

Teorik çevrim analizi



Prof. Dr. Selim ÇETİNKAYA

Teorik çevrim analizinde temel noktalar

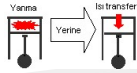
- Teorik çevrim
 - Güç üreten sistemlerin çoğu çevrim esasına göre çalışır.
 - Çevrimleri analiz etmek genellikle zordur.
 - Analizleri yapılabilir hale getirmek için idealleştirmeler yapılır.
 - Gerçek çevrime oldukça benzer ancak tamamen tersinir işlemlerden oluşan çevrimdir.

Teorik çevrim analizinde temel noktalar...

Teorik çevrimler, soğuk kaynağa olan kaçınılmaz ısı kaybının dışında (Termodinamiğin İkinci Kanununa göre, böyle bir kayıp olmaksızın ısı mekanik işe dönüştürülemez), diğer tüm kayıplardan arındırılmıştır.

Teorik analizde şu kabuller yapılır:

- ✓ Çevrim, kapalı sistemde gerçekleştiğinden ve sabit miktarda ideal gaz kullanıldığından, emme ve egzoz kayıpları yoktur.
- ✓ Çalışma maddesinin ısı kapasitesi sıcaklığa bağımlı olmayıp, çevrim boyunca sabittir.
- ✓ Yanma işlemi, ısının sıcak bir dış ısı kaynağından sisteme verilmesi; artık gazların egzozu da, ısının soğuk bir dış ısı kaynağına verilmesi işlemleriyle değiştirilmiştir.
- ✓ Sıkıştırma ve genişleme işlemleri, çevre ile ısı alışverişinin olmadığı tersinir adyabatik işlemlerdir. Çevrimi oluşturan tüm işlemler tersinirdir.

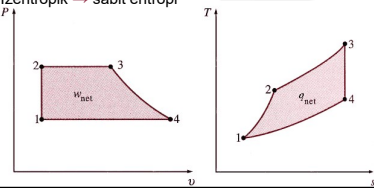


Hava-standard çevrim

- Hava standard çevrim
 - Hava standard kabullerin uygulanabildiği çevrimdir.
- Soğuk hava standard kabul
 - Analizi basitleştirmek için *hava-standard kabuller* olarak bilinen aşağıdaki yaklaşımlar yapılır.
 - Çalışma maddesi kapalı bir çevrimde sirküle eden ve ideal bir gaz olarak davranan havadır.
 - Havanın oda sıcaklığında (25°C) belirlenen özgül ısıları sabit kabul edilir.

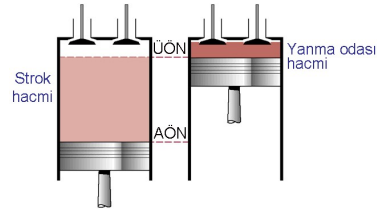
Teorik çevrim analizinde temel noktalar...

- Özellik diyagramları
 - Çevrimlerin analizinde $P-v$ ve $T-s$ diyagramları önemli katkı sağlamaktadır.
 - $P-v$ ve $T-s$ diyagramlarının her ikisinde de çevrim işlem eğrilerinin sınırladığı alan, çevrim sırasında üretilen ve çevrim için net ısı transferine eşit olan net işi temsil eder.
- $T-s$ diyagramında:
 - Isı ekleme → entropinin artışı yönünde ilerler.
 - Isı atma → entropinin azalışı yönünde ilerler.
 - İzentropik → sabit entropi



İçten yanmalı motorlar (hatırlatmalar)

- Yanma odası hacmi
 - Piston ÜÖN'da iken silindirin oluşan minimum hacim
- Strok (kurs) hacmi
 - Piston AÖN ve ÜÖN arasında hareket ederken boşalttığı hacim



İçten yanmalı motorlar (hatırlatmalar)...

■ Sıkıştırma oranı (ϵ)

Silindirden oluşan maksimum hacmin minimum hacme oranı

$$\epsilon = \frac{V_{\text{maks}}}{V_{\text{min}}} = \frac{V_{\text{AÖN}}}{V_{\text{ÜÖN}}}$$

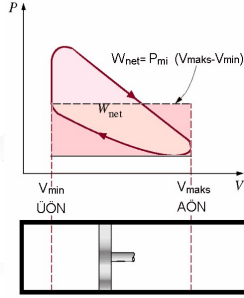
■ Ortalama indike basınç (P_{mi})

Silindir içerisinde çevrim süresince değişen basınçların ortalaması

$$W_{\text{net}} = P_{\text{mi}} \times \text{Piston alanı} \times \text{Strok}$$

$$= P_{\text{mi}} \times \text{Strok hacmi}$$

$$P_{\text{mi}} = \frac{W_{\text{net}}}{V_{\text{maks}} - V_{\text{min}}}$$



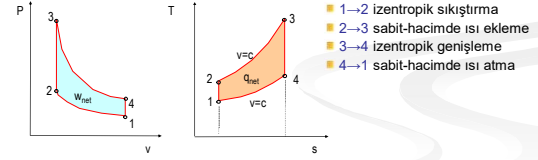
Sabit hacim (Otto) çevrimi

(Buji ile ateşlemeli motorların teorik çevrimi)

■ Basitleştirme ve analiz

■ Çevrimlerin analizi, hava-standard kabullerle önemli derecede basitleşmektedir.

■ **Sabit hacim çevrimi** kapalı sistemde gerçekleşen şu dört içten tersinir işlemden oluşur:



Sabit hacim (Otto) çevrimi...

■ Termodinamik analiz

- Basitleştirmek için, kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilir.
- İşlemlerin birim kütle bazındaki enerji dengesi:

$$(q_{\text{in}} - q_{\text{out}}) + (w_{\text{in}} - w_{\text{out}}) = \Delta u$$

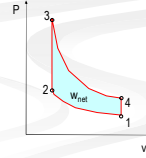
■ Hacimsel sıkıştırma oranı

$$\epsilon = \frac{V_{\text{maks}}}{V_{\text{min}}} = \frac{v_1}{v_2}$$

■ İzentropik sıkıştırma işi:

$$w_2 = u_2 - u_1 = C_v (T_2 - T_1)$$

$$= \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - k}$$



Sabit hacim (Otto) çevrimi...

■ Termodinamik analiz...

■ Sabit hacimdeki basınç veya sıcaklık artış oranı:

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda$$

■ Isı transferi sırasında hacim sabittir ve iş yapılmamaktadır.

$$q_{\text{in}} = q_s = u_3 - u_2 = C_v (T_3 - T_2)$$

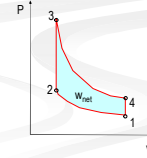
■ İzentropik genişleme işi:

$${}_3W_4 = u_3 - u_4 = C_v (T_3 - T_4)$$

$$= \frac{R(T_3 - T_4)}{1 - k}$$

■ Sabit hacimde sistemden atılan ısı:

$$q_{\text{out}} = q_R = u_4 - u_1 = C_v (T_4 - T_1)$$



Sabit hacim (Otto) çevrimi...

■ Net iş

$$W_{\text{net}} = {}_3W_4 - |{}_1W_2|$$

veya

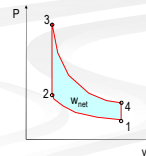
$$W_{\text{net}} = q_{\text{net}} = q_s - |q_R|$$

İndike ortalama basınç:

$$P_{\text{mi}} = \frac{W_{\text{net}}}{V_1 - V_2}$$

■ Isıl verim :

$$\eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{q_s} = \frac{q_{\text{net}}}{q_s} = \frac{q_s - |q_R|}{q_s} = 1 - \frac{|q_R|}{q_s}$$



Sabit hacim (Otto) çevrimi...

■ Isıl verim ...

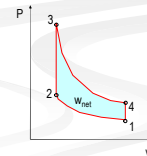
$$\eta_{t, \text{Otto}} = \frac{W_{\text{net}}}{q_s} = 1 - \frac{q_R}{q_s}$$

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

■ 1→2 ve 3→4 işlemleri izentropik ve $v_2 = v_3$ ve $v_4 = v_1$ olduğundan;

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow \frac{(T_4/T_1 - 1)}{(T_3/T_2 - 1)} = 1$$

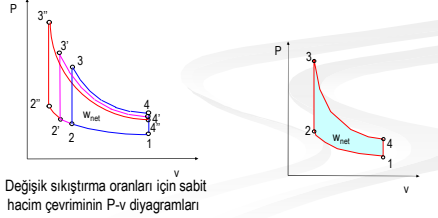


Sabit hacim (Otto) çevrimi...

■ Isıl verim...

- Önceki ifadelerle birleştirilirse;

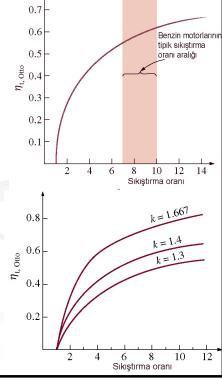
$$\eta_{t, \text{Otto}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$



Sabit hacim (Otto) çevrimi...

■ Isıl verim (devamı)

- Isıl verim, sıkıştırma oranı (ε) ve özgül ısıların oranının (k) her ikisi ile de artar.
- Pratikte, yüksek sıkıştırma oranları kullanıldığında, karışımın **kendi kendine ateşleme** de denilen erken ateşlenmesi söz konusudur.
- Kendi kendine ateşleme **motor vuruntusu** denilen duyulabilir bir gürültü üretir.
- Otto çevrim verimi yüksek özgül ısı oranlı bir çalışma maddesi kullanılarak da artırılabilir.



ÖRNEK 1

Çalışma maddesi ideal hava olan teorik bir sabit hacim çevrimi hakkında şu değerler verilmiştir:

$$P_1 = 0,98 \text{ bar}$$

$$T_1 = 290 \text{ K}$$

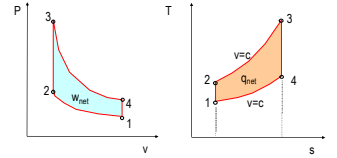
$$P_2 = 15 \text{ bar}$$

$$P_4 = 3,8 \text{ bar}$$

(Hava için $C_v = 0,717 \text{ kJ/kgK}$, $R = 0,287 \text{ kJ/kgK}$ dir. Hesaplamalar 1 kg çalışma maddesi için yapılacaktır.)

- Çevrimin P-v ve T-s diyagramlarını çiziniz.
- Her durumdaki P, v ve T değerlerini içeren bir tablo düzenleyiniz.
- Çevrimin net işini, indike ortalama basıncını ve ısı (termik) verimini hesaplayınız.

ÇÖZÜM



Durum	1	2	3	4
P	kPa (98)	(1500)	5816,4	(380)
v	m ³ /kg	0,849	0,121	0,849
T	K	(290)	632,4	2452,2

- Verilen değerler parantez içerisinde yazılmıştır.

1. Durum

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0,287 \times 290}{98} = 0,849 \text{ m}^3/\text{kg}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4
P	kPa (98)	(1500)	5816,4	(380)
v	m ³ /kg	0,849	0,121	0,849
T	K	(290)	632,4	2452,2

2. Durum

$$\frac{P_2}{P_1} = \varepsilon^k \rightarrow \varepsilon = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k} = \left(\frac{1500}{98}\right)^{1/1,4} = 7,02$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,849}{7,02} = 0,121 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_2 = \frac{P_2 v_2}{R} = \frac{1500 \cdot 0,121}{0,287} = 632,4 \text{ K}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4
P	kPa (98)	(1500)	5816,4	(380)
v	m ³ /kg	0,849	0,121	0,849
T	K	(290)	632,4	2452,2

3. Durum

$$v_3 = v_2 = 0,121 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_3 = P_4 \cdot \varepsilon^k = 380 \cdot 7,02^{1,4} = 5816,42 \text{ kPa}$$

$$T_3 = T_2 \frac{P_3}{P_2} = 632,4 \frac{5816,4}{1500} = 2452,2 \text{ K}$$

4. Durum

$$v_4 = v_1 = 0,849 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_4 = \frac{P_4 v_4}{R} = \frac{380 \times 0,849}{0,287} = 1124,11 \text{ K}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4
P kPa	(98)	(1500)	5816,4	(380)
v m ³ /kg	0,849	0,121	0,121	0,849
T K	(290)	632,4	2452,2	1124,11

Net iş

$$W_{net} = q_s - |q_R|$$
$$q_s = C_v (T_3 - T_2) = 0,717 (2452,2 - 632,4) = 1304,8 \text{ kJ/kg,}$$
$$-q_R = C_v (T_4 - T_1) = 0,717 (1124,11 - 290) = 598,06 \text{ kJ/kg}$$
$$W_{net} = 1304,8 - 598,06 = 706,74 \text{ kJ/kg}$$

İndike ortalama basınç

$$P_{mi} = \frac{W_{net}}{v_1 - v_2} = \frac{706,74}{0,849 - 0,121} = 970,8 \text{ kPa}$$

Isıl verim

$$\eta_t = \frac{W_{net}}{q_s} = \frac{706,74}{1304,8} = 0,54 = \%54$$

V_H = 2 litre olan dört zamanlı motorla 3000 1/min'de indike güç?

ÖRNEK

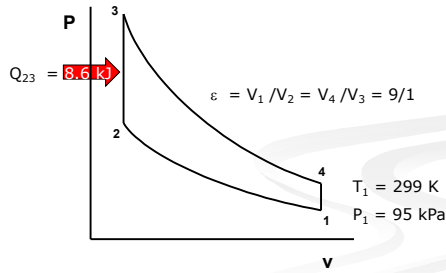
Bir hava standard otto çevriminde, sıkıştırma başlangıcındaki basınç 95 kPa, sıcaklık 22°C ve silindir hacmi 5600 cm³tür.

Sıkıştırma oranı 9/1 dir ve ısı verme işleminde 8,6 kJ ısı eklenmektedir.

- Sıkıştırma ve ısı verme işlemleri sonrasındaki sıcaklık ve basınçları,
- Çevrimin ısıl verimini, hesaplayınız. Soğuk hava çevrimi kabullerini kullanınız.

ÇÖZÜM

P-v diyagramı ve veriler



ÇÖZÜM...

Havanın kütlesi:

$$m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = 6,29 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

1 - 2 arasında sıkıştırma:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \quad (\text{İzentropik sıkıştırma})$$

$$T_2 = (22+273) \cdot 9^{1,4-1} = 705,6 \text{ K}$$

ÇÖZÜM...

T₃ ün hesaplanmasında 1. yasadın yararlanılabilir:

$$Q_{23} - W = m(\Delta U + \Delta KE + \Delta PE) = mc_v(T_3 - T_2)$$

Solve for T₃:

$$T_3 = \frac{q_{23}}{c_v} + T_2 = \frac{8,6 \text{ kJ}}{0,855 \text{ kJ/kg}} + 705,6 \text{ K}$$

$$T_3 = 2304,7 \text{ K}$$

ÇÖZÜM...

Thermal Efficiency

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{9^{1,4-1}}$$

$$\eta = 0,585$$

Problem 1

- Hava-standard çevrime göre çalışan bir motorda kapalı sistemde aşağıdaki dört işlem gerçekleşmektedir:
 - 1-2 100 kPa ve 27°C dan 1 MPa'a izentropik sıkıştırma
 - 2-3 2200 kJ/kg sabit basınçta ısı ekleme
 - 3-4 sabit hacimde ısı atma
 - 4-1 100 kPa sabit basınçta başlangıç durumuna kadar ısı atma
 - Çevrimin P-v ve T-s diyagramlarını çizin.
 - Her durumdaki P, v ve T değerlerini içeren durum cetvelini düzenleyiniz.
 - Isıl verimi belirleyiniz.
- Oda sıcaklığında özgül ısılar sabit kabul edilecektir.

Problem 2

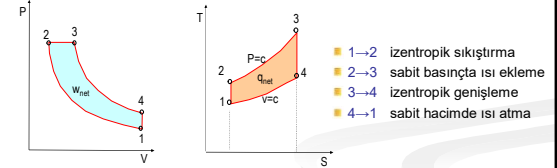
- Bir hava-standard Otto çevriminin sıkıştırma oranı 9,5'tir. İzentropik sıkıştırma işlemi öncesinde havanın durumu 100 kPa, 17°C, ve 600 cm³ tür. İzentropik genişleme işlemi sonunda sıcaklık 800 K olmaktadır. Oda sıcaklığındaki özgül ısı değerlerini kullanarak;
- her durumdaki P, V ve T değerlerini içeren durum cetvelini düzenleyiniz.
 - kJ olarak transfer edilen toplam ısıyı,
 - ısıl verimi,
 - ortalama efektif basıncı,
- hesaplayınız.

Sabit basınç (Diesel) çevrimi (Sıkıştırma ile ateşlemeli motorların teorik çevrimi)

- Diesel çevrimi
 - Diesel çevrimi, düşük hızlı sıkıştırma ile ateşlemeli motorların teorik çevrimidir.
 - Bu motorlardaki yanma işlemi daha uzun sürede olmaktadır.
 - Teorik Diesel çevriminde yanma işleminin daha uzun süre devam etmesi nedeniyle, yanma işlemi sabit basınçta ısı ekleme işlemine benzetilmektedir.
 - Bu işlem Otto ve Diesel çevrimlerinin farklı olduğu tek işlemdir.

Sabit basınç (Diesel) çevrimi...

- Diesel çevrimi...
 - Sabit basınç çevriminin dört işlemi şunlardır:



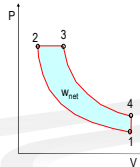
Sabit basınç (Diesel) çevrimi...

- Termodinamik analiz
- Kapalı sistemde gerçekleşen çevrim için 2→3 sabit basınç işlemiyle ısı verilir.

$$q_s - w_{23} = u_3 - u_2$$
$$q_s = u_3 - u_2 + P(v_3 - v_2)$$
$$q_s = h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_2)$$

4→1 işlemi Otto çevrimindeki gibi

$$q_R = u_1 - u_4 = C_v(T_1 - T_4)$$
$$-q_R = C_v(T_4 - T_1)$$

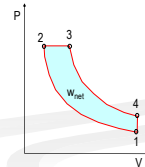


Sabit basınç (Diesel) çevrimi...

- Net iş
- $$w_{net} = {}_2w_3 + {}_3w_4 - |{}_1w_2|$$
- veya;
- $$w_{net} = q_{net} = q_s - |q_R|$$

- Isıl verim

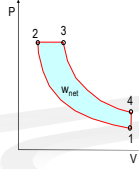
$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_s} = \frac{q_{net}}{q_s} = \frac{q_s - |q_R|}{q_s} = 1 - \frac{|q_R|}{q_s}$$



Sabit basınç (Diesel) çevrimi...

■ Isıl verim...

$$\begin{aligned}\eta_{t, Diesel} &= \frac{w_{net}}{q_s} = 1 - \frac{q_R}{q_s} \\ &= 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 \\ &= 1 - \frac{1}{k} \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)\end{aligned}$$



■ Sabit basınçta yanma işleminden önceki ve sonraki silindir hacimlerinin oranına "ön genişleme oranı" ρ denir;

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

Sabit basınç (Diesel) çevrimi...

■ Isıl verim...

$s_4 - s_1 = s_3 - s_2$ entropi eşitliğinden

$$C_v \ln \frac{T_4}{T_1} = C_p \ln \frac{T_3}{T_2}$$

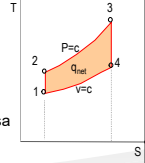
Eşitliğin her iki tarafı C_v 'ye bölünür, antilogaritması alınırsa

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^k = \rho^k$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

eşitliği ile birlikte verim eşitliğindeki yerlerine yazılacak olursa

$$\eta_{t, Diesel} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \left[\frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)} \right]$$



Sabit basınç (Diesel) çevrimi...

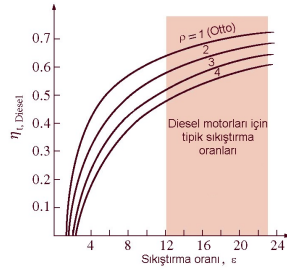
■ Isıl verim...

■ Diesel çevriminin veriminin Otto çevrim veriminden farkı sadece değeri 1'den büyük olan parantezdir.

■ Sabit basınçtaki genişleme oranı ρ azaldıkça verim artar.

$\rho = r_c \rightarrow 1$, $\eta_{t, Diesel} \rightarrow \eta_{t, Otto}$

■ Pratikte, diesel motorları buji ile ateşleme motorlardan çok daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalıştırdıklarından, onlardan daha verimlidirler.



ÖRNEK 2

■ Çalışma maddesi ideal hava olan teorik bir sabit basınç (dizel) çevrimi hakkında aşağıdaki değerler verilmiştir:

$P_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = 350 \text{ K}$,

Sıkıştırma oranı, $\varepsilon = 20/1$,

Ön genişleme oranı, $\rho = 2$,

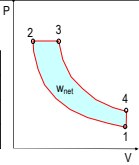
(Hava için $C_p = 1,0035 \text{ kJ/kgK}$, $C_v = 0,7165 \text{ kJ/kgK}$ alınacak ve hesaplamalar 1 kg çalışma maddesi için yapılacaktır.)

■ Her durumdaki P, v ve T değerlerini içeren bir tablo düzenleyiniz.

■ Çevrimin indike ortalama basıncını ve ısı verimini hesaplayınız.

ÇÖZÜM

Durum	1	2	3	4
P kPa	(100)	6629	6629	262
v m ³ /kg	1,005	0,050	0,10	1,005
T K	(350)	1155	2310	917



1. Durum

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0,287 \times 350}{100} = 1,005 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2. Durum

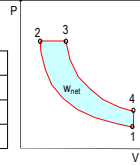
$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,005}{20} = 0,050 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_2 = P_1 \cdot \varepsilon^k = 100 \cdot 20^{1,4} = 6629 \text{ kPa}$$

$$T_2 = \frac{P_2 v_2}{R} = \frac{6629 \cdot 0,050}{0,287} = 1155 \text{ K}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4
P kPa	(100)	6629	6629	262
v m ³ /kg	1,005	0,050	0,10	1,005
T K	(350)	1155	2310	917



3. Durum

$$P_3 = P_2 = 6629 \text{ kPa}$$

$$\frac{v_3}{v_2} = \rho \rightarrow v_3 = v_2 \cdot \rho = 0,050 \cdot 2 = 0,10 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_3 = T_2 \cdot \rho = 1155 \cdot 2 = 2310 \text{ K}$$

4. Durum

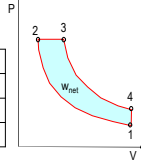
$$v_4 = v_1 = 1,005 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k \rightarrow P_4 = P_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k = 6629 \left(\frac{0,10}{1,005} \right)^{1,4} = 262 \text{ kPa}$$

$$T_4 = T_1 \frac{P_4}{P_1} = 350 \frac{262}{100} = 917 \text{ K}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4
P kPa	(100)	6629	6629	262
v m ³ /kg	1,005	0,050	0,10	1,005
T K	(350)	1155	2310	917



Net iş

$$q_s = C_p (T_3 - T_2) = 1,0035 (2310 - 1155) = 1159,04 \text{ kJ/kg,}$$

$$-q_R = C_v (T_4 - T_1) = 1,7165 (917 - 350) = 406,26 \text{ kJ/kg,}$$

$$w_{net} = q_s - |q_R| = 1159,04 - 406,26 = 752,78 \text{ kJ/kg}$$

İndike ortalama basınç

$$P_{m} = \frac{w_{net}}{v_1 - v_2} = \frac{752,78}{1,005 - 0,05} = 788,26 \text{ kPa}$$

Isıl verim

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_s} = \frac{752,78}{1159,04} = 0,649 = \%64,9$$

Problem 3

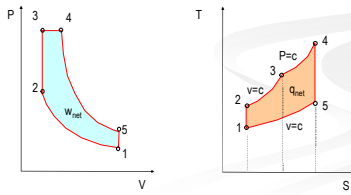
- Hava standard bir Diesel çevriminde sıkıştırma oranı 16 ve ön genişlemenin toplam genişlemeye oranı 1/12'dir. Sıkıştırma işleminin başlangıcında, havanın basıncı 95 kPa ve sıcaklığı 27°C'dir. Özgül ısılardan sıcaklıkla değişimini ihmal ederek,
 - Isı verme işlemi sonundaki sıcaklığı,
 - Isıl verimi,
 - Ortalama efektif basıncı, hesaplayınız.

Karma çevrim

Modern sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda, yanmanın ilk aşaması sabit hacme yakın olurken, son aşaması yaklaşık olarak sabit basınçta gerçekleşmektedir.

Yani, günümüz sıkıştırma ile ateşlemeli (diesel) motorlarının teorik çevrimi karma çevrimdir.

Yanmanın ilk aşaması sabit hacme yakın olurken, ikinci aşaması yaklaşık olarak sabit basınçta gerçekleşmektedir.



Karma çevrim...

Sabit hacimde sisteme verilen ısı;

$${}_2q_3 = u_3 - u_2 = C_v (T_3 - T_2)$$

Sabit hacimde basınç artış oranı

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

Sabit basınçta sisteme verilen ısı;

$${}_3q_4 = h_4 - h_3 = C_p (T_4 - T_3)$$

Buna göre, sisteme verilen ısı;

$$q_s = {}_2q_3 + {}_3q_4$$

$$q_s = (u_3 - u_2) + (h_4 - h_3)$$

$$q_s = C_v (T_3 - T_2) + C_p (T_4 - T_3)$$

Karma çevrim...

Sabit basınçta genişleme;

$${}_3w_4 = P_3 (v_4 - v_3)$$

Sabit basınçta genişleme (ön genişleme) oranı

$$\rho = \frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3}$$

İzentropik genişleme işi

$${}_4w_5 = u_4 - u_5 = C_v (T_4 - T_5)$$

$${}_4w_5 = \frac{R(T_4 - T_5)}{1 - k}$$

Sabit hacimde sistemden atılan ısı;

$$-q_R = {}_5q_1 = (u_5 - u_1) = C_v (T_5 - T_1)$$

Karma çevrim...

Net iş

$$w_{net} = {}_3w_4 + {}_4w_5 - |w_2|$$

veya;

$$w_{net} = q_{net} = q_s - |q_R|$$

Isıl verim

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_s} = \frac{q_{net}}{q_s} = \frac{q_s - |q_R|}{q_s} = 1 - \frac{|q_R|}{q_s}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{C_v (T_5 - T_1)}{C_v (T_3 - T_2) + C_p (T_4 - T_3)}$$

Pay ve payda C_v ye bölünür, T_1/T_2 parantezine alınırsa

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{\frac{T_5}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1 + k \left(\frac{T_4}{T_2} - \frac{T_3}{T_2} \right)} \right)$$

Karma çevrim...

$$(s_3 - s_2) + (s_4 - s_3) = s_5 - s_1$$

entropi eşitliğinden

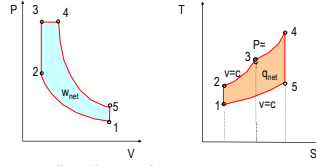
$$C_v \ln \frac{T_5}{T_1} = C_v \ln \frac{T_3}{T_2} + C_p \ln \frac{T_4}{T_3}$$

Eşitliğin her iki tarafı C_v 'ye bölünür, antilogaritması alınırsa

$$\frac{T_5}{T_1} = \left(\frac{T_3}{T_2}\right) \cdot \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^k = \lambda \rho^k$$

Isıl verim

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \left[\frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)} \right]$$



Karma çevrim...

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \left[\frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)} \right]$$

- Isıl verim eşitliğinin değerlendirilmesinden, ön genişleme oranının $\rho = 1$ olması durumunda, karma çevrimin ısıl veriminin sabit hacim çevrimine benzeyeceği, sabit hacimdeki basınç artış oranının $\lambda = 1$ olması durumunda ise, sabit basınç çevrimine benzeyeceği, anlaşılmaktadır.
- Karma çevrim, verimlilik açısından bu iki çevrimin arasında yer almaktadır.

ÖRNEK 3

Çalışma maddesi ideal hava olan teorik bir motor, karma çevrime göre çalışmakta ve çevrim hakkında aşağıdaki değerler bilinmektedir:

Atmosferik basınç $P_1 = 1 \text{ bar}$,

Atmosferik sıcaklık $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$,

Sıkıştırma oranı $\varepsilon = 12,7/1$,

Sabit hacimdeki basınç artış oranı $\lambda = 1,4$,

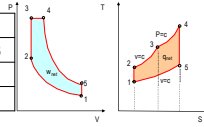
Ön genişleme oranı $\rho = 1,6$.

(Hava için $C_p = 1,0035 \text{ kJ/kgK}$, $C_v = 0,7165 \text{ kJ/kgK}$. Hesaplamalar 1 kg çalışma maddesi için yapılacaktır.)

- Çevrimin P-v ve T-s diyagramlarını çiziniz.
- Her durumdaki P, v ve T değerlerini içeren bir çizelge düzenleyiniz.
- Sisteme verilen ve dışarıya atılan ısıları,
- İndike ortalama basıncı ve ısıl verimi hesaplayınız.

ÇÖZÜM

Durum	1	2	3	4	5
P kPa	(100)	3499	4898,6	4898,6	271,3
v m ³ /kg	0,861	0,068	0,068	0,109	0,861
T K	(300)	829	1161	1858	814



1. Durum

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0,287 \times 300}{100} = 0,861 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2. Durum

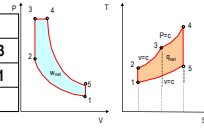
$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,861}{12,7} = 0,068 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 300 \cdot 12,7^{0,4} = 829 \text{ K}$$

$$P_2 = \frac{RT_2}{v_2} = \frac{0,287 \cdot 829}{0,068} = 3499 \text{ kPa}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4	5
P kPa	(100)	3499	4898,6	4898,6	271,3
v m ³ /kg	0,861	0,068	0,068	0,109	0,861
T K	(300)	829	1161	1858	814



3. Durum

$$v_3 = v_2 = 0,068 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_3 = P_2 \cdot \lambda = 3499 \cdot 1,4 = 4898,6 \text{ kPa}$$

$$T_3 = T_2 \cdot \lambda = 829 \cdot 1,4 = 1161 \text{ K}$$

4. Durum

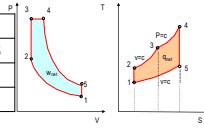
$$P_4 = P_3 = 4898,6 \text{ kPa}$$

$$v_4 = v_3 \cdot \rho = 0,068 \cdot 1,6 = 0,109 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_4 = T_3 \cdot \rho = 1161 \cdot 1,6 = 1858 \text{ K}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4	5
P kPa	(100)	3499	4898,6	4898,6	271,3
v m ³ /kg	0,861	0,068	0,068	0,109	0,861
T K	(300)	829	1161	1858	814



5. Durum

$$v_5 = v_1 = 0,861 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_5 = P_4 \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^k = 4898,6 \left(\frac{0,109}{0,861}\right)^{1,4} = 271,3 \text{ kPa}$$

$$T_5 = T_1 \frac{P_5}{P_1} = 300 \frac{271,3}{100} = 814 \text{ K}$$

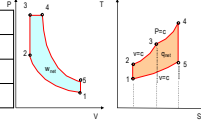
Sisteme verilen ve sistemden atılan ısılar

$$q_S = C_v (T_3 - T_2) + C_p (T_4 - T_3) = 0,7165 (1161 - 829) + 1,0035 (1858 - 1161) = 937,32 \text{ kJ/kg}$$

$$-q_R = C_v (T_5 - T_1) = 0,7165 (814 - 300) = 368,28 \text{ kJ/kg}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4	5
P kPa	(100)	3499	4898,6	4898,6	271,3
v m ³ /kg	0,861	0,068	0,068	0,109	0,861
T K	(300)	829	1161	1858	814



Net iş

$$w_{net} = {}_3w_5 - |{}_1w_2| = 951,74 - 379,58 = 572,16 \text{ kJ/kg}$$

İndike ortalama basınç

$$P_{mi} = \frac{w_{net}}{v_1 - v_2} = \frac{572,16}{0,861 - 0,068} = 721,5 \text{ kPa}$$

Isıl verim

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_s} = \frac{572,16}{937,32} = 0,61 = \%61$$

49

ÖRNEK

Çalışma maddesi ideal hava olan teorik bir motor, karma çevrime göre çalışmakta ve çevrim hakkında aşağıdaki değerler bilinmektedir:

Sıkıştırma başlangıcındaki basınç $P_1 = 0,98$ bar

Sıkıştırma başlangıcındaki sıcaklık $t_1 = 17$ °C

Sıkıştırma oranı $\epsilon = 12/1$

Sabit basınçta verilen ısı, sisteme verilen toplam ısının $1/4$ 'ü

Maksimum çevrim basıncı $P_{max} = 60$ bar

(Hava için $C_p = 1,004$ kJ/kgK, $C_v = 0,717$ kJ/kgK. Hesaplamalar 1 kg çalışma maddesi için yapılacaktır.)

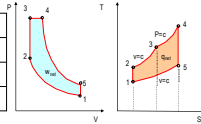
■ Çevrimin P-v ve T-s diyagramlarını çiziniz.

■ Her durumdaki P, v ve T değerlerini içeren bir tablo düzenleyiniz.

50

ÇÖZÜM

Durum	1	2	3	4	5
P kPa	(98)	3177,5	(6000)	(6000)	215,8
v m ³ /kg	0,849	0,071	0,071	0,079	0,849
T K	(290)	783,6	1479,7	1645,4	638,6



1. Durum

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0,287 \times 290}{98} = 0,849 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2. Durum

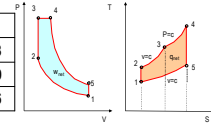
$$v_2 = \frac{v_1}{\epsilon} = \frac{0,849}{12} = 0,071 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_2 = P_1 \cdot \epsilon^k = 98 \cdot 12^{1,4} = 3177,5 \text{ kPa}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{k-1} = 290 \cdot 12^{0,4} = 783,6 \text{ K}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4	5
P kPa	(98)	3177,5	(6000)	(6000)	215,8
v m ³ /kg	0,849	0,071	0,071	0,079	0,849
T K	(290)	783,6	1479,7	1645,4	638,6



3. Durum

$$v_3 = v_2 = 0,071 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_3 = T_2 \frac{P_3}{P_2} = 783,6 \frac{6000}{3177,5} = 1479,7 \text{ K}$$

$$q_{23} = C_v (T_3 - T_2) = 0,717 (1479,7 - 783,6) = 499,1 \text{ kJ/kg}$$

4. Durum

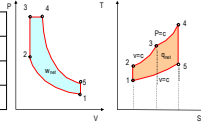
$$q_s = q_{23} + q_{34} = q_{23} + \frac{q_s}{4}$$

$$q_s = \frac{4}{3} q_{23} = \frac{4}{3} 499,1 = 665,5 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{34} = q_s - q_{23} = 166,4 \text{ kJ/kg}$$

ÇÖZÜM...

Durum	1	2	3	4	5
P kPa	(98)	3177,5	(6000)	(6000)	215,8
v m ³ /kg	0,849	0,071	0,071	0,079	0,849
T K	(290)	783,6	1479,7	1645,4	638,6



4. Durum (devami)

$$T_4 = \frac{q_{34}}{C_p} + T_3 = \frac{166,4}{1,004} + 1479,7 = 1645,4 \text{ K}$$

$$v_4 = v_3 \frac{T_4}{T_3} = 0,071 \frac{1645,4}{1479,7} = 0,079 \text{ m}^3/\text{kg}$$

5. Durum

$$v_5 = v_1 = 0,849 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$P_5 = P_4 \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^k = 6000 \left(\frac{0,079}{0,849} \right)^{1,4} = 215,8 \text{ kPa}$$

$$T_5 = T_1 \frac{P_5}{P_1} = 290 \frac{215,8}{98} = 638,6 \text{ K}$$

Problem 4

Çalışma maddesi ideal hava olan teorik bir motor, karma çevrime göre çalışmakta ve çevrim hakkında aşağıdaki değerler bilinmektedir:

Sıkıştırma başlangıcındaki basınç $P_1 = 1$ bar

Sıkıştırma başlangıcındaki sıcaklık $t_1 = 27$ °C

Sıkıştırma oranı $\epsilon = 20/1$

Sabit hacimde verilen ısı, sisteme verilen toplam ısının $3/5$ 'i

Maksimum çevrim basıncı $P_{max} = 90$ bar

(Hava için $C_p = 1,004$ kJ/kgK, $k = 1,4$ tür. Hesaplamalar 1 kg çalışma maddesi için yapılacaktır.)

■ Çevrimin P-v ve T-s diyagramlarını çiziniz.

■ Her durumdaki P, v ve T değerlerini içeren bir tablo düzenleyiniz.

■ Bu çevrimin $V_{14} = 3,5$ litre olan dört zamanlı bir motordan 3000 1/min'de elde edilmiş olduğu varsayılırsa, motorun bu koşullardaki indike gücü kaç kW'tır?

Hava standard çevrimlerin karşılaştırılması

Karşılaştırma için;

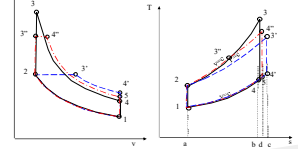
1. İki kısıtlamayı belirleyiniz.
2. Sabit basınç veya sabit hacim çevrimlerinden birinin P-v ve T-s diyagramlarını çiziniz.
3. Çizdiğiniz çevrimin 1 noktasından başlayarak ve verilen kısıtlamalara uygun olarak, diğer çevrimin P-v ve T-s diyagramlarını da aynı koordinatlarda çiziniz.
4. Karma çevrimi her zaman diğer iki çevrim arasına yerleştiriniz.
5. Isıl verim formülünü, her iki çevrimde de sabit tutulan miktarlardan biri cinsinden yazınız.

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_R|}{q_S} = \frac{w_{net}}{q_S} = \frac{w_{net}}{w_{net} + q_R} \dots \text{vb.}$$

6. T-s diyagramında belirleyeceğimiz dışarıya atılan ısı alanlarından küçük olan çevrimin verimi veya dışarıya atılan ısılar eşitse, sisteme verilen ısı alanı büyük olan çevrimin verimi daha yüksektir.

Hava standard çevrimlerin karşılaştırılması...

- Sıkıştırma oranları ve sisteme verilen ısıları eşit olan hava standard çevrimler



$(q_S)_{otto} = (q_S)_{karma} = (q_S)_{diesel}$
(Isının çevrimlere verdiği işlemlere ait eğrilerin altında kalan alanlar eşit)

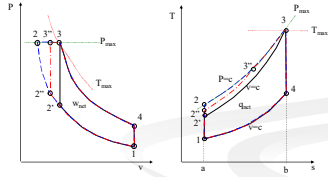
alan a-2-3-b-a = alan a-2-3'-4"-d-a = alan a-2-3'-c-a
Ancak, dışarıya atılan ısıları ifade eden alanlar farklı
Alan a-1-4-b-a < alan a-1-5-d-a < alan a-1-4'-c-a
 $(q_R)_{otto} < (q_R)_{karma} < (q_R)_{diesel}$

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_R|}{q_S} = 1 - \frac{|q_R|}{sabit} \text{ olduğundan;}$$

$$(\eta_t)_{otto} > (\eta_t)_{karma} > (\eta_t)_{diesel}$$

Hava standard çevrimlerin karşılaştırılması...

- Maksimum basınç ve sıcaklıkları eşit çevrimler



Soru

- Maksimum sıcaklıkları ve q_S ısıları eşit olan çevrimleri verimlilik yönünden karşılaştırınız.

SON