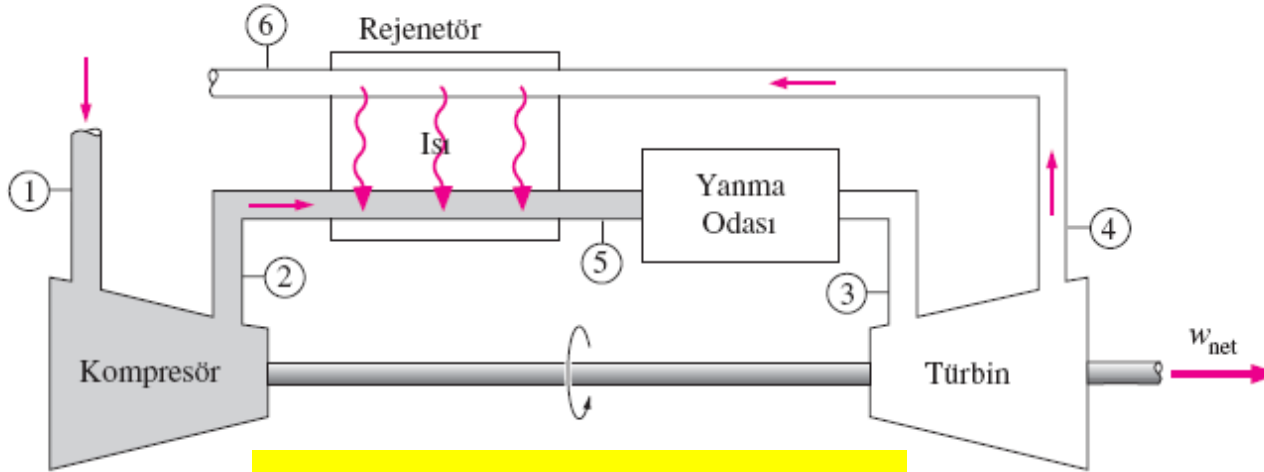


Gerçek gaz türbini çevriminin tersinmezlikler nedeniyle ideal Brayton çevriminden sapması.

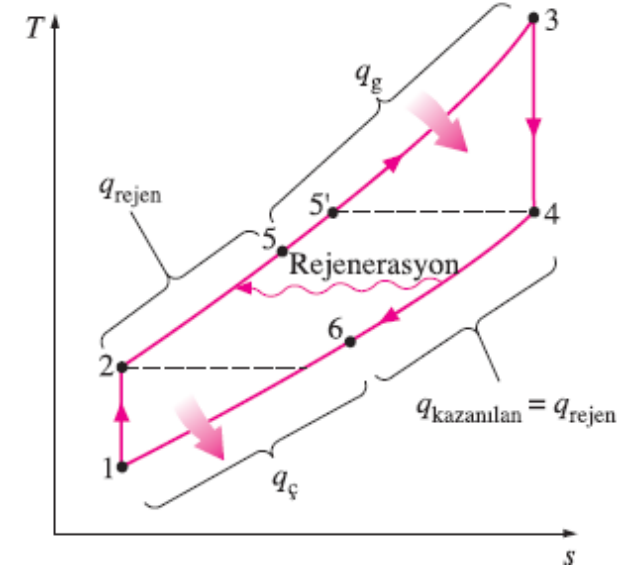
# REJENERATÖRLÜ BRAYTON ÇEVİRİMİ

Gaz türbinlerinde türbinden çıkan egzoz gazlarının sıcaklığı, genellikle kompresörden çıkan havanın sıcaklığından çok daha yüksektir. Kompresörden çıkan yüksek basınçlı hava **rejeneratör** veya **rekuperatör** adı verilen ters akışlı bir ısı değiştiricisinde türbinden çıkan yanma sonu gazlarıyla ısıtılabilir

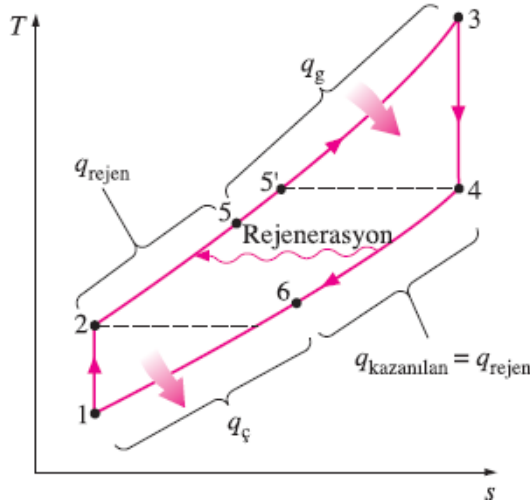
Brayton çevriminin ısı verimi **rejeneratör** kullanımıyla artar. Çünkü aynı net işi elde etmek için çevrime verilmesi gereken ısı (ve dolayısıyla yakıt) gereksinimi azalır.



Rejeneratörlü bir gaz türbini..



*Rejenerasyonlu  
bir Brayton  
çevriminin T-s  
diyagramı.*



*Rejenerasyonlu bir Brayton çevriminin T-s diyagramı.*

Isıl verimi, basınç oranı yanında çevrimin en düşük sıcaklığının en yüksek sıcaklığına oranına da bağlıdır.

Rejenerasyon en düşük basınç oranlarında ve en düşük sıcaklığın en yüksek sıcaklığa oranlarının en küçük olduğu durumlarda çok etkilidir.

$$q_{\text{rejen,gerçek}} = h_5 - h_2$$

$$q_{\text{rejen,maks}} = h_{5'} - h_2 = h_4 - h_2$$

Rejeneratör etkenliği

$$\epsilon = \frac{q_{\text{rejen,gerçek}}}{q_{\text{rejen,maks}}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2}$$

Soğuk hava standartı kabulleriyle etkenlik

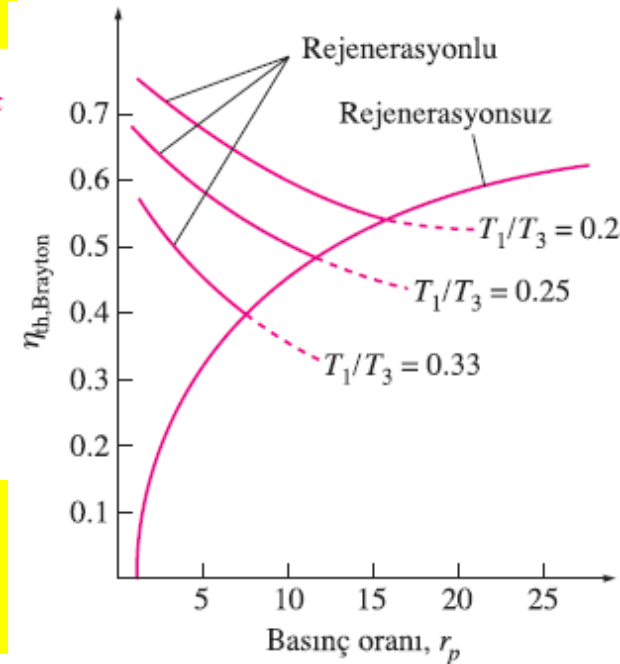
$$\epsilon \cong \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2}$$

Soğuk hava kabulleri tesiriyle

$$\eta_{\text{th, rejen}} = 1 - \left( \frac{T_1}{T_3} \right) (r_p)^{(k-1)/k}$$

Yüksek basınç oranlarında rejenerasyon kullanılabilir mi?

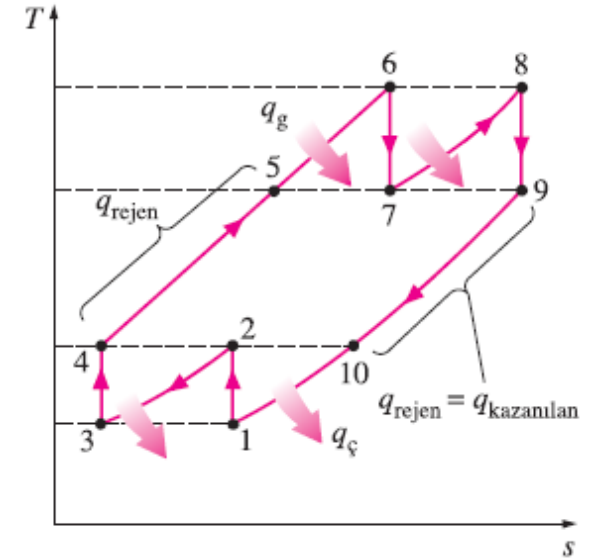
Rejenerasyonlu ve rejenerasyonsuz ideal Brayton çevrimi ısı verimi



# ARA SOĞUTMALI, ARA ISITMALI VE REJENERATÖRLÜ BRAYTON ÇEVİRİMİ

Kompresöre giren işin azaltılması ve türbinden elde edilen işin maksimuma çıkarmak için:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} \quad \text{ve} \quad \frac{P_6}{P_7} = \frac{P_8}{P_9}$$

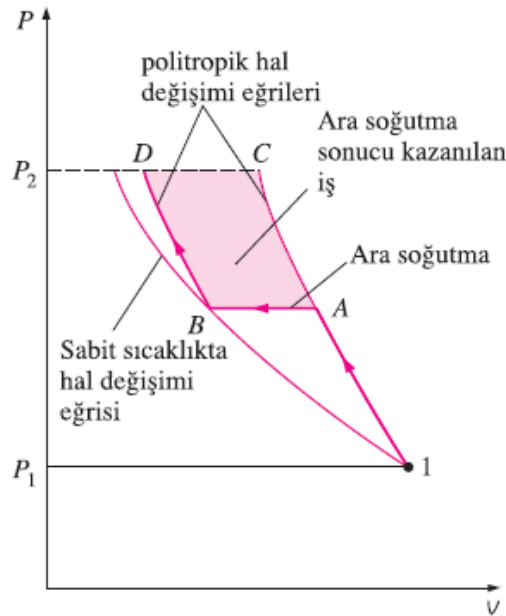


Ara soğutmalı iki kademeli sıkıştırma, ara ısıtmalı iki kademeli genişleme ve rejeneratöre sahip bir gaz türbini. .

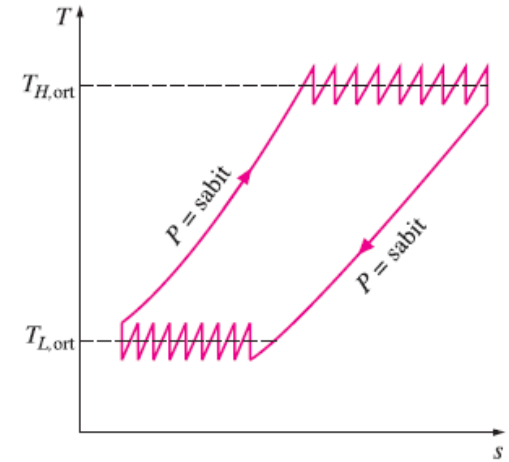
**Ara soğutmalı çok kademeli sıkıştırma :** Belirli iki basınç değeri arasında bir gazın sıkıştırılması için gereken işin, sıkıştırma işleminin kademeli olarak yapılması ve bu kademeler arasında gaza soğutma uygulanmasıyla yani, *ara soğutmalı çok kademeli sıkıştırma* yapılmasıyla azaltılabilir.

**Ara ısıtmalı çok kademeli genişleme:** İki basınç seviyesi arasında çalışan bir türbinden elde edilen iş, genişleme işleminin kademeli olarak gerçekleştirilmesi ve bu kademeler arasında gaza ısıtma uygulanmasıyla yani *ara ısıtmalı çok kademeli genişleme* yapılmasıyla artırılabilir.

**Ara ısıtma ve soğutma:** Gerçekte ara soğutma ve ara ısıtma, rejenerasyonla birlikte uygulanmadığında ısı verim her zaman azalır. **Neden?**



Tek kademeli bir kompresör (1AC) ile ara soğutmalı iki kademeli bir kompresör (1ABD) için gerekli işin karşılaştırılması.



Ara soğutmalı, ara ısıtmalı ve rejeneratörlü gaz türbini çevriminde sıkıştırma ve genişleme kademeleri sayısı arttıkça Ericsson çevrimine yaklaşılr.



# İDEAL TEPKİLİ ÇEVİRİMLER

Hafif ve küçük olduklarından ve güç/ağırlık oranları yüksek olduğundan, gaz türbinleri uçaklarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

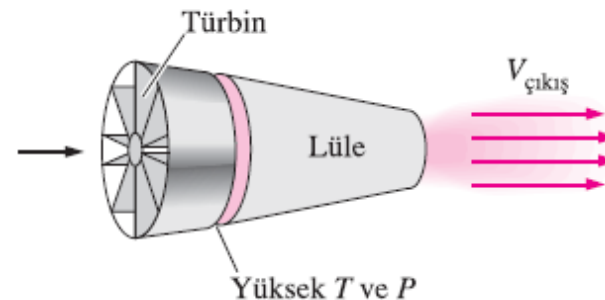
Uçaklarda kullanılan gaz türbinleri, tepkili çevrim adıyla bilinen açık bir çevrime göre çalışırlar.

İdeal tepkili çevrim, basit ideal brayton çevrimine benzer. Ancak tepkili çevrimde gazlar, türbinde çevre basıncına kadar genişletilmezler. Bunun yerine türbindeki genişleme, sadece kompresörü ve küçük bir jeneratör ile hidrolik pompalar gibi diğer yardımcı donanımları çalıştırmaya yetecek gücü sağlayacak basınca kadar yapılır.

Tepkili çevrimin net işi sıfırdır. Türbinden çıkan yüksek basınçlı gazlar bir lülede genişleyerek hız kazanır ve uçağı itecek tepkiyi sağlar.

Uçağın hareketi, bir akışkanın, uçağın gidiş yönüne ters yönde ivmelendirilmesiyle sağlanır. Bu işlem, büyük bir akışkan kütlelerinin yavaş bir şekilde ivmelendirilmesiyle (pervaneli motor) veya az bir akışkan kütlelerine büyük bir ivme kazandırılmasıyla (jet veya turbojet (tepkili) motor) olabildiği gibi, her iki yöntemin birlikte uygulanmasıyla (turboprop motor) da olabilir.

Jet motorlarında, türbinden çıkan yüksek sıcaklık ve basınçtaki gazlar bir lülede ivmelendirilerek tepki üretilir.

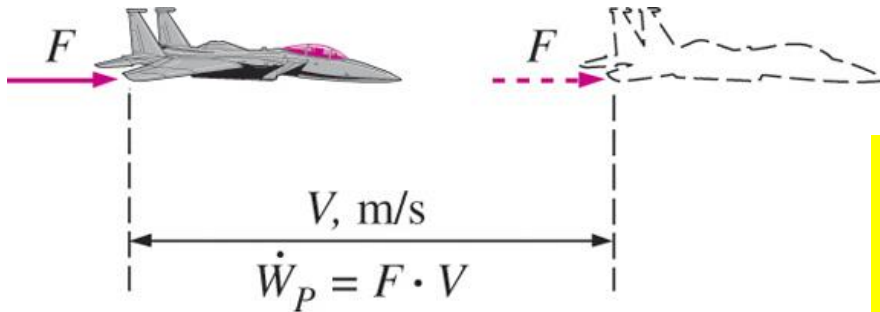


İtme (itici güç)

$$F = (\dot{m}V)_{\text{çıkış}} - (\dot{m}V)_{\text{giriş}} = \dot{m} (V_{\text{çıkış}} - V_{\text{giriş}}) \quad (\text{N})$$

İtici güç

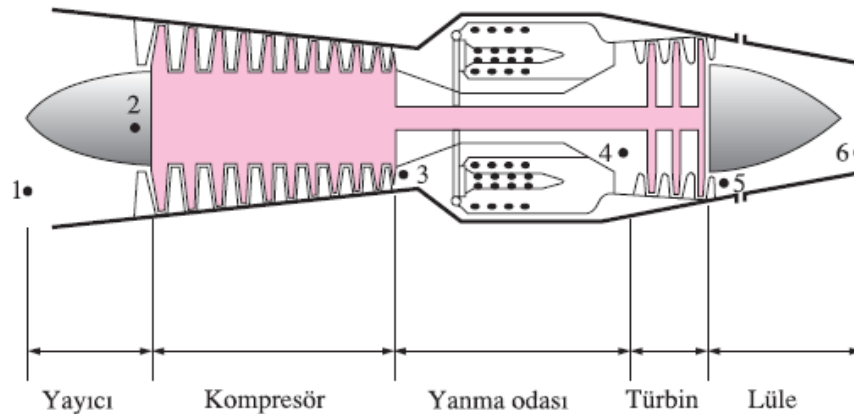
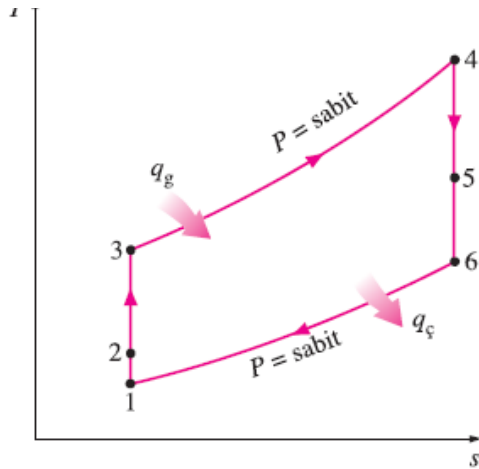
$$\dot{W}_P = FV_{\text{uçak}} = \dot{m} (V_{\text{çıkış}} - V_{\text{giriş}}) V_{\text{uçak}} \quad (\text{kW})$$



Tepki verimi

$$\eta_P = \frac{\text{Tepki gücü}}{\text{Sağlanan ısıl güç}} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{Q}_g}$$

Tepki gücü, birim zamanda bir mesafe boyunca uçağa etki eden kuvvettir.



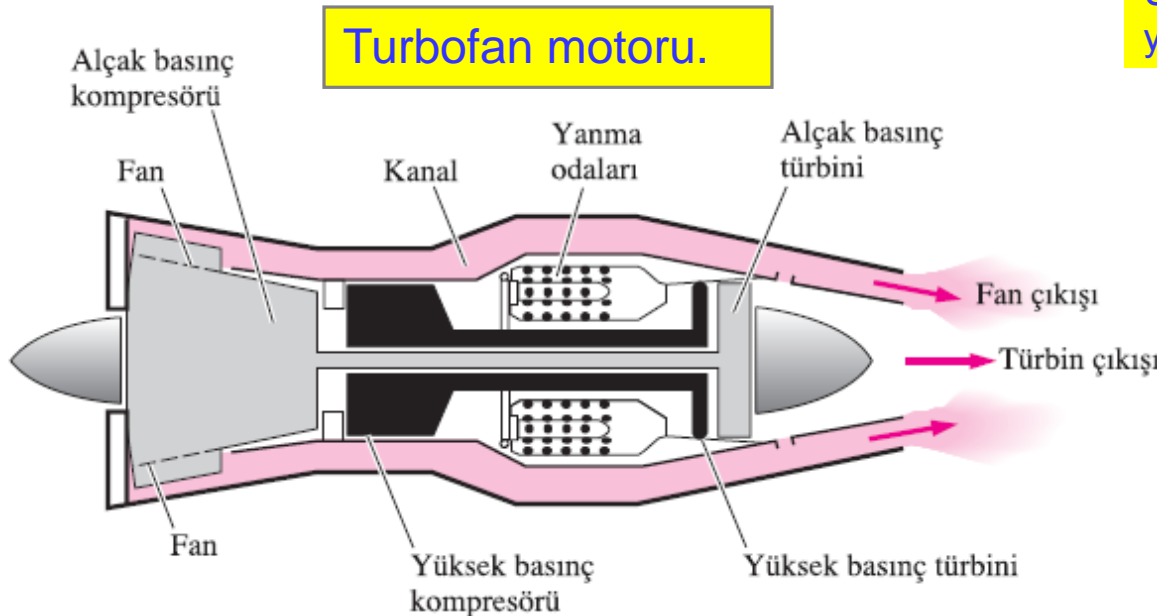
Bir tepkili motorun başlıca bölümleri ve ideal tepkili çevrimin T-s diyagramı.

# Tepkili Motorlardaki Gelişmeler

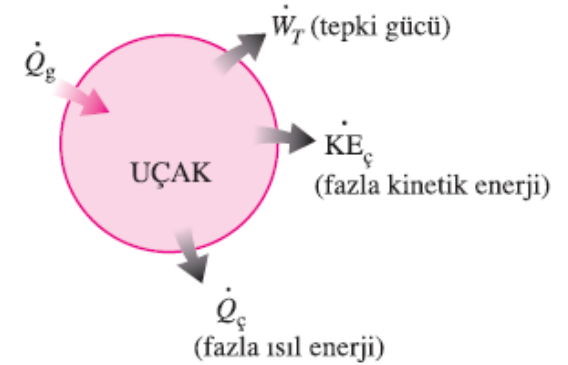
Birinci kuşak uçaklar, otomobil motorlarına çok benzeyen motorlarla çalışan pervaneli uçaklardı.

Pervaneli ve tepkili motorların kendilerine has üstünlükleri ve eksik yanları vardır. Her iki motorun üstün yanlarını tek bir motorda birleştirmeye yönelik çabalar da olmuştur.

Bu yönde sağlanan gelişmelerden ikisi **propjet motoru** ve **turbofan motoru** olarak bilinir.

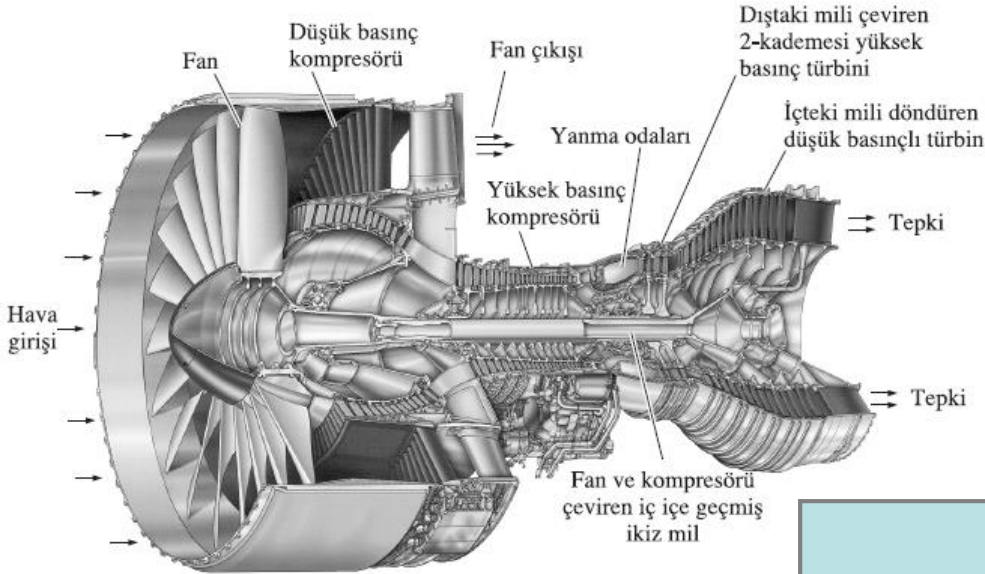


**Turbofan motoru.**



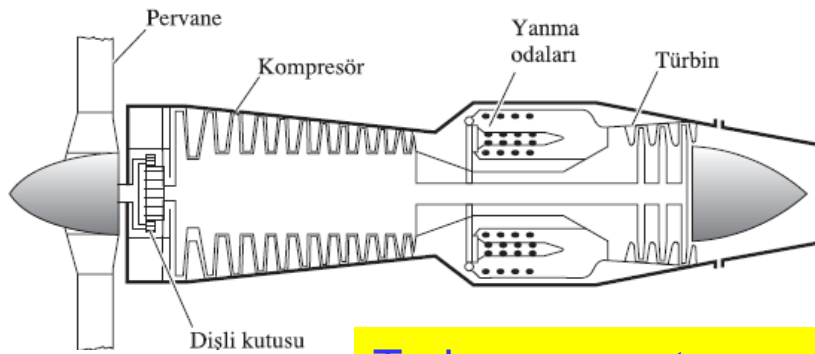
Uçağa sağlanan enerji (yakıtın yakılmasıyla) değişik biçimlere dönüşür.

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan uçak motoru **turbofan** (veya *fanjet*) motorudur. Bu motorda türbine bağlı büyük bir fan (pervane) Şekil 9-52 ve Şekil 9-53'te görüldüğü gibi, oldukça yüksek debide havayı, tepkili motoru çevreleyen bir kanalda akmaya zorlar.



Boeing 777 uçağında kullanılan modern bir jet motoru. 84000 pound değerinde tepki kuvveti oluşturan bir Pratt & Whitney PW4084 tipi turbofan. Uzunluk: 4.87 m (192 in), Fan çapı: 2.84 m (112 in), Kütle: 6800 kg (15000 lbm).

**Çeşitli motor tipleri :**  
Turbofan, Propjet, Ramjet, Sacramjet, Rocket



**Turboprop motoru**



**Ramjet motoru**

# GAZ AKIŞKANLI GÜÇ ÇEVİRİMLERİNİN İKİNCİ YASA ÇÖZÜMLEMESİ

$$X_{yo} = T_0 S_{\text{üret}} = T_0 (\Delta S_{\text{sis}} - S_g + S_{\phi})$$

$$= T_0 \left[ (S_2 - S_1)_{\text{sis}} - \frac{Q_g}{T_{\text{sin,g}}} + \frac{Q_{\phi}}{T_{\text{sin,\phi}}} \right] \quad (\text{kJ})$$

Kapalı sistemler  
için tersinmezlik

$$\dot{X}_{yo} = T_0 \dot{S}_{\text{üretim}} = T_0 (\dot{S}_{\phi} - \dot{S}_g) = T_0 \left( \sum_{\phi} \dot{m}s - \sum_g \dot{m}s - \frac{\dot{Q}_g}{T_{\text{sin,g}}} + \frac{\dot{Q}_{\phi}}{T_{\text{sin,\phi}}} \right) \quad (\text{kW})$$

Sürekli akışlı sistem  
için tersinmezlik

$$X_{yo} = T_0 S_{\text{üretim}} = T_0 \left( s_{\phi} - s_g - \frac{q_g}{T_{\text{sin,g}}} + \frac{q_{\phi}}{T_{\text{sin,\phi}}} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

Sürekli akışlı, bir giriş, bir çıkış

$$x_{yo} = T_0 \left( \sum \frac{q_{\phi}}{T_{\text{sin,\phi}}} - \sum \frac{q_g}{T_{\text{sin,g}}} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

Bir çevrim için tersinmezlik

$$x_{yo} = T_0 \left( \frac{q_{\phi}}{T_L} - \frac{q_g}{T_H} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

Yalnızca iki ısıl enerji deposuyla ısı alışverişinde  
bulunan çevrim için tersinmezlik

$$\phi = (u - u_0) - T_0(s - s_0) + P_0(v - v_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg})$$

Kapalı sistem için  
kullanılabilirlik

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

açık sistem için kullanılabilirlik

Bu çevrimlerin ikinci-yasa çözümlemesi, tersinmezliklerin en çok nerelerde meydana geldiğini belirlemek ve geliştirilmelerine ışık tutmak bakımından önemlidir.