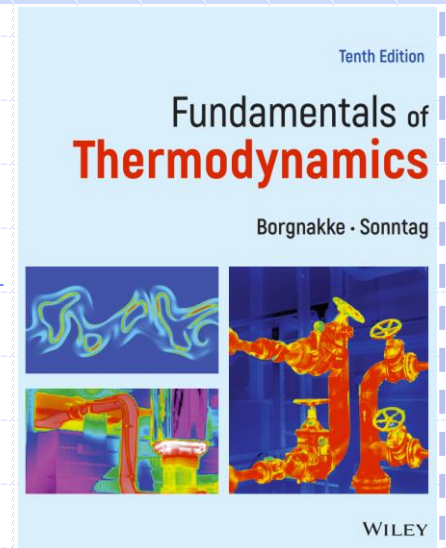


**Fundamentals of Thermodynamics**  
**Borgnakke – Sonntag**  
**10<sup>η</sup> έκδοση**  
**Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2023**



**Κεφάλαιο 10ο**  
**Συστήματα ισχύος και ψύξης –**  
**Αέρια εργαζόμενα ρευστά**

*Επιμέλεια παρουσίασης*  
*καθηγητής Γ. Σκόδρας*

# Περιεχόμενα...

- ✓ Εισαγωγή
- ✓ Κύκλοι ισχύος πρότυπου αέρα
- ✓ Ο κύκλος Brayton
- ✓ Ο απλός κύκλος αεριοστροβίλου με αναγεννητή
- ✓ Διαμορφώσεις κύκλου ισχύος αεριοστροβίλου
- ✓ Κύκλος πρότυπου αέρα για αερίωση
- ✓ Ο κύκλος ψύξης πρότυπου αέρα
- ✓ Κύκλοι ισχύος εμβολοφόρου κινητήρα
- ✓ Ο κύκλος Otto
- ✓ Ο κύκλος Diesel
- ✓ Ο κύκλος Stirling
- ✓ Οι κύκλοι Atkinson και Miller
- ✓ Συστήματα συνδυασμένου κύκλου ισχύος και ψύξης
- ✓ Βασικές έννοιες και σχέσεις

# Εισαγωγή...

- ❑ Μελετώνται τα συστήματα παραγωγής ισχύος και ψύξης που σχετίζονται με διεργασίες σταθεροποιημένης ροής, με έμφαση σε αέρια, μη συμπυκνώσιμα εργαζόμενα ρευστά, αναγνωρίζοντας ότι η διαφορά του έργου εκτόνωσης και συμπίεσης είναι σημαντικά μικρότερη
- ❑ Ακολούθως, μελετώνται οι κύκλοι ισχύος για συστήματα εμβόλου/κυλίνδρου που περιλαμβάνουν έργο μετακίνησης οριακών επιφανειών. Ολοκληρώνουμε το κεφάλαιο εξετάζοντας διατάξεις συστημάτων συνδυασμένου κύκλου
- ❑ Εισάγεται η έννοια του κύκλου πρότυπου αέρα, του βασικού μοντέλου που χρησιμοποιείται στα συστήματα ισχύος με αέρια

# Κύκλοι ισχύος πρότυπου αέρα...

Ανάλογα με τον τρόπο παροχής θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο, οι θερμικές μηχανές διακρίνονται σε:

- ❑ **Κινητήρες εσωτερικής καύσης**, (ΜΕΚ), όπου η ενέργεια που παρέχεται στο εργαζόμενο μέσο από την καύση του καυσίμου εντός των ορίων του συστήματος. Σε αυτές η παροχή θερμότητας και η παραγωγή ισχύος γίνεται στην ίδια διάταξη-συσκευή, πχ. κινητήρες Otto και Diesel και αεριοστρόβιλοι (κινητήρες Brayton)
- ❑ **Κινητήρες εξωτερικής καύσης**, όπου η παροχή θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο γίνεται από μια εξωτερική πηγή σε μια συσκευή (πχ. λέβητας, πυρηνικός αντιδραστήρας κλπ.), και η παραγωγή ισχύος γίνεται σε άλλη συσκευή, τον ατμοστρόβιλο, πχ. μηχανές Stirling και Ericsson

# Κύκλοι ισχύος πρότυπου αέρα...

- ❑ Σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης το εργαζόμενο ρευστό δεν ακολουθεί έναν πλήρη θερμοδυναμικό κύκλο, αλλά λειτουργεί στον λεγόμενο ανοιχτό κύκλο
- ❑ Για τις ανάγκες της ανάλυσης οι κινητήρες εσωτερικής καύσης θεωρούνται κατά ως κλειστοί, και ο **κύκλος πρότυπου αέρα** είναι μια ικανοποιητική προσέγγιση και βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:
  1. Μια σταθερή μάζα αέρα αποτελεί το εργαζόμενο ρευστό σε ολόκληρο τον κύκλο, ενώ ο αέρας είναι πάντα ένα ιδανικό αέριο, οπότε, αγνοούνται οι διεργασίες εισαγωγής ή εξαγωγής
  2. Η διεργασία καύσης αντικαθίσταται από μια διεργασία μεταφοράς θερμότητας από εξωτερική πηγή
  3. Ο κύκλος ολοκληρώνεται με απόρριψη θερμότητας προς το περιβάλλον (σε αντίθεση με τη διεργασία εξαγωγής και εισαγωγής ενός πραγματικού κινητήρα)
  4. Όλες οι διεργασίες είναι εσωτερικά αντιστρεπτές
  5. Συχνά θεωρείται ότι ο αέρας έχει σταθερή ειδική θερμότητα, υπολογιζόμενη στους 300 K, κάτι που ονομάζεται ιδιότητα πρότυπου ψυχρού αέρα, αναγνωρίζοντας ότι αυτό δεν συνιστά το πιο ακριβές μοντέλο

# Κύκλοι ισχύος πρότυπου αέρα...

- Η σχετική πίεση και ο σχετικός όγκος είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας και υπολογίζονται με βάση δύο σταθερές αναλογίας, τις  $A_1$  και  $A_2$

Σχετική πίεση  $P_r$

$$P_r = \exp[s_T^0/R - A_1] \cdot v_r = A_2 T/P_r$$

Σχετικός ειδικός όγκος  $v_r$

- Όστε, για μια ισεντροπική διεργασία ( $s_1 = s_2$ ) είναι:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} = \frac{e^{s_{T_2}^0/R}}{e^{s_{T_1}^0/R}} \approx \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{C_p/R} \quad \text{και} \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}} \approx \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{C_v/R}$$

Το σύμβολο  $\approx$  αναφέρεται στην παραδοχή της σταθερής ειδικής θερμότητας

- Στον πίνακα που ακολουθεί, δίνονται οι σχετική πίεση και ο σχετικός ειδικός όγκος για ισεντροπικές διεργασίες

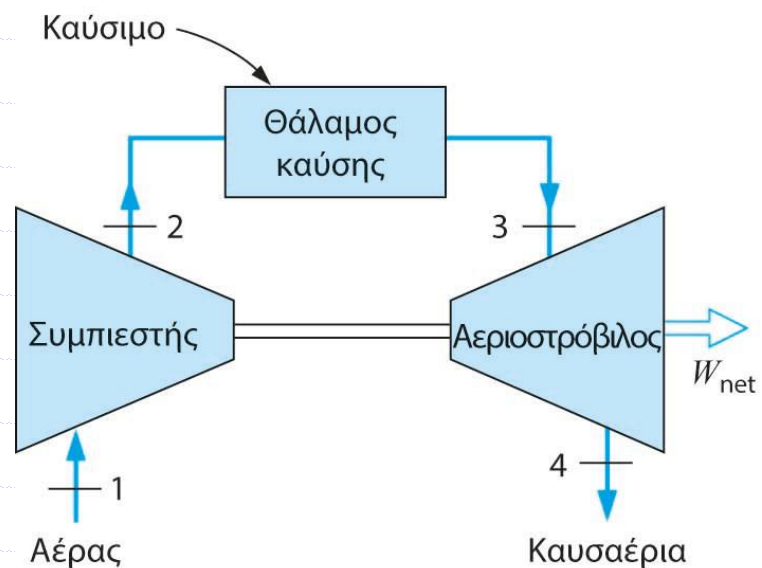
# Κύκλοι ισχύος πρότυπου αέρα...

**ΠΙΝΑΚΑΣ Α.7.2** Οι συναρτήσεις της σχετικής πίεσης και του σχετικού όγκου σε ισηντροπικές διεργασίες

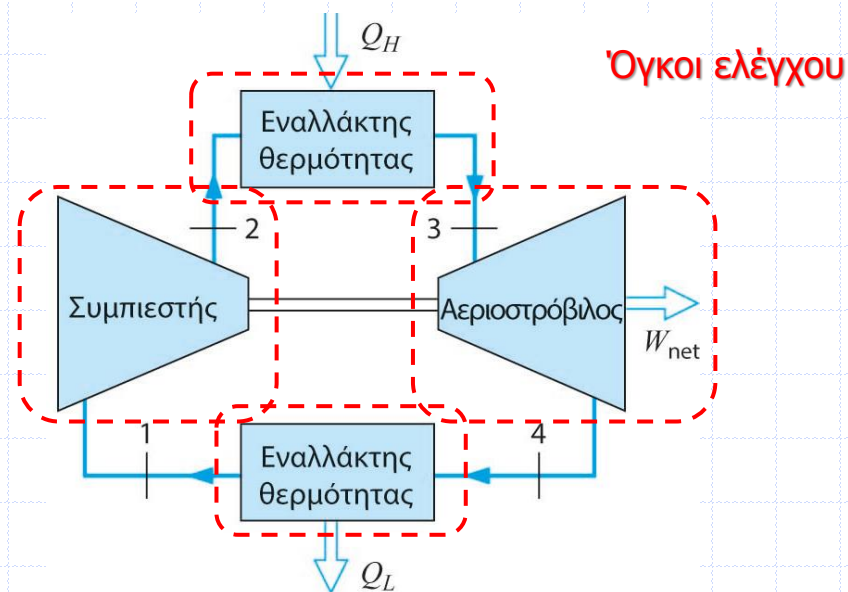
$T$ [K]	$P_r$	$v_r$	$T$ [K]	$P_r$	$v_r$	$T$ [K]	$P_r$	$v_r$
200	0,2703	493,47	700	23,160	20,155	1900	1327,5	0,95445
220	0,3770	389,15	720	25,742	18,652	1950	1485,8	0,87521
240	0,5109	313,27	740	28,542	17,289	2000	1658,6	0,80410
260	0,6757	256,58	760	31,573	16,052	2050	1847,1	0,74012
280	0,8756	213,26	780	34,851	14,925	2100	2052,1	0,68242
290	0,9899	195,36	800	38,388	13,897	2150	2274,8	0,63027
298,15	1,0907	182,29	850	48,468	11,695	2200	2516,2	0,58305
300	1,1146	179,49	900	60,520	9,9169	2250	2777,5	0,54020
320	1,3972	152,73	950	74,815	8,4677	2300	3059,9	0,50124
340	1,7281	131,2	1000	91,651	7,2760	2350	3364,6	0,46576
360	2,1123	113,65	1050	111,35	6,2885	2400	3693,0	0,43338
380	2,5548	99,188	1100	134,25	5,4641	2450	4046,2	0,40378
400	3,0612	87,137	1150	160,73	4,7714	2500	4425,8	0,37669
420	3,6373	77,003	1200	191,17	4,1859	2550	4833,0	0,35185
440	4,2892	68,409	1250	226,02	3,6880	2600	5269,5	0,32903
460	5,0233	61,066	1300	265,72	3,2626	2650	5736,7	0,30805
480	5,8466	54,748	1350	310,74	2,8971	2700	6236,2	0,28872

# Ο κύκλος Brayton...

- Ο κύκλος Brayton περιλαμβάνει δύο διεργασίες σταθερής πίεσης και δύο ισεντροπικές διεργασίες, και το εργαζόμενο ρευστό είναι μη συμπυκνώσιμο αέριο



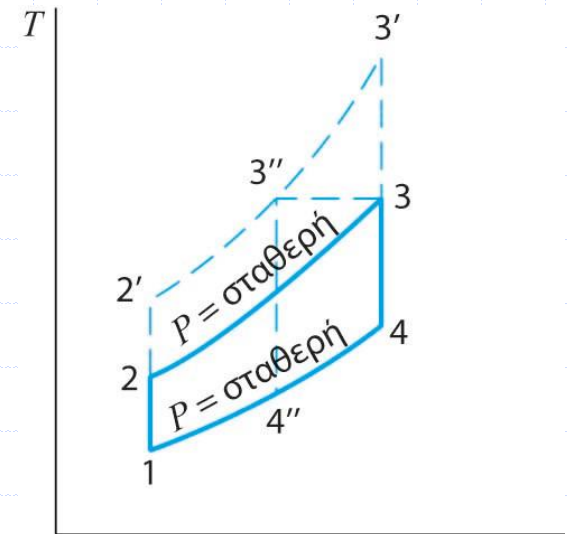
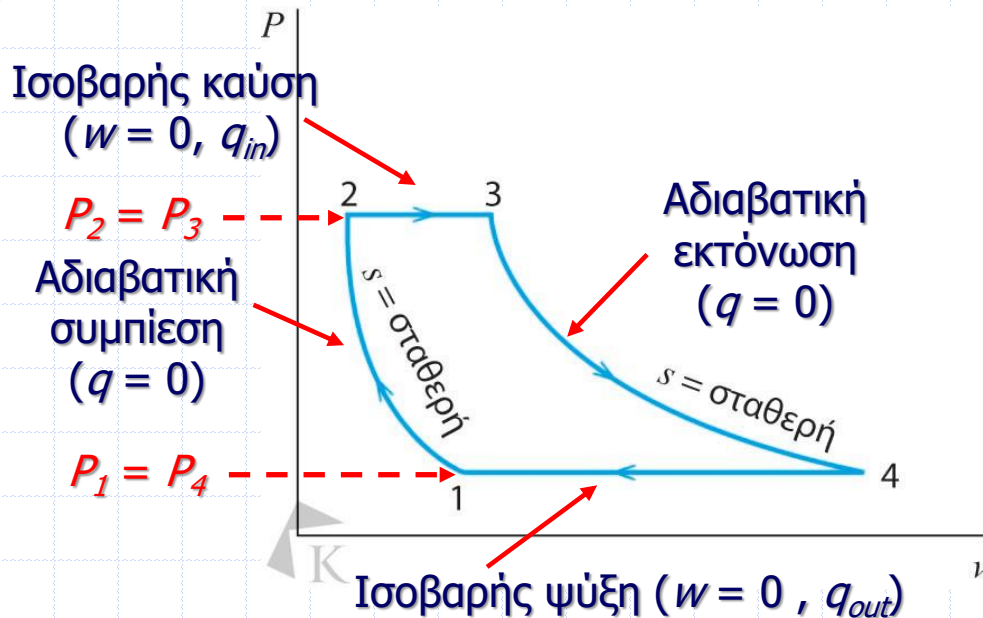
(α) Ανοιχτός κύκλος



(β) Κλειστός κύκλος



# Ο κύκλος Brayton...



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριμίδης

**ΠΙΝΑΚΑΣ 10.1** Οι διεργασίες του κύκλου Brayton

Στοιχείο	Εξίσωση ενέργειας	Εξίσωση εντροπίας	Διεργασία
Συμπίεσής	$0 = h_1 + w_C - h_2$	$0 = s_1 - s_2 + (0/T) + 0$	$q = 0, s_1 = s_2$
Καύση	$0 = h_2 - h_3 + q_H$	$0 = s_2 - s_3 + \int dq/T + 0$	$P_3 = P_2 = C$
Αεριοστρόβιλος	$0 = h_3 - h_4 - w_T$	$0 = s_3 - s_4 + (0/T) + 0$	$q = 0, s_3 = s_4$
Εναλλάκτης θερμότητας	$0 = h_4 - h_1 - q_L$	$0 = s_4 - s_1 - \int dq/T + 0$	$P_4 = P_1 = C$

# Ο κύκλος Brayton...

- Η ολική απόδοση του κύκλου Brayton είναι:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \approx 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

- Η αύξηση της πίεσης στον συμπιεστή ισούται με τη μείωση της πίεσης στον στρόβιλο:

Λόγος συμπίεσης  $\rightarrow r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} \leftarrow$  Λόγοι ισεντροπικών πιέσεων

- Για τις ισεντροπικές διεργασίες ισχύουν οι σχέσεις:

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

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \therefore \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \quad \text{και} \quad \frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1$$

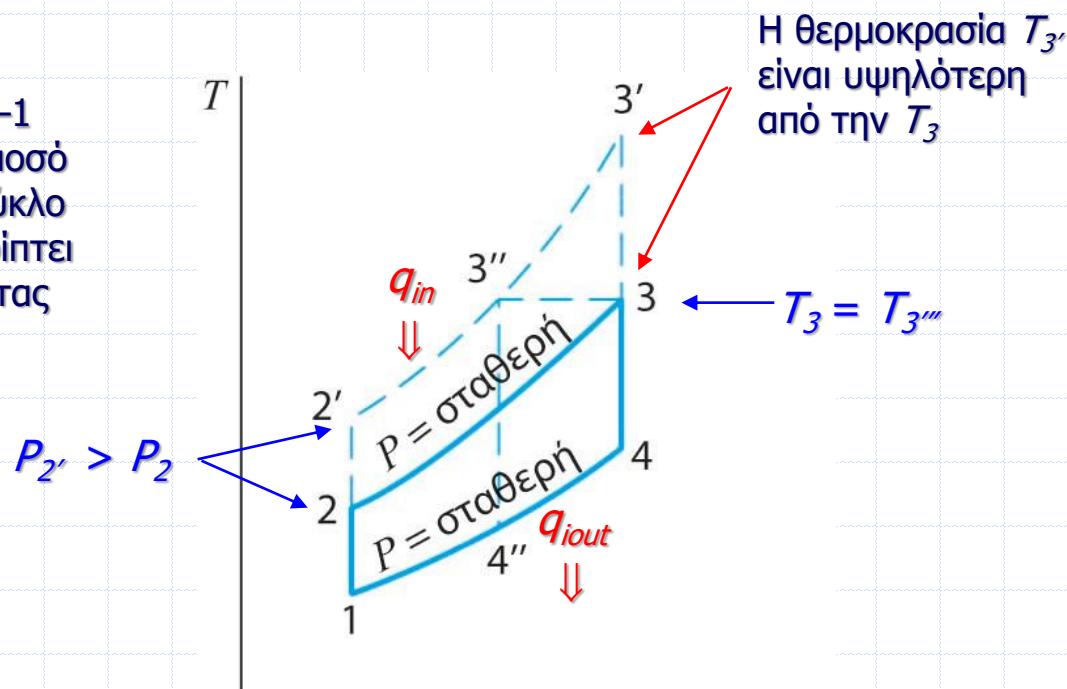
- Οπότε, η απόδοση του κύκλου είναι:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - r_p^{-(k-1)/k}$$

Η απόδοση του κύκλου αυξάνει με τον λόγο των πιέσεων

# Ο κύκλος Brayton...

Ο κύκλος 1-2'-3'-4-1  
λαμβάνει μεγαλύτερο ποσό  
θερμότητας από τον κύκλο  
1-2-3-4-1, ενώ απορρίπτει  
το ίδιο ποσό θερμότητας



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτικής

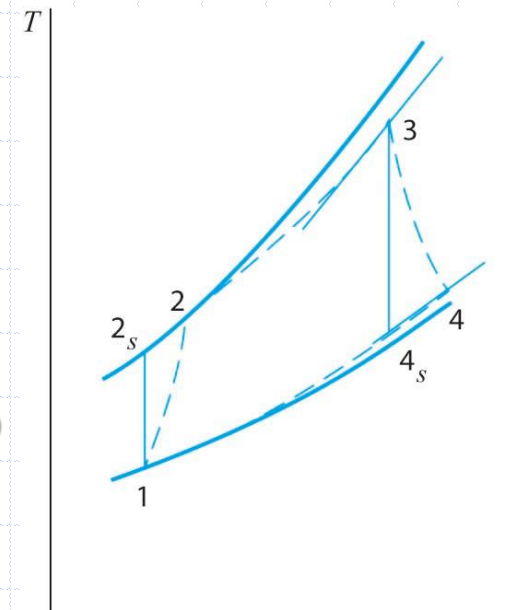
- Διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία  $T_3$  και αυξήσουμε τον λόγο των πιέσεων, ο κύκλος που προκύπτει είναι ο 1-2'-3''-4''-1, που έχει υψηλότερη απόδοση από τον αρχικό κύκλο, αλλά η μεταφορά θερμότητας και το έργο ανά κιλό εργαζόμενου ρευστού ως εκ τούτου μεταβάλλονται

# Ο κύκλος Brayton...

- ❑ Οι αποδόσεις του συμπιεστή και του στροβίλου ορίζονται ως προς τις ισεντροπικές διεργασίες, και οι ορισμοί της απόδοσης του συμπιεστή και του στροβίλου είναι:

$$\eta_{\text{comp}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad \eta_{\text{turb}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

- ❑ Το καταναλισκόμενο έργο στον συμπιεστή (επιστρεφόμενο έργο) του κύκλου Brayton είναι μεγάλο σχετικά με το έργο του στροβίλου (40% έως 80%)
- ❑ Αντίθετα, στον κύκλο Rankine, απαιτείται μόνο το 1% ή το 2% του έργου του στροβίλου για την κίνηση της αντλίας, καθώς αξιοποιείται η πολύ μεγάλη διαφορά του ειδικού όγκου του υγρού και του ατμού του εργαζόμενου ρευστού



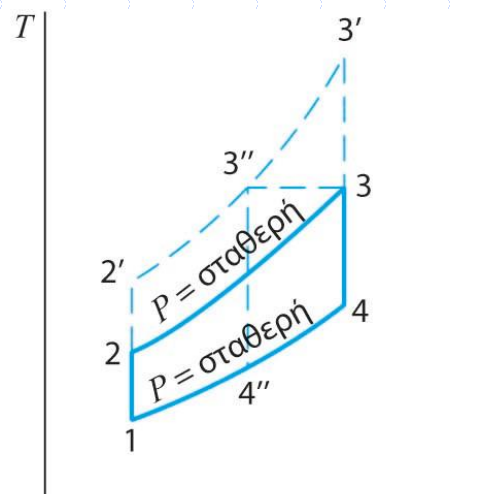
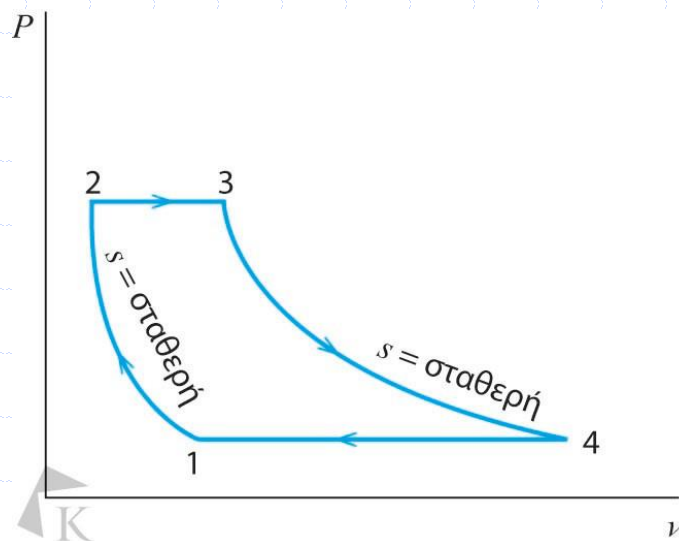
© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριμας

# Ο κύκλος Brayton...

## Παράδειγμα 10.1

Σε έναν τυπικό κύκλο Brayton, ο αέρας εισέρχεται στον συμπιεστή σε πίεση 0,1 MPa και θερμοκρασία 15°C. Η πίεση στην οποία εγκαταλείπει τον συμπιεστή είναι ίση με 1,0 MPa και η μέγιστη θερμοκρασία στον κύκλο ισούται με 1100°C. Προσδιορίστε 1. Την πίεση και τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του κύκλου. 2. Το έργο του συμπιεστή, το έργο του αεριοστροβίλου και την απόδοση του κύκλου.

Για κάθε όγκο ελέγχου που αναλύεται, το μοντέλο αφορά ένα ιδανικό αέριο με σταθερή ειδική θερμότητα στους 300K, ενώ κάθε διεργασία είναι σταθερή χωρίς μεταβολή της κινητικής ή της δυναμικής ενέργειας. Το διάγραμμα για αυτό το παράδειγμα είναι στο σχήμα.



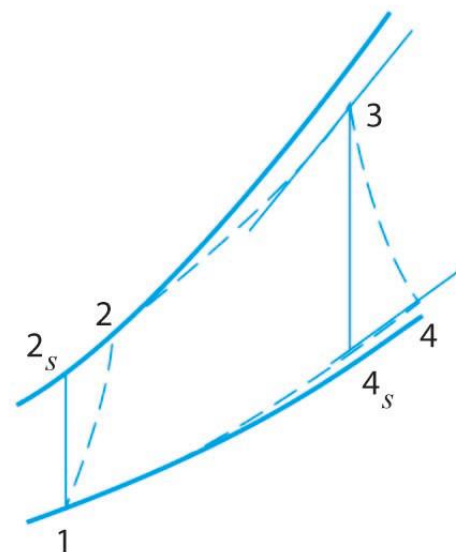
# Ο κύκλος Brayton...

## Παράδειγμα 10.2

Θεωρήστε έναν αεριοστρόβιλο με τον αέρα να εισέρχεται στον συμπιεστή κάτω από τις ίδιες συνθήκες με το Παράδειγμα 10.1 και να εξέρχεται υπό πίεση 1,0 MPa. Η μέγιστη θερμοκρασία ισούται με 1100°C. Υποθέστε απόδοση συμπιεστή ίση με 80%, απόδοση στροβίλου 85%, καθώς και μείωση (drop) της πίεσης μεταξύ του συμπιεστή και του στροβίλου ίση με 15 kPa. Προσδιορίστε το έργο του συμπιεστή, το έργο του στροβίλου και την απόδοση του κύκλου.

Όπως στο προηγούμενο παράδειγμα, για κάθε όγκο ελέγχου, το μοντέλο είναι ένα ιδανικό αέριο με σταθερή ειδική θερμότητα στους 300 K, ενώ κάθε διεργασία είναι σταθεροποιημένη, χωρίς μεταβολή της κινητικής ή της δυναμικής ενέργειας

Σε αυτό το παράδειγμα, το διάγραμμα είναι το σχήμα και ο ιδανικός κύκλος δίνεται από τέσσερις ιδιότητες ίδιες με αυτές στο Παράδειγμα 10.1. Οι επιπλέον τρεις ιδιότητες εξηγούν κατά ποιον τρόπο ο πραγματικός κύκλος διαφέρει από τον ιδανικό

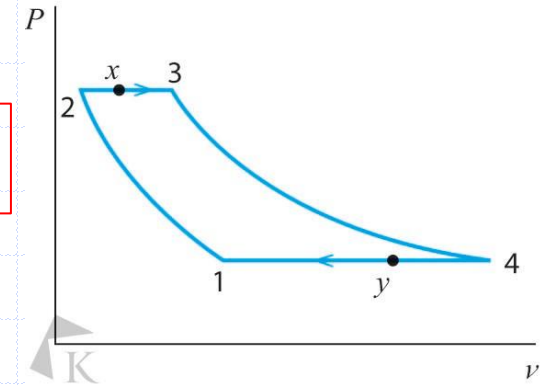
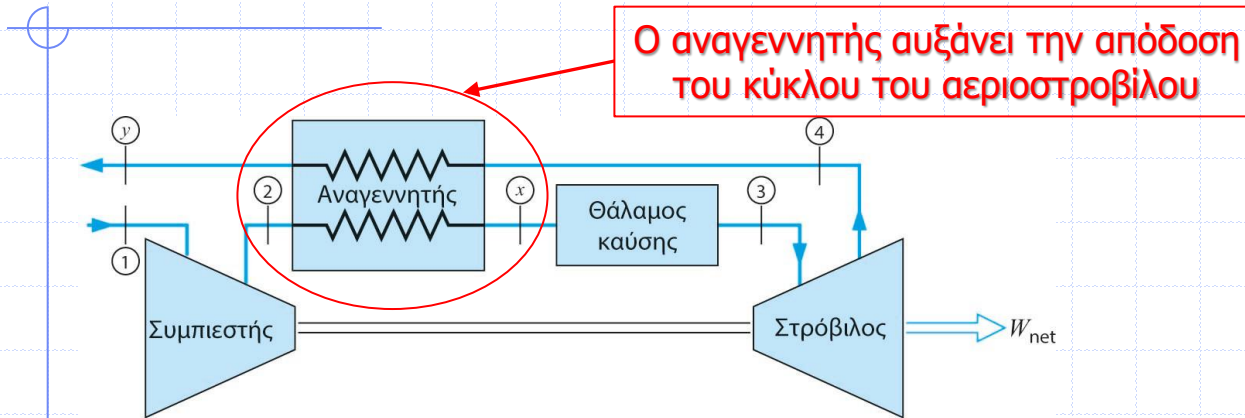


# Ο κύκλος Brayton...

□ Γίνονται οι ακόλουθες συγκρίσεις για τα Παραδείγματα 10.1 και 10.2

	$w_c$	$w_t$	$w_{net}$	$q_H$	$\eta_{th}$
Παράδειγμα 10.1 (Ιδανικός)	269,5	664,7	395,2	819,3	48,2
Παράδειγμα 10.2 (Πραγματικός)	337,0	562,4	225,3	751,8	30,0

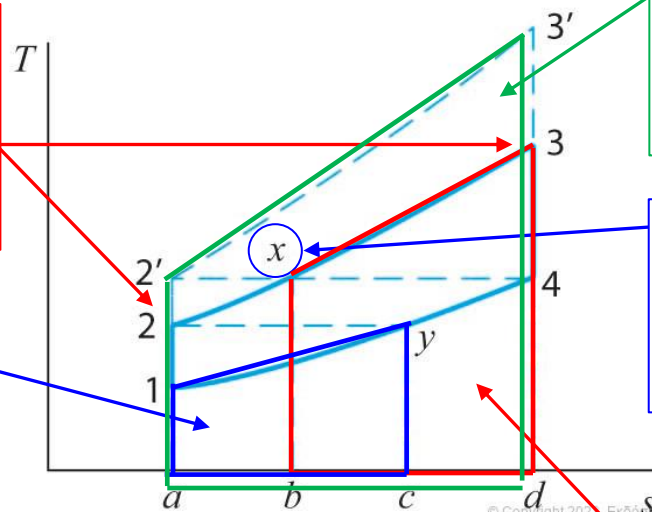
# Ο απλός κύκλος αεριοστροβίλου με αναγεννητή...



Η θερμοκρασία  $T_3$  των καυσαερίων στην έξοδο του αεριοστροβίλου είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία  $T_2$  στην έξοδο του συμπιεστή

Στον κύκλο 1-2'-3'-4-1, εάν η θερμοκρασία  $T_{2'}$  στην έξοδο του συμπιεστή είναι ίση με την θερμοκρασία  $T_4$  στην έξοδο του συμπιεστή, δεν είναι δυνατή η χρήση αναγεννητή

Το εμβαδόν  $\gamma-1-a-c-\gamma$  είναι η απορριπτόμενη από τον κύκλο θερμότητα



Η θερμοκρασία  $T_x$  στην έξοδο αναγεννητή μπορεί να είναι ίση (το μέγιστο) με την θερμοκρασία  $T_4$  στην έξοδο του συμπιεστή

Το εμβαδόν  $x-3-d-b-x$  είναι η προσδιδόμενη στον κύκλο θερμότητα

- Η αύξηση του λόγου των πιέσεων αυξάνει την απόδοση του κύκλου αεριοστροβίλου (όταν  $T_{2'} = T_x = T_4$ )



# Ο απλός κύκλος αεριοστρόβιλου με αναγεννητή...

- Η απόδοση του κύκλου με αναγέννηση είναι:

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{w_t - w_c}{q_H}$$

$$q_H \cong C_p(T_3 - T_x)$$

$$w_t \cong C_p(T_3 - T_4)$$

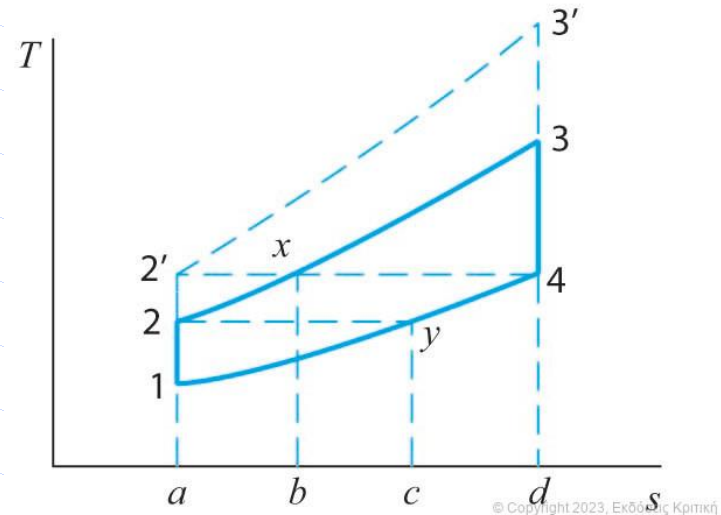
- Για έναν ιδανικό αναγεννητή είναι  $T_4 = T_x$  οπότε  $q_H = w_t$  και άρα:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{w_c}{w_t} \cong 1 - \frac{C_p(T_2 - T_1)}{C_p(T_3 - T_4)}$$

$$= 1 - \frac{T_1(T_2/T_1 - 1)}{T_3(1 - T_4/T_3)} = 1 - \frac{T_1[(P_2/P_1)^{(k-1)/k} - 1]}{T_3[1 - (P_1/P_2)^{(k-1)/k}]}$$

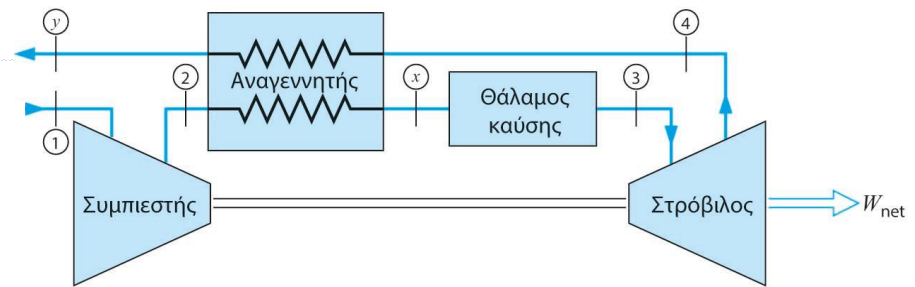
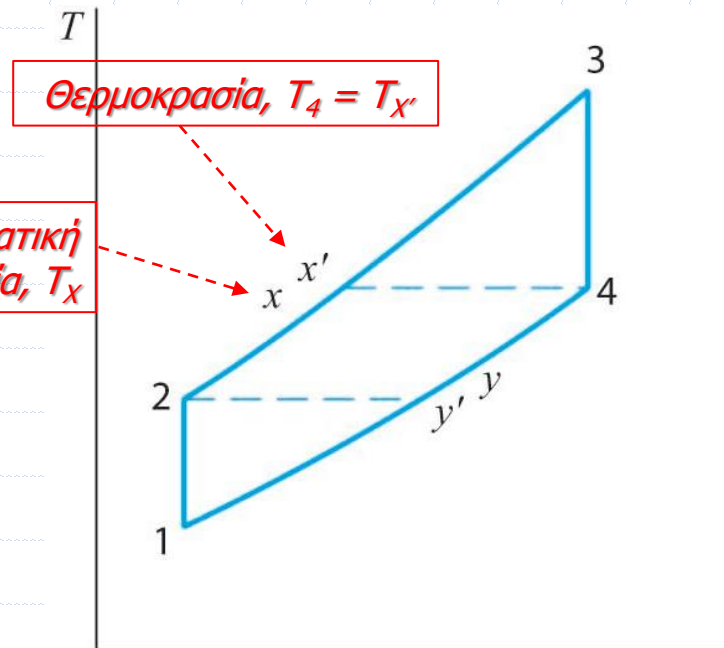
$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = 1 - \frac{T_2}{T_3}$$

- Στον ιδανικό κύκλο με αναγέννηση, η θερμική απόδοση εξαρτάται τόσο από τον λόγο των πιέσεων αλλά και από τον λόγο της ελάχιστης προς τη μέγιστη θερμοκρασία
- Σε αντίθεση με τον κύκλο Brayton, η απόδοση μειώνεται με την αύξηση του λόγου των πιέσεων



# Ο απλός κύκλος αεριοστροβίλου με αναγεννητή...

- Η αποτελεσματικότητα ενός κύκλου με αναγέννηση προσδιορίζεται από την απόδοση του αναγεννητή



- Η απόδοση του αναγεννητή (regenerator) είναι:

$$\eta_{\text{reg}} = \frac{h_x - h_2}{h'_x - h_2}$$

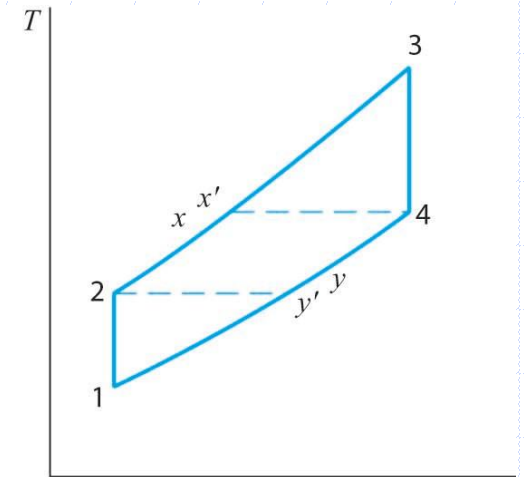
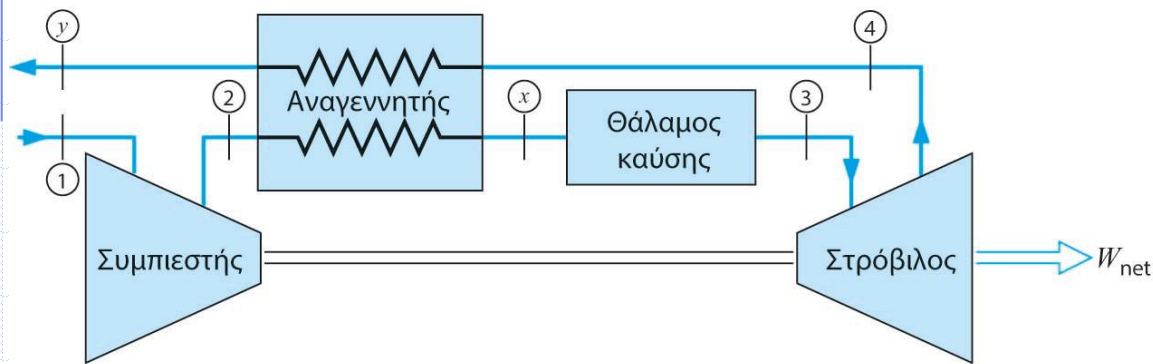
- Για σταθερή ειδική θερμότητα:

$$\eta_{\text{reg}} = \frac{T_x - T_2}{T'_x - T_2}$$

# Ο απλός κύκλος αεριοστροβίλου με αναγεννητή...

## Παράδειγμα 10.3

Αν ένας ιδανικός αναγεννητής ενσωματωθεί στον κύκλο του Παραδείγματος 10.1, προσδιορίστε τη θερμική απόδοση του κύκλου. Το διάγραμμα για αυτό το παράδειγμα είναι το σχήμα. Οι τιμές προέρχονται από το Παράδειγμα 10.1.



© Copyright 2023, Εκδόσεις ΚριμαS

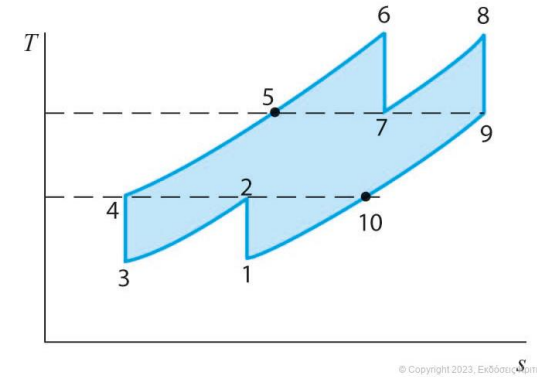
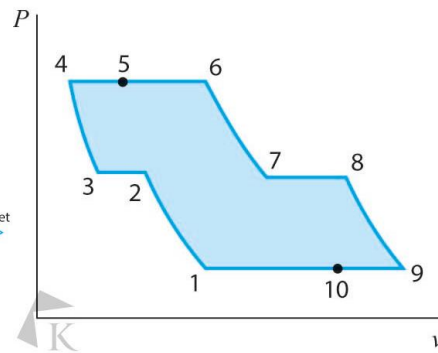
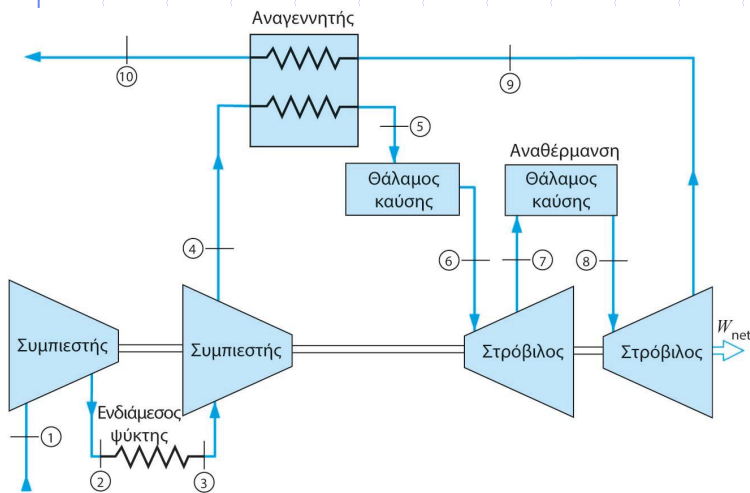
# Διαμορφώσεις κύκλου ισχύος αεριοστροβίλου...

## Παράδειγμα 10.4

Ένας κύκλος ισχύος, υπό τις συνθήκες του πρότυπου αέρα, έχει τις ίδιες καταστάσεις με αυτές που δίνονται στο Παράδειγμα 10.1. Σε αυτό τον κύκλο, ωστόσο, τόσο ο συμπιεστής όσο και ο στρόβιλος είναι αντιστρεπτές, ισοθερμοκρασιακές διεργασίες. Υπολογίστε το έργο του συμπιεστή και το έργο του στροβίλου και συγκρίνετε τα αποτελέσματα με αυτά του Παραδείγματος 10.1.

# Διαμορφώσεις κύκλου ισχύος αεριοστροβίλου...

- ❑ Ο κύκλος Brayton, αποτελεί το εξιδανικευμένο μοντέλο για τη μονάδα παραγωγής ενέργειας αεριοστροβίλου, και περιλαμβάνει έναν αντιστρεπτό, αδιαβατικό συμπιεστή και έναν αντιστρεπτό, αδιαβατικό στρόβιλο
- ❑ Μια τροποποίηση του κύκλου αεριοστροβίλου Brayton (που τείνει να προσομοιάζει με τον κύκλο Ericsson) είναι η χρήση πολλαπλών βαθμίδων συμπίεσης με ενδιάμεση ψύξη και πολλαπλών βαθμίδων εκτόνωσης με αναθέρμανση



Κύκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη και αναγέννηση, για πρότυπο αέρα

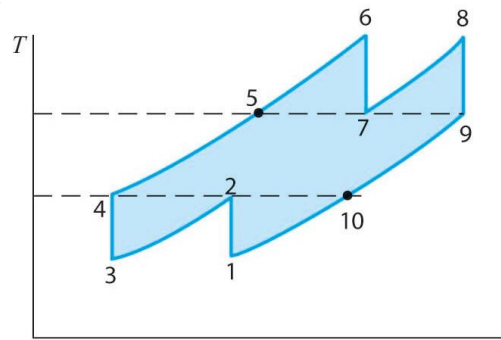
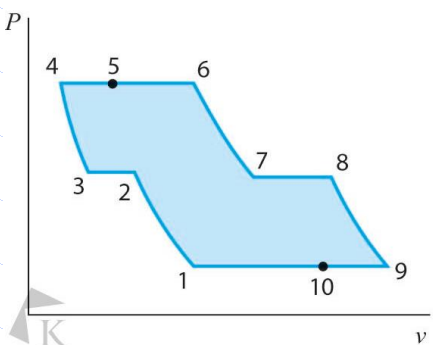
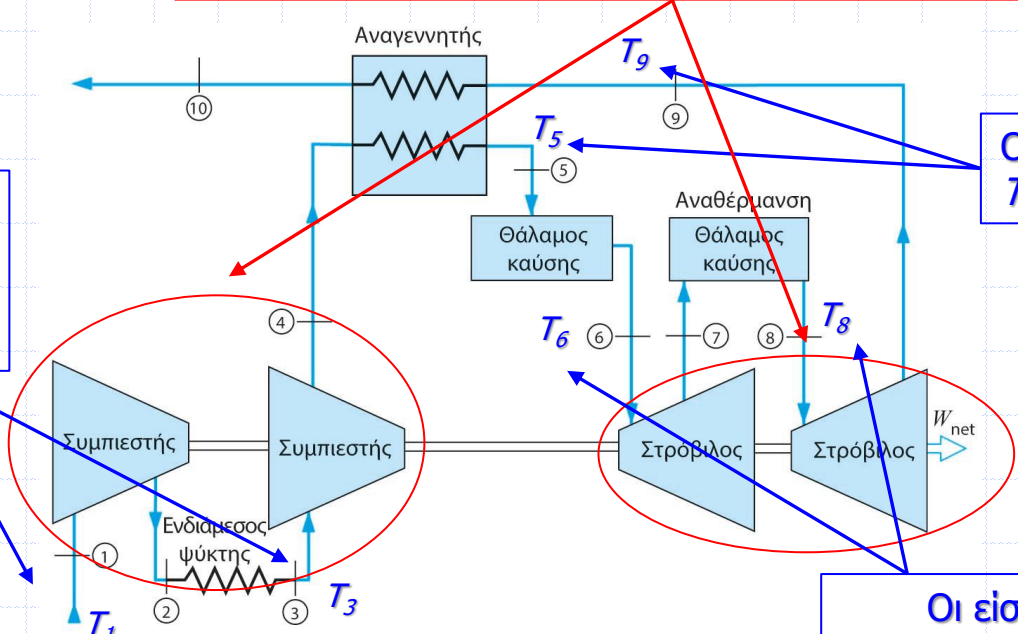
# Διαμορφώσεις κύκλου ισχύος αεριοστροβίλου...

Η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν οι λόγοι πιέσεων στους δύο συμπιεστές και στους δύο στρόβιλους είναι ίσοι

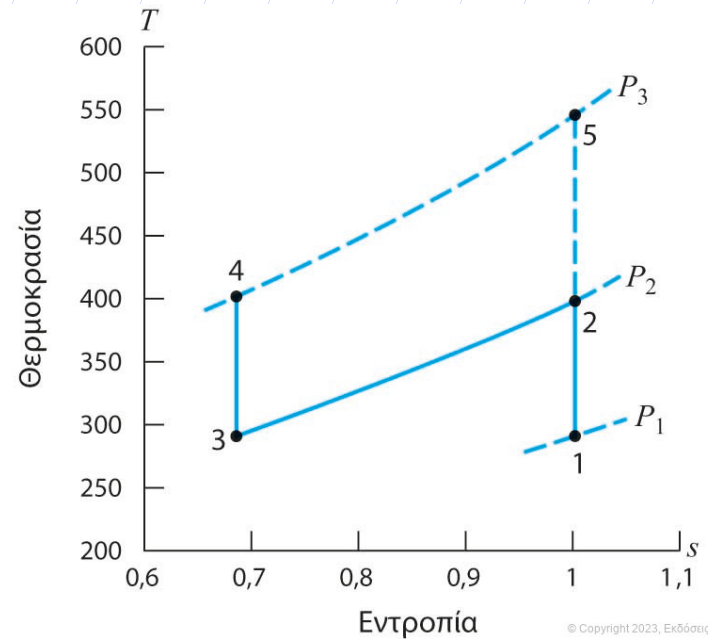
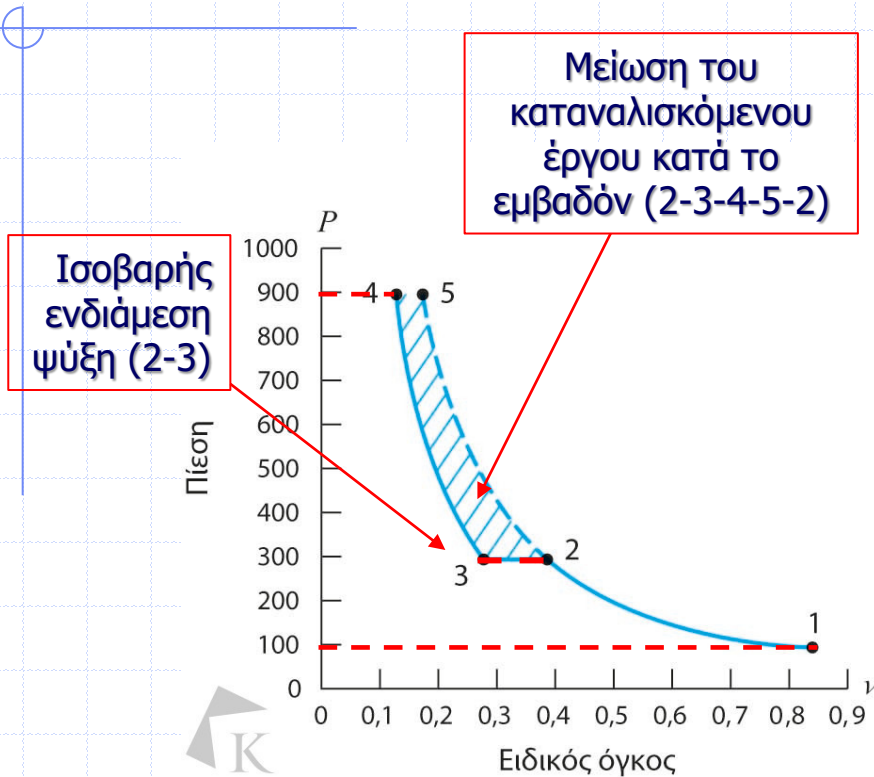
Οι εισοδοί στις βαθμίδες συμπίεσης είναι στην ίδια θερμοκρασία,  $T_1 = T_3$

Οι θερμοκρασίες  $T_5 = T_8$  είναι ίσες

Οι εισοδοί στους στρόβιλους είναι στην ίδια θερμοκρασία,  $T_6 = T_8$



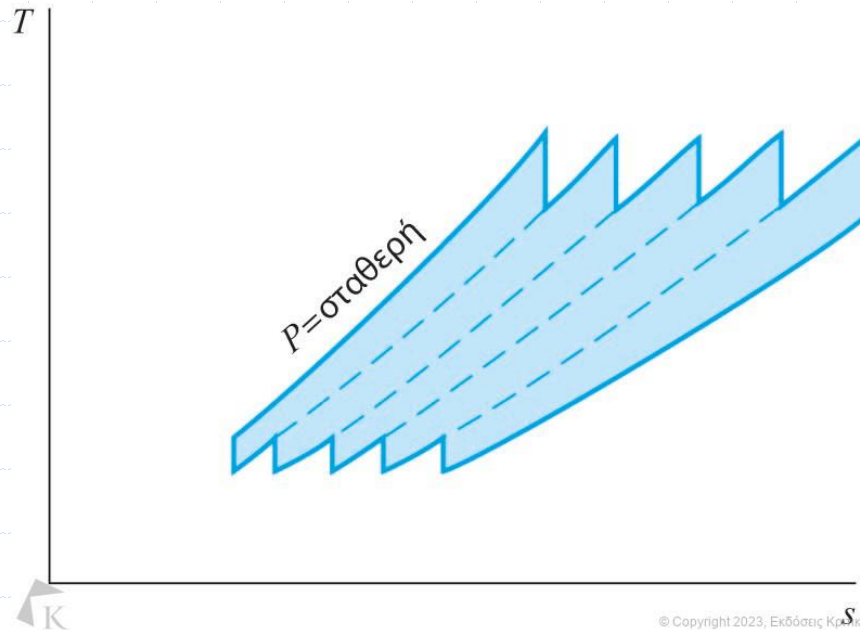
# Διαμορφώσεις κύκλου ισχύος αεριοστροβίλου...



- ❑ Η ενδιάμεση ψύξη μειώνει τον ειδικό όγκο, με αποτέλεσμα την μείωση του καταναλισκόμενου έργου στους συμπιεστές
- ❑ Η αναθέρμανση αυξάνει τον ειδικό όγκο, με αποτέλεσμα την αύξηση του παραγόμενου έργου στους στροβίλους

# Διαμορφώσεις κύκλου ισχύος αεριοστροβίλου...

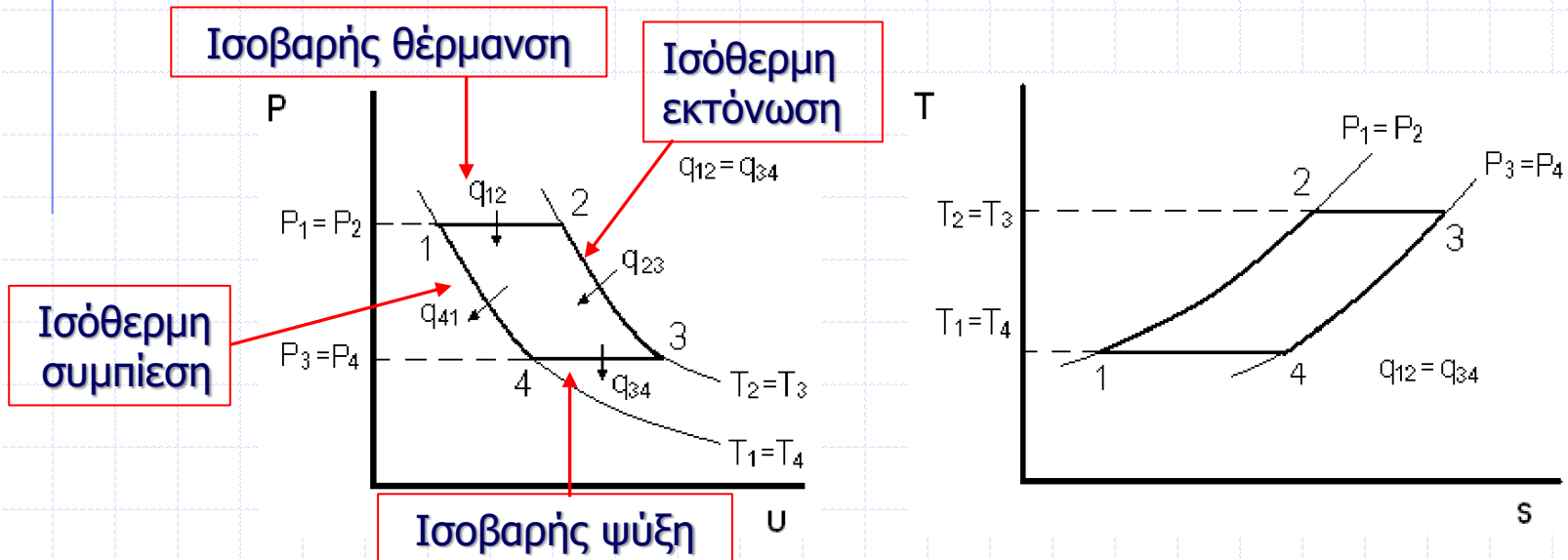
- ❑ Αν χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός βαθμίδων συμπίεσης και εκτόνωσης προσεγγίζεται ο κύκλος Ericsson
- ❑ Στην πράξη, για οικονομικούς λόγους, τίθεται όριο στον αριθμό των βαθμίδων είναι συνήθως δύο ή τρεις
- ❑ Οι απώλειες του στροβίλου και του συμπιεστή και οι πτώσεις πίεσης παρατηρούνται σε κάθε πραγματική μονάδα που χρησιμοποιεί αυτό τον κύκλο





# Διαμορφώσεις κύκλου ισχύος αεριοστροβίλου...

- Η μηχανή Ericsson προσομοιώνεται από διάταξη σταθεροποιημένης ροής, που ουσιαστικά είναι ένας αεριοστρόβιλος με πολλές διατάξεις ενδιάμεσης ψύξης και αναθέρμανσης. Ο ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος Ericsson δίνεται ακολούθως:

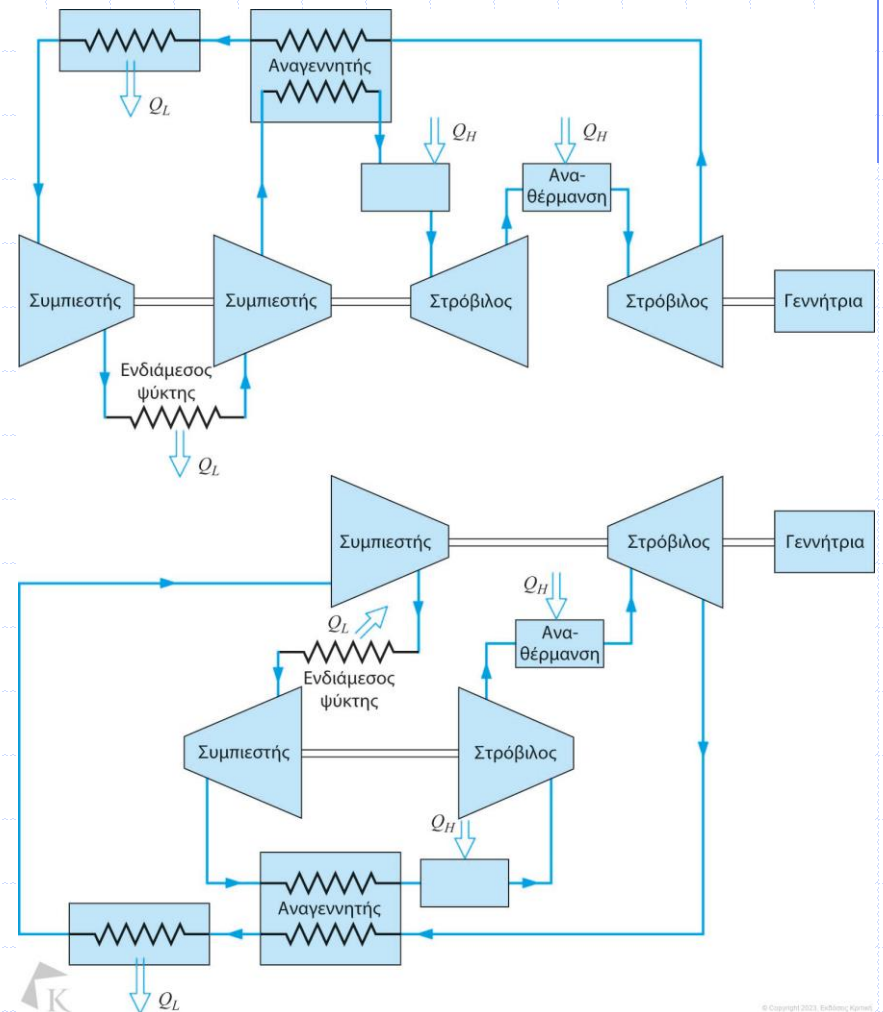


Βαθμός  
απόδοσης  
κύκλου Ericsson

$$\eta_{th} = \frac{W_{total}}{q_{23}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{R(T_2 - T_1) \ln \frac{P_2}{P_1}}{RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1}} \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

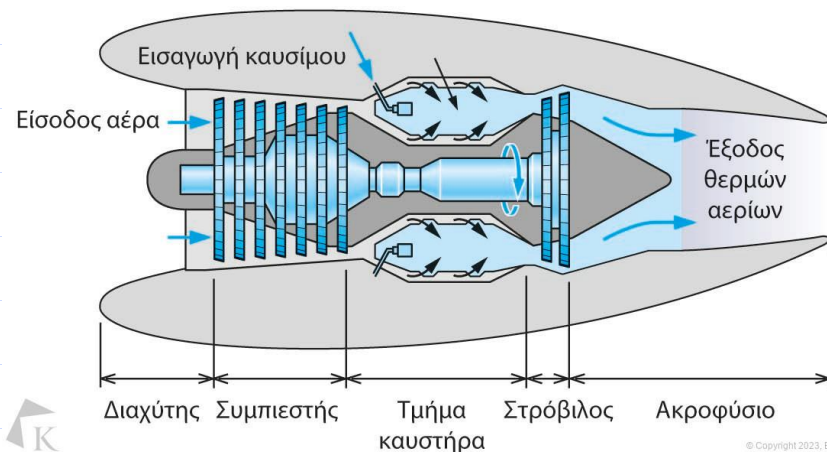
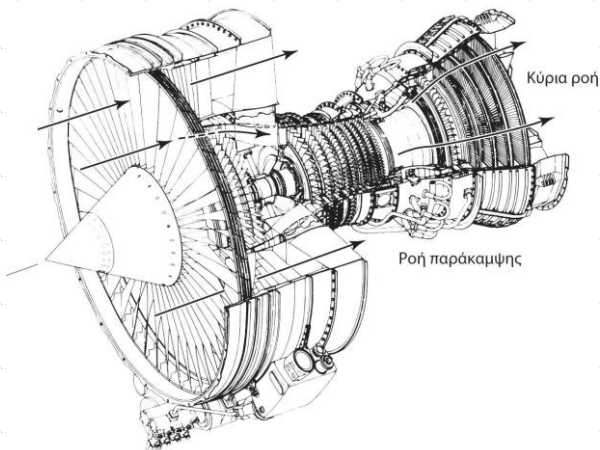
# Διαμορφώσεις κύκλου ισχύος αεριοστροβίλου...

- Οι στρόβιλοι και οι συμπιεστές που χρησιμοποιούνται στον κύκλο έχουν πληθώρα διαμορφώσεων



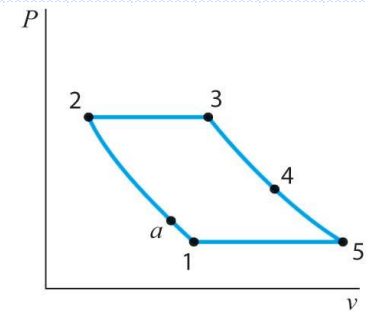
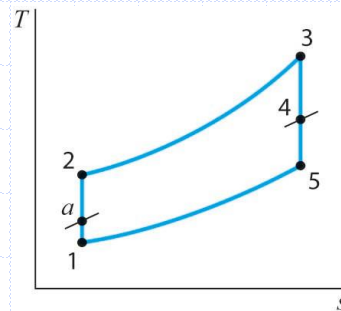
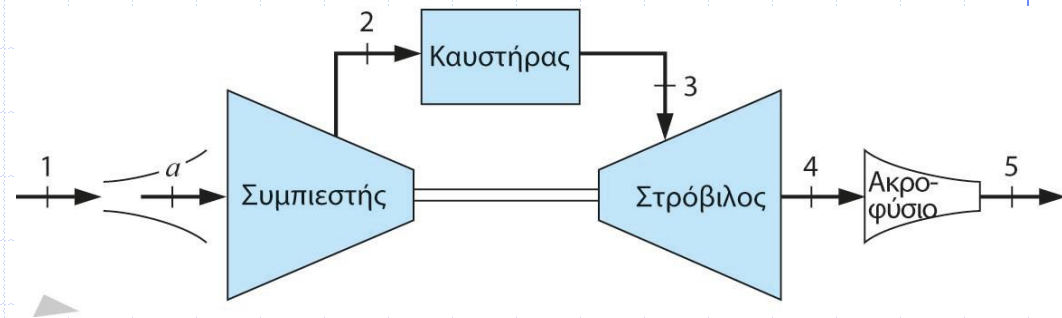
# Ο κύκλος πρότυπου αέρα για αεριοπροώθηση...

- ❑ Σύμφωνα με την παραδοχή του πρότυπου αέρα, στον κύκλο αερίωσης, το παραγόμενο έργο στον στρόβιλο οριακά επαρκεί για την λειτουργία του συμπιεστή
- ❑ Στον στρόβιλο, τα αέρια εκτονώνονται σε μια πίεση στην οποία το έργο του στροβίλου είναι ακριβώς ίσο με το έργο που απαιτείται στον συμπιεστή
- ❑ Η πίεση εξόδου του στροβίλου είναι μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος, ενώ το αέριο εκτονώνεται σε ένα ακροφύσιο στην πίεση του περιβάλλοντος
- ❑ Δεδομένου ότι τα αέρια απομακρύνονται με μεγάλη ταχύτητα, η μεταβολή της ορμής που υφίστανται δίνει ώθηση στο αεροσκάφος στο οποίο είναι εγκατεστημένος ο κινητήρας



# Ο κύκλος πρότυπου αέρα για αεριοπροώθηση...

- ❑ Ο κύκλος πρότυπου αέρα για αυτή την κατάσταση φαίνεται στο σχήμα
- ❑ Οι αρχές που διέπουν αυτό τον κύκλο απορρέουν από την ανάλυση του κύκλου Brayton μαζί με την ανάλυση για ένα αντιστρεπτό, αδιαβατικό ακροφύσιο

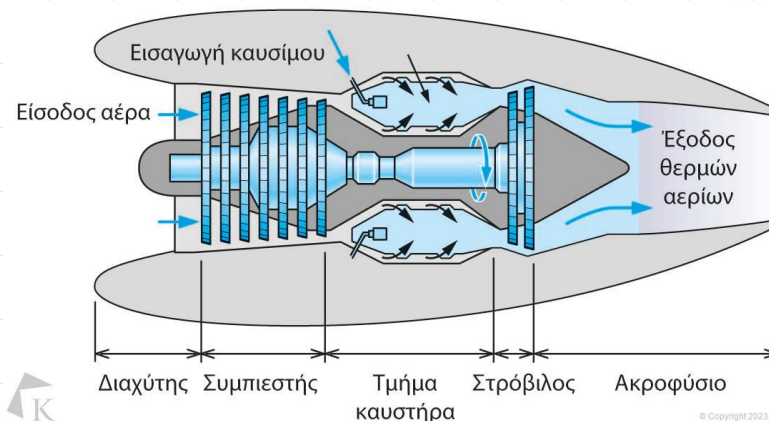
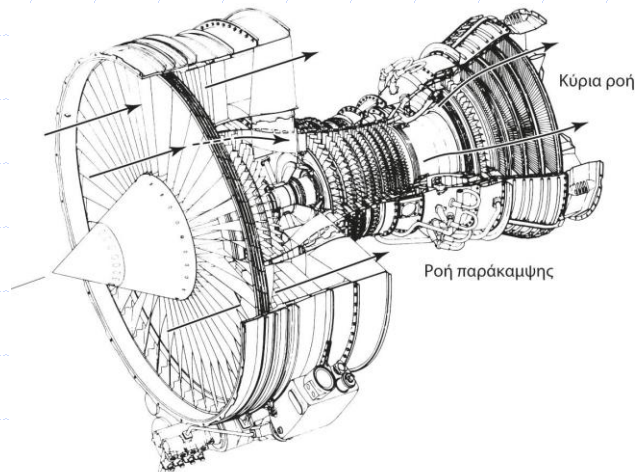


# Ο κύκλος πρότυπου αέρα για αεριοπροώθηση...

## Παράδειγμα 10.5

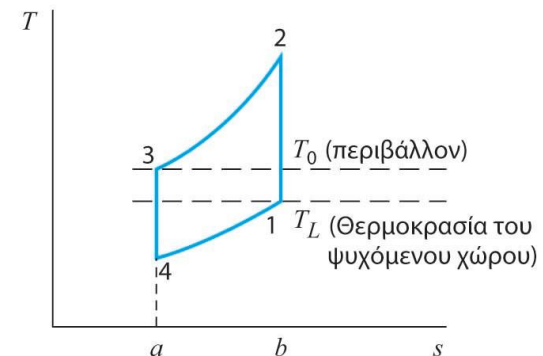
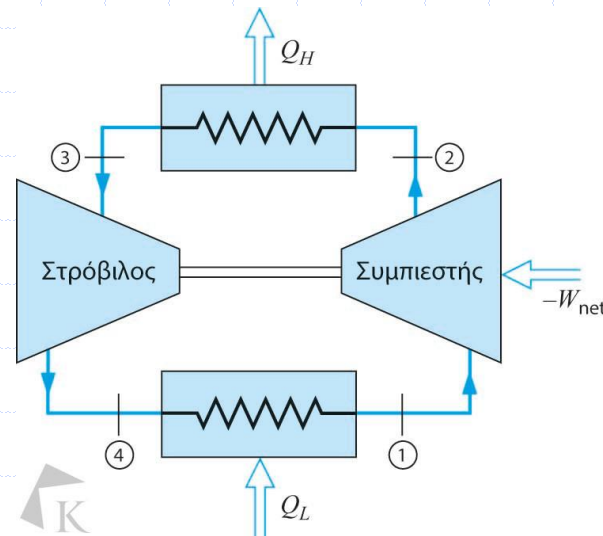
Θεωρήστε έναν ιδανικό κύκλο αερίωσης στον οποίο εισέρχεται αέρας στον συμπιεστή σε πίεση  $0,1 \text{ MPa}$  και θερμοκρασία  $15^\circ\text{C}$ . Η πίεση στην οποία εγκαταλείπει τον συμπιεστή είναι  $1,0 \text{ MPa}$  και η μέγιστη θερμοκρασία ισούται με  $1100^\circ\text{C}$ . Ο αέρας εκτονώνεται στον στρόβιλο σε μια πίεση όπου το έργο του στρόβιλου είναι ακριβώς ίσο με το έργο του συμπιεστή. Κατά την έξοδο από τον στρόβιλο, ο αέρας εκτονώνεται σε ένα ακροφύσιο στα  $0,1 \text{ MPa}$ . Η διεργασία είναι αντιστρεπτή και αδιαβατική. Προσδιορίστε την ταχύτητα με την οποία ο αέρας εγκαταλείπει το ακροφύσιο.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι αυτό του ιδανικού αερίου με σταθερή ειδική θερμότητα στους  $300 \text{ K}$ , ενώ κάθε διεργασία είναι σταθεροποιημένη χωρίς μεταβολή της δυναμικής ενέργειας. Η μόνη μεταβολή της κινητικής ενέργειας λαμβάνει χώρα στο ακροφύσιο. Το διάγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 10.11



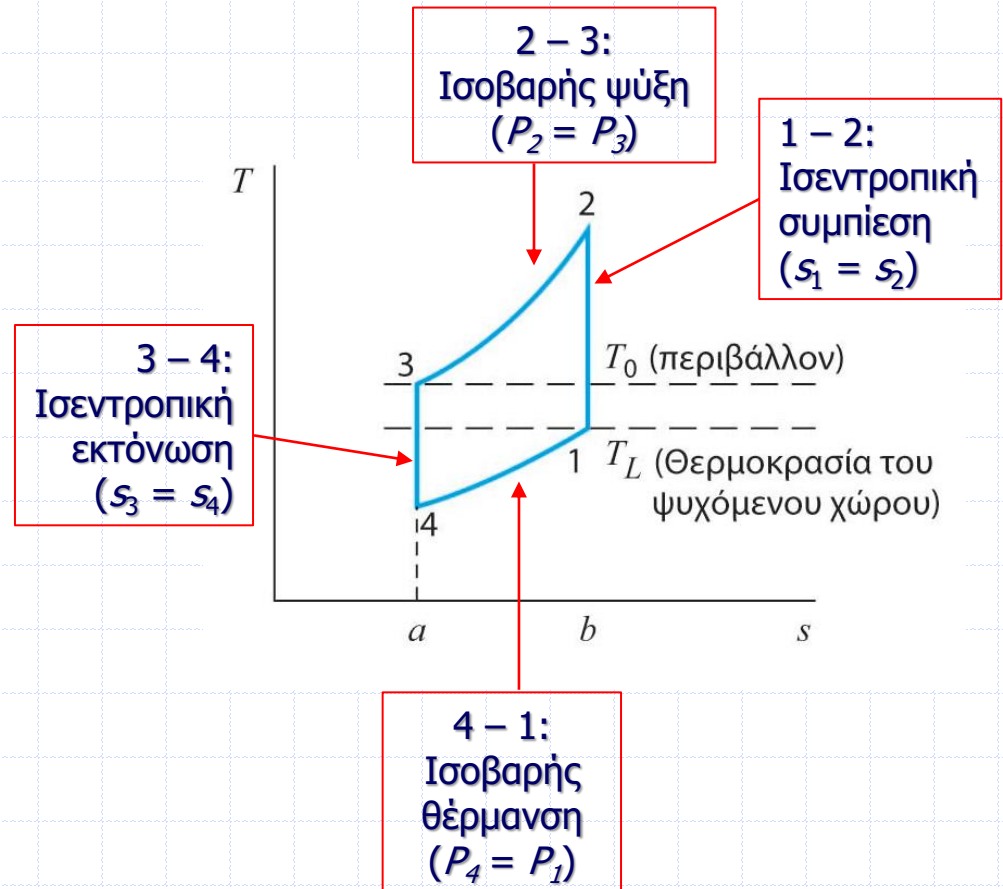
# Ο κύκλος ψύξης πρότυπου αέρα...

- ❑ Αρχικός ιδανικός κύκλος ψύξης τεσσάρων διεργασιών με ένα μη συμπυκνώσιμο (αέριο) εργαζόμενο ρευστό, όπου το έργο εξόδου κατά τη διεργασία της ισεντροπικής εκτόνωσης δεν είναι αμελητέο (όπως για το συμπυκνώσιμο εργαζόμενο ρευστό)
- ❑ Επομένως, διατηρούμε τον στρόβιλο στον ιδανικό κύκλο ψύξης πρότυπου αέρα τεσσάρων διεργασιών σταθεροποιημένης κατάστασης
- ❑ Ο κύκλος είναι ο αντίστροφος του κύκλου Brayton και χρησιμοποιείται για την υγροποίηση του αέρα (πχ. σύστημα Linde-Hampson) και άλλων αερίων, καθώς και σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις που απαιτούν ψύξη (αεροσκάφη)



# Ο κύκλος ψύξης πρότυπου αέρα...

- Το έργο του κύκλου παριστάνεται από το εμβαδό της περιοχής 1 – 2 – 3 – 4 – 1
- Η διεργασία της ψύξης παριστάνεται από το εμβαδό της περιοχής 4 – 1 – b – a – 4
- Ο συντελεστής απόδοσης (COP) είναι ίσος με τον λόγο των εμβαδών αυτών των δύο περιοχών



# Ο κύκλος ψύξης πρότυπου αέρα...

- Ο συντελεστής απόδοσης του κύκλου ψύξης πρότυπου αέρα περιλαμβάνει το καθαρό έργο μεταξύ των όρων έργου του συμπιεστή και του στροβίλου είναι:

$$\beta = \frac{q_L}{w_{\text{net}}} = \frac{q_L}{w_C - w_E} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1 - (h_3 - h_4)} \approx \frac{C_p(T_1 - T_4)}{C_p(T_2 - T_1) - C_p(T_3 - T_4)}$$

- Χρησιμοποιώντας μια σταθερή ειδική θερμότητα για την εύρεση των διαφορών στις ενθαλπίες και γράφοντας τις εκθετικές σχέσεις για τις δύο ισεντροπικές διεργασίες, προκύπτει:

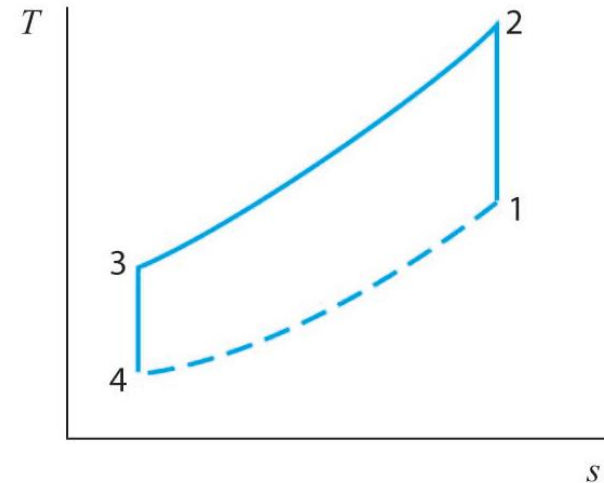
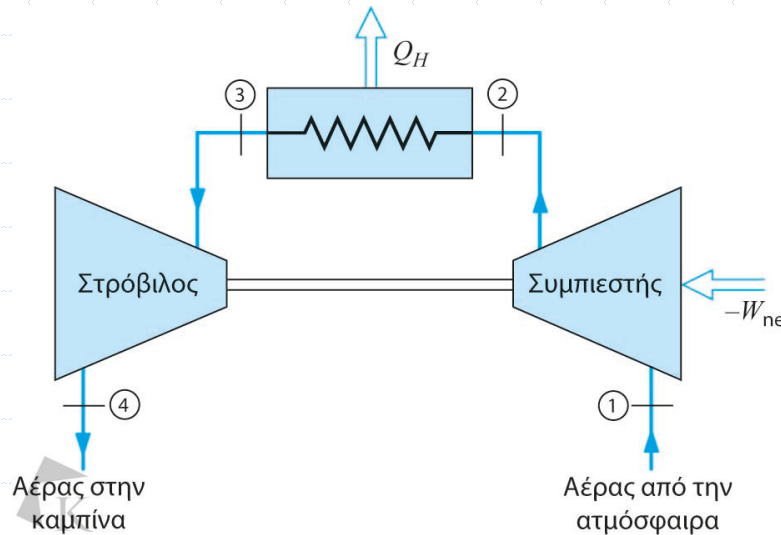
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{k/(k-1)} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{k/(k-1)} \quad \text{και} \quad \beta = \frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_1 - T_3 + T_4} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} \frac{1 - T_3/T_2}{1 - T_4/T_1} - 1} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} - 1} = \frac{1}{r_p^{(k-1)/k} - 1}$$

Χρησιμοποιήθηκαν:  $\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$   $r_p = \frac{P_2}{P_1}$  Λόγος πιέσεων



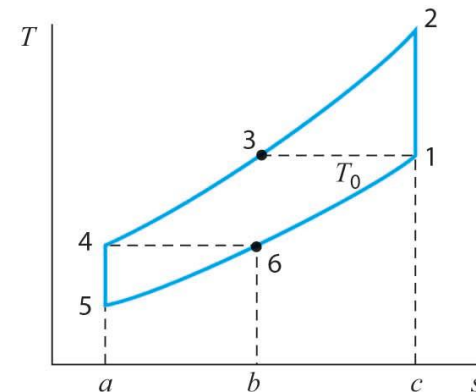
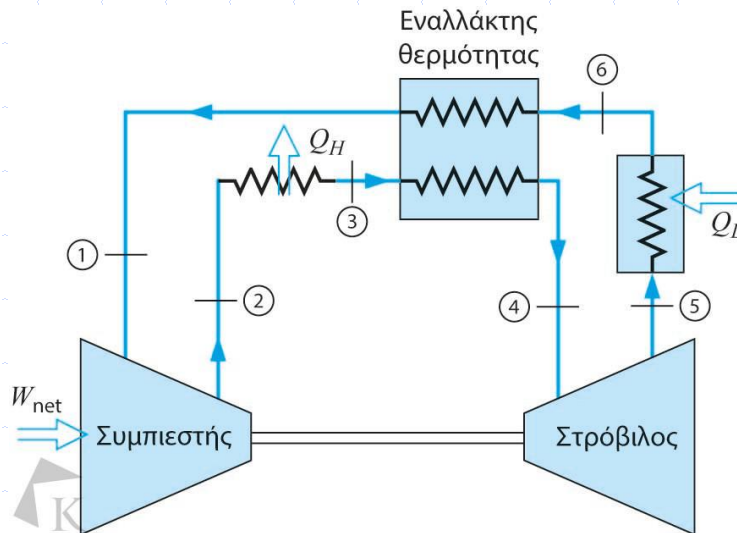
# Ο κύκλος ψύξης πρότυπου αέρα...

- , ο κύκλος έχει χρησιμοποιηθεί για την ψύξη αεροσκαφών σε ανοιχτό κύκλο, και μια απλοποιημένη μορφή του φαίνεται στο σχήμα
- Κατά την απομάκρυνσή του από τον στρόβιλο, ο ψυχρός αέρας διοχετεύεται απευθείας στον θάλαμο, εξασφαλίζοντας επομένως την αίσθηση δροσιάς όπου απαιτείται



# Ο κύκλος ψύξης πρότυπου αέρα...

- ❑ Όταν χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας αντιρροής, είναι δυνατό να επιτευχθούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες
- ❑ Ο κύκλος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως στις εγκαταστάσεις υγροποίησης αέρα χαμηλής πίεσης και σε άλλες συσκευές υγροποίησης όπως ο υγροποιητής ηλίου Collins
- ❑ Επειδή ο εκτονωτής λειτουργεί σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία, ο σχεδιαστής έρχεται αντιμέτωπος με ιδιαίζοντα προβλήματα λίπανσης και επιλογής υλικών



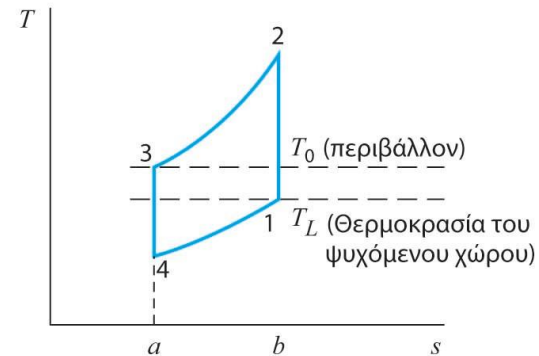
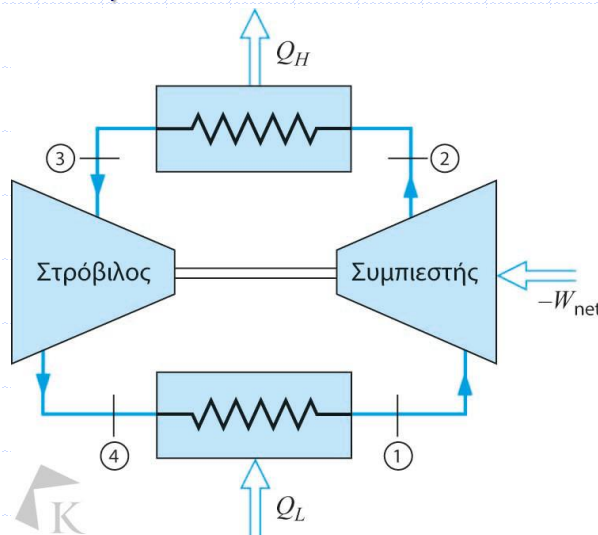
© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

# Ο κύκλος ψύξης πρότυπου αέρα...

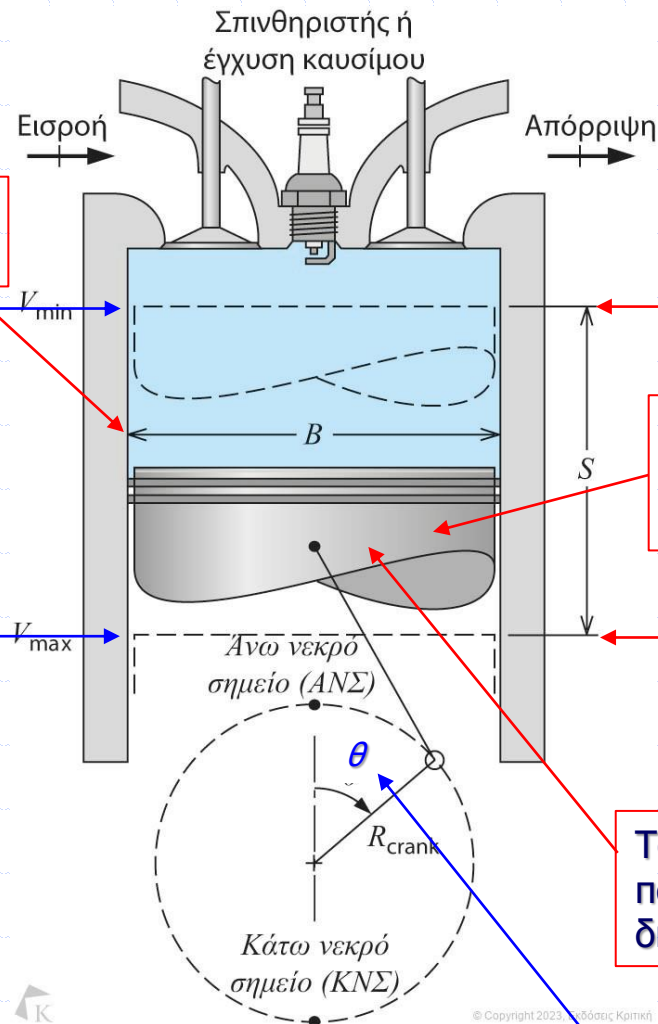
## Παράδειγμα 10.6

Θεωρήστε τον απλό κύκλο ψύξης πρότυπου αέρα του Σχήματος 10.12. Ο αέρας εισέρχεται στον συμπιεστή σε πίεση 0,1 MPa και θερμοκρασία  $-20^{\circ}\text{C}$ , ενώ απομακρύνεται στα 0,5 MPa. Ο αέρας εισέρχεται στον εκτονωτή στους  $15^{\circ}\text{C}$ . Προσδιορίστε 1. Τον συντελεστή απόδοσης για αυτό τον κύκλο. 2. Τον ρυθμό με τον οποίο πρέπει να εισέρχεται ο αέρας στον συμπιεστή ώστε να παρέχει 1 kW ψύξη.

Για κάθε όγκο ελέγχου σε αυτό το παράδειγμα, ο αέρας θεωρείται ως ιδανικό αέριο με σταθερή ειδική θερμότητα στους 300K, ενώ κάθε διεργασία είναι σταθεροποιημένη χωρίς μεταβολή της κινητικής ή της δυναμικής ενέργειας. Το διάγραμμα για αυτό το παράδειγμα είναι το Σχήμα 10.12, όπου έχει ληφθεί υπόψη ο συνολικός κύκλος, με αποτέλεσμα έναν συντελεστή απόδοσης στην Εξίσωση 10.5 ίσο με  $r_p = P_2 / P_1 = 5$ .



# Κύκλοι ισχύος εμβολοφόρου κινητήρα...



B: Διάμετρος ή διαμέτρηση

Ο όγκος από το ΚΝΣ μέχρι το ΑΝΣ ορίζει την **μετατόπιση** (displacement) ή τον **όγκο εμβολισμού**  $V_{displ}$  (κυβισμός)

ΑΝΣ: Άνω νεκρό σημείο (ελάχιστος όγκος,  $V_{min}$ )

Το έμβολο συνδέεται με στροφαλοφόρο άξονα

ΚΝΣ: Κάτω νεκρό σημείο (μέγιστος όγκος,  $V_{max}$ )

Το έμβολο κινείται παλινδρομικά σε μια διαδρομή  $S = 2 R_{crank}$

$\theta$  : γωνία του στροφάλου

Καθορίζονται από την γεωμετρία του κινητήρα

$$V_{displ} = N_{cyl}(V_{max} - V_{min}) = N_{cyl}A_{cyl}S$$

Λόγος συμπίεσης

$$r_v = CR = V_{max}/V_{min}$$

# Κύκλοι ισχύος εμβολοφόρου κινητήρα...

- Ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά στις εμβολοφόρες (παλινδρομικές) μηχανές είναι η "**μέση ενεργός πίεση**" (Mean Effective Pressure – MEP)
- Είναι η σταθερή πίεση που εάν ενεργούσε πάνω στο έμβολο σε όλη την διάρκεια της διαδρομής θα παράγαγε το ίδιο συνολικά έργο, με αυτό που παράγεται κατά την διάρκεια του πραγματικού κύκλου και ορίζεται ως ακολούθως:

$$P_{meff} = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{W_{net}}{v_{max} - v_{min}}$$

# Κύκλοι ισχύος εμβολοφόρου κινητήρα...

- Το καθαρό ειδικό έργο σε έναν πλήρη κύκλο χρησιμοποιείται για τον ορισμό της μέσης ενεργού (mean effective pressure) πίεσης

$$w_{\text{net}} = \oint P dv \equiv P_{\text{meff}}(v_{\text{max}} - v_{\text{min}})$$

ή το καθαρό έργο ανά κύλινδρο ανά κύκλο:

$$W_{\text{net}} = mw_{\text{net}} = P_{\text{meff}}(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})$$

- Οπότε, ρυθμός έργου (ισχύς) για ολόκληρο τον κινητήρα είναι:

$$\dot{W} = N_{\text{cyl}} m w_{\text{net}} \frac{\text{RPM}}{60} = P_{\text{meff}} V_{\text{displ}} \frac{\text{RPM}}{60}$$

Ογκος εμβολισμού

Αριθμός στροφών ανά λεπτό

Μέση Ενεργός Πίεση

Διόρθωση με συντελεστή 1/2 για τετράχρονο κινητήρα (απαιτούνται δύο περιστροφές, ώστε σε έναν πλήρη κύκλο να ολοκληρωθούν επίσης οι χρόνοι εισροής και απόρριψης)

# Κύκλοι ισχύος εμβολοφόρου κινητήρα...

- Οι περισσότεροι κινητήρες είναι τετράχρονοι, και σ' αυτούς λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω διεργασίες:

Διεργασία, κίνηση εμβόλου	Θέση στροφάλου, γωνία στροφάλου	Μεταβολή ιδιότητας
Εισροή, 1 X	ΑΝΣ σε ΚΝΣ, 0-180 μοίρες	$P \approx C, V \nearrow$ , ροή προς τα μέσα
Συμπίεση, 1 X	ΚΝΣ σε ΑΝΣ, 180-360 μοίρες	$V \searrow, P \nearrow, T \nearrow, Q = 0$
Ανάφλεξη και καύση	ταχύς σε ~ ΑΝΣ, 360 μοίρες	$V = C, Q$ προς τα μέσα, $P \nearrow, T \nearrow$
Εκτόνωση, 1 X	ΑΝΣ σε ΚΝΣ, 360-540 μοίρες	$V \searrow, P \searrow, T \nearrow, Q = 0$
Απόρριψη, 1 X	ΚΝΣ σε ΑΝΣ, 540-720 μοίρες	$P \approx C, V \searrow$ , ροή προς τα έξω

- Η διεργασία εισροής και η διεργασία απόρριψης διαρκεί η καθεμιά έναν πλήρη χρόνο του εμβόλου, επομένως απαιτούνται δύο περιστροφές με τέσσερις χρόνους για τον πλήρη κύκλο

# Κύκλοι ισχύος εμβολοφόρου κινητήρα...

- ❑ Σε έναν δίχρονο κινητήρα, η απόρριψη ξεκινά πριν την ολοκλήρωση της εκτόνωσης και η εισροή επικαλύπτεται χρονικά με ένα μέρος της απόρριψης και συνεχίζει στον χρόνο συμπίεσης
- ❑ Αυτό μειώνει τις διεργασίες ενεργού συμπίεσης και εκτόνωσης, υπάρχει όμως παραγωγή ισχύος σε κάθε περιστροφή και η συνολική ισχύς είναι σχεδόν διπλάσια από την ισχύ ενός τετράχρονου κινητήρα ίδιου μεγέθους
- ❑ Οι δίχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται ως μεγάλοι πετρελαιοκινητήρες σε πλοία και ως μικροί βενζινοκινητήρες (πχ. χλοοκοπτικά μηχανήματα, φορητά εργαλεία)
- ❑ Λόγω της πιθανής εγκάρσιας ροής από τη ροή εισαγωγής (με καύσιμο) προς τη θύρα εξαγωγής, ο δίχρονος βενζινοκινητήρας έχει περιορισμένη χρήση και δεν μπορεί να συμμορφωθεί με τις σύγχρονες απαιτήσεις για χαμηλές εκπομπές ρύπων (πχ. εξωλέμβιοι κινητήρες σκαφών)



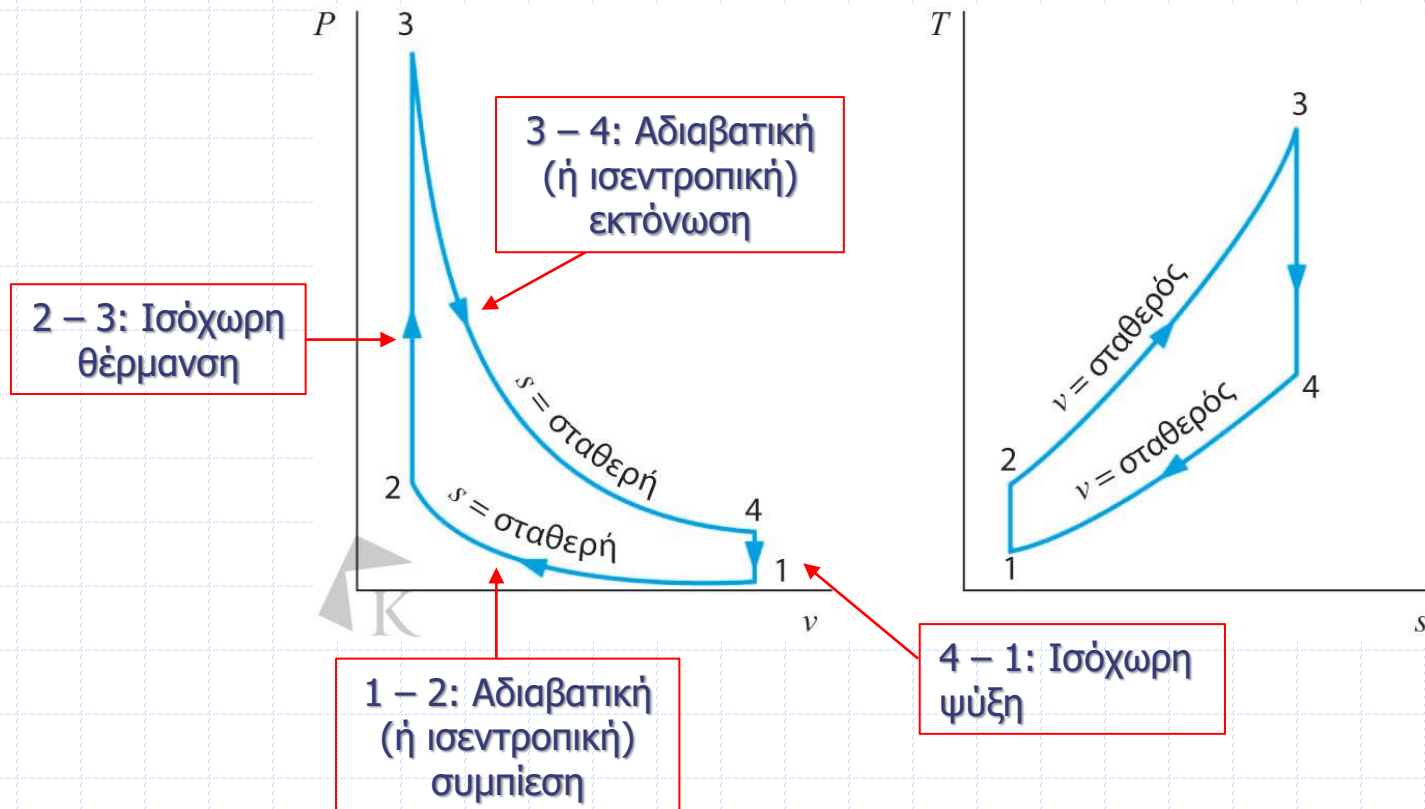
# Κύκλοι ισχύος εμβολοφόρου κινητήρα...

- ❑ Οι κινητήρες γενικά περιγράφονται από μεγέθη όπως ο συνολικός όγκος εμβολισμού (κυβισμός) και η συνολική μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς
- ❑ Η μέση ενεργός πίεση χρησιμοποιείται για την υπόδειξη του στιγμιαίου φορτίου στον κινητήρα
- ❑ Η πυκνότητα ισχύος ( $\frac{\dot{W}}{V_{displ}}$  σε hp/L) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ένας συνολικός χαρακτηρισμός του τρόπου ρύθμισης του κινητήρα
- ❑ Το μέγεθος των σύγχρονων κινητήρων έχει μειωθεί ( $V_{displ}$  μικρότερος), ενώ ενισχύονται με έναν στροβιλοσυμπιεστή ή έναν υπερσυμπιεστή ( $P_{meff}$  μεγαλύτερη)

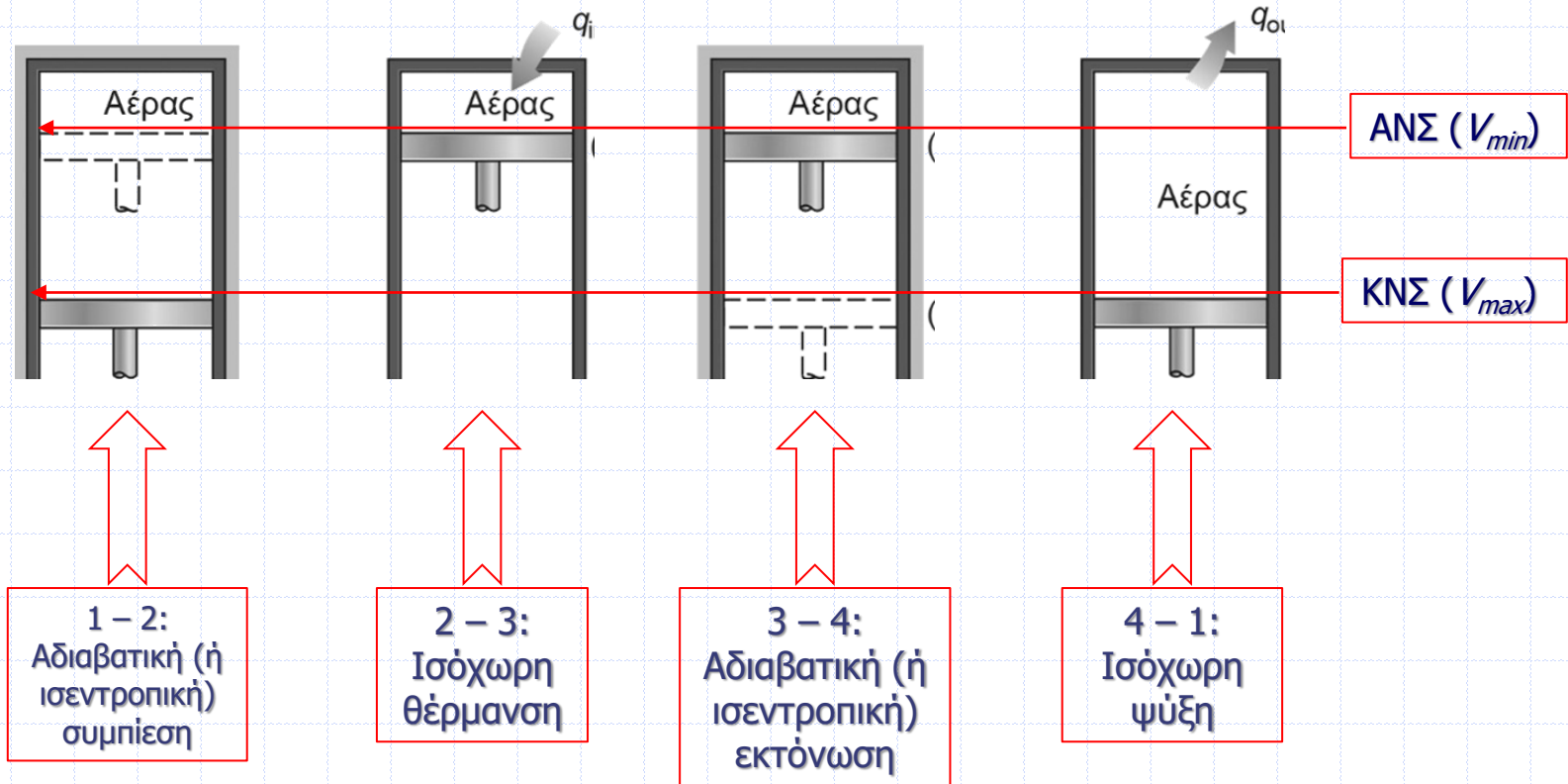
$V_{displ}$ [L]	< 1	1	2-3	3-4	5-6
τυπικός κινητήρας αυτοκινήτου	πολύ μικρός	μικρός	ενδιάμεσος	πλήρης/φορτηγό	μεγάλος
$\dot{W}/V_{displ}$ [hp/L]	< 50	50	75	100	150
Όριο τάσης στον κινητήρα	πολύ χαμηλό	χαμηλό	ενδιάμεσο	υψηλό	πολύ υψηλό

# Ο κύκλος Otto...

- Ο κύκλος Otto πρότυπου αέρα είναι ένας ιδανικός κύκλος που προσεγγίζει έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης όπου η ανάφλεξη γίνεται με σπινθήρα



# Ο κύκλος Otto...



# Ο κύκλος Otto...

**ΠΙΝΑΚΑΣ 10.2** Οι διεργασίες του κύκλου Otto

Διεργασία	Εξίσωση ενέργειας	Εξίσωση εντροπίας	Εξίσωση διεργασίας
Συμπίεση	$u_2 - u_1 = -{}_1w_2$	$s_2 - s_1 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_1 = s_2$
Καύση	$u_3 - u_2 = q_H$	$s_3 - s_2 = \int dq_H/T + 0$	$v_3 = v_2 = C$
Εκτόνωση	$u_4 - u_3 = -{}_3w_4$	$s_4 - s_3 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_3 = s_4$
Απόρριψη θερμότητας	$u_1 - u_4 = -q_L$	$s_1 - s_4 = -\int dq_L/T + 0$	$v_4 = v_1 = C$

# Ο κύκλος Otto...

- Η θερμική απόδοση του κύκλου Otto, με σταθερή ειδική θερμότητα, υπολογίζεται ως ακολούθως:

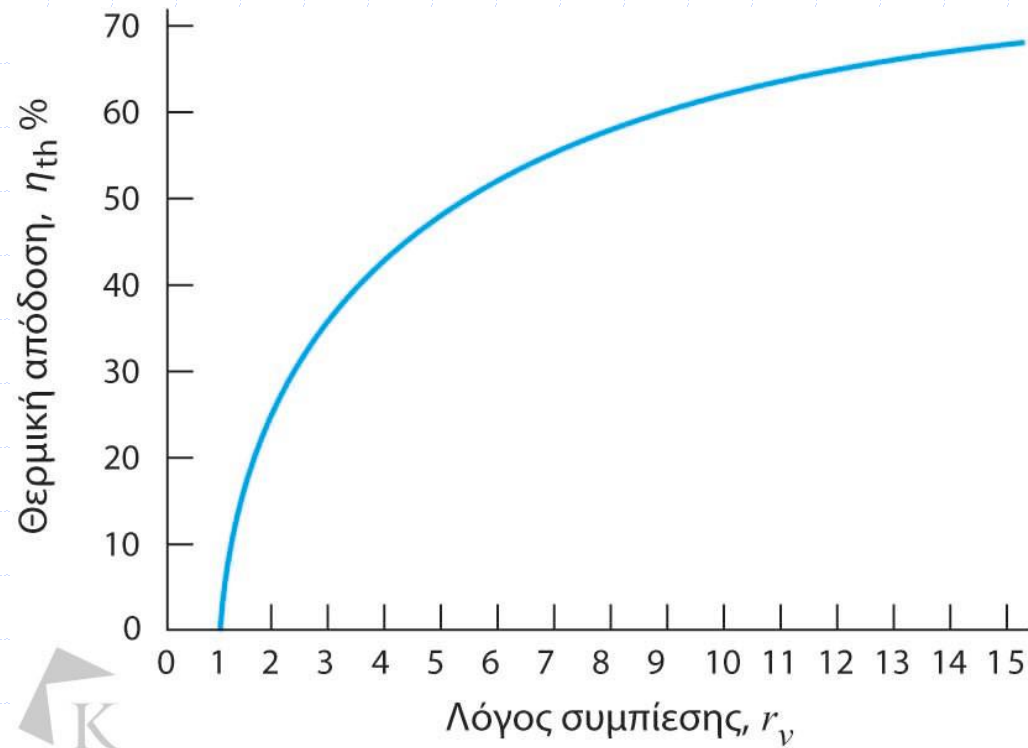
$$\eta_{\text{th}} = \frac{q_H - q_L}{q_H} = 1 - \frac{q_L}{q_H} \approx 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

και:  $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} = \frac{T_3}{T_4}$       οπότε:  $\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$

και:  $\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r_v)^{1-k} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$       όπου:  $r_v = \text{λόγος συμπίεσης} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνει με την αύξηση του λόγου συμπίεσης  $r_v$

# Ο κύκλος Otto...



Ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνει με την αύξηση του λόγου συμπίεσης  $r_v$

# Ο κύκλος Otto...

- ❑ Στον πραγματικό κινητήρα υπάρχει μια ισχυρή τάση για αυτανάφλεξη του καυσίμου καθώς ο λόγος συμπίεσης αυξάνεται
- ❑ Στην αυτανάφλεξη, το καύσιμο καίγεται ταχύτατα, ενώ ισχυρά κύματα πίεσης που δημιουργούνται στον κύλινδρο προκαλούν κρότους στον κινητήρα
- ❑ Επομένως, ο μέγιστος λόγος συμπίεσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθορίζεται από την ανάγκη να αποφεύγεται η αυτανάφλεξη
- ❑ Με την πάροδο των ετών, η πρόοδος στους λόγους συμπίεσης στους πραγματικούς κινητήρες κατέστη αρχικά δυνατή με την ανάπτυξη καυσίμων με καλύτερα χαρακτηριστικά
- ❑ Ο έλεγχος του κινητήρα με υπολογιστή αποτρέπει πλέον την αυτανάφλεξη και τις αποτυχημένες αναφλέξεις (υπολειτουργία), μειώνοντας με αυτό τον τρόπο και τις εκπομπές επιβλαβών αερίων και σωματιδίων

# Ο κύκλος Otto...

- Οι λόγοι για τους οποίους ο πραγματικός κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα ανοιχτού κύκλου αποκλίνει από τον κύκλο πρότυπου αέρα είναι οι εξής:
  1. Οι ειδικές θερμότητες των πραγματικών αερίων αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας
  2. Η διεργασία της καύσης αντικαθιστά τη διεργασία της μεταφοράς θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ η καύση δεν είναι στιγμιαία ή πλήρης
  3. Κάθε μηχανικός κύκλος του κινητήρα περιλαμβάνει μια διεργασία εισροής και απόρριψης και, λόγω της μείωσης της πίεσης μέσω των βαλβίδων, απαιτείται μια ορισμένη ποσότητα έργου για την πλήρωση του κυλίνδρου με αέρα και την απόρριψη των καυσαερίων
  4. Σημειώνεται σημαντική μεταφορά θερμότητας μεταξύ των αερίων εντός του κυλίνδρου και των τοιχωμάτων του κυλίνδρου
  5. Υπάρχουν μη αντιστρεπτότητες που σχετίζονται με μεταβολές της πίεσης και της θερμοκρασίας



# Ο κύκλος Otto...

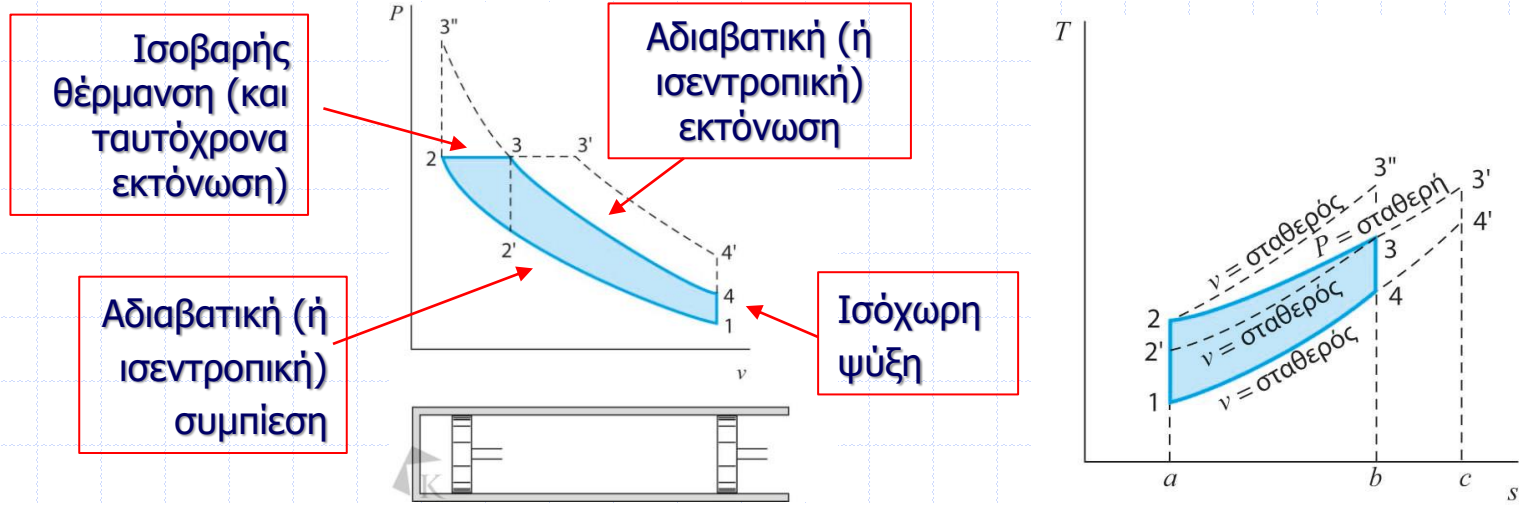
## Παράδειγμα 10.7

Ο λόγος συμπίεσης σε έναν κύκλο Otto πρότυπου αέρα είναι ίσος με 10. Κατά την έναρξη της συμπίεσης, η πίεση ισούται με 0,05 MPa και η θερμοκρασία με 15°C. Η μεταφορά θερμότητας στον αέρα ανά κύκλο είναι ίση με 1800 kJ/kg αέρα. Προσδιορίστε 1. Την πίεση και τη θερμοκρασία στο τέλος κάθε διεργασίας του κύκλου. 2. Τη θερμική απόδοση. 3. Τη μέση ενεργό πίεση.

Ο κύκλος προσδιορίζεται από τέσσερις παραμέτρους:  $P_1 = 50 \text{ kPa}$ ,  $T_1 = 15^\circ\text{C}$ ,  $r_v = 10$  και  $q_H = 1800 \text{ kJ/kg}$

# Ο κύκλος Diesel...

- ❑ Στον ιδανικό κύκλο Diesel πρότυπου αέρα στηρίζουν την λειτουργία τους οι πετρελαιοκινητήρες, και πραγματοποιείται σε μια αδιαβατική διάταξη κυλίνδρου-εμβόλου, που διαθέτει τουλάχιστον μια βαλβίδα εισαγωγής και μια εξαγωγής, αλλά όχι και αναφλεκτήρα(ανάφλεξη με συμπίεση)
- ❑ Η ανάφλεξη είναι αυτοτροφοδοτούμενη, δηλαδή ο αέρας συμπιέζεται σε σχετικά υψηλή πίεση, γίνεται έγχυση πετρελαίου που αναφλέγεται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του συμπιεσμένου αέρα και του σχετικά χαμηλού ορίου αυτανάφλεξης του καυσίμου
- ❑ Ο θερμοδυναμικός κύκλος Diesel πρότυπου αέρα φαίνεται στο σχήμα:



# Ο κύκλος Diesel...

**ΠΙΝΑΚΑΣ 10.3** Οι διεργασίες του κύκλου Diesel

Διεργασία	Εξίσωση ενέργειας	Εξίσωση εντροπίας	Εξίσωση διεργασίας
Συμπίεση	$u_2 - u_1 = -{}_1w_2$	$s_2 - s_1 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_1 = s_2$
Καύση	$u_3 - u_2 = q_H - {}_2w_3$	$s_3 - s_2 = \int dq_H/T + 0$	$P_3 = P_2 = C$
Εκτόνωση	$u_4 - u_3 = -{}_3w_4$	$s_4 - s_3 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_3 = s_4$
Απόρριψη θερμότητας	$u_1 - u_4 = -q_L$	$s_1 - s_4 = -\int dq_L/T + 0$	$v_4 = v_1 = C$

# Ο κύκλος Diesel...

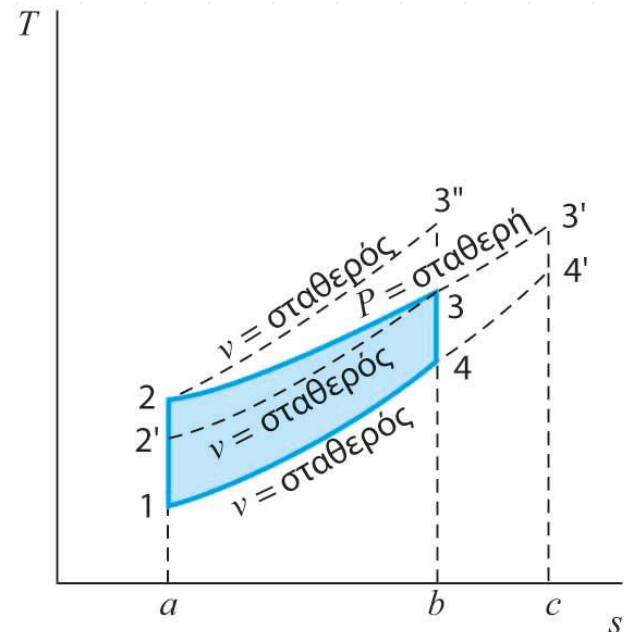
- Η παραγωγή έργου στον κύκλο Diesel κατά τη διάρκεια της καύσης (διεργασία 2 – 3), είναι η μόνη διαφοροποίηση από τον κύκλο Otto, και η μεταφορά θερμότητας δίνεται από:

$$q_H = u_3 - u_2 + {}_2w_3 = u_3 - u_2 + P_2(v_3 - v_2) = h_3 - h_2$$

- Η μεταβολή (αύξηση) του όγκου στη διεργασία 2 – 3 δίνει τον λόγο αποκοπής (cut-off ratio):

$$r_{\text{cutoff}} = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

- Περαιτέρω προσθήκη θερμότητας στον κύκλο αυξάνει τον λόγο αποκοπής καθώς και το καθαρό έργο, καθώς η κατάσταση 3 κινείται προς την κατάσταση 3'

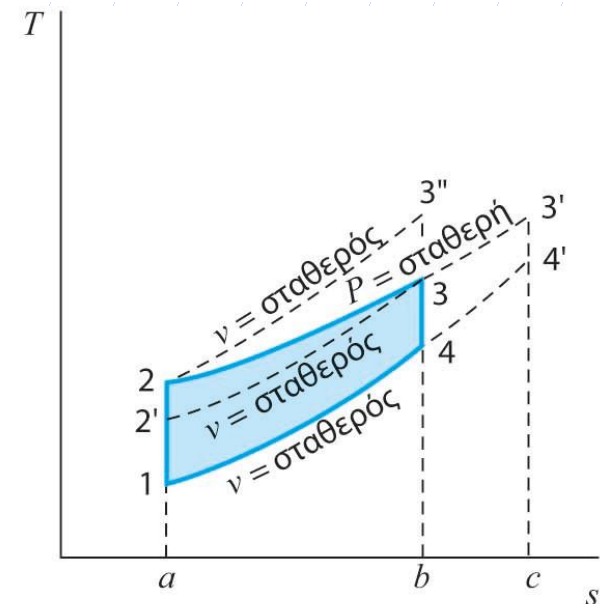


# Ο κύκλος Diesel...

- Η απόδοση του κύκλου diesel υπολογίζεται ως εξής:

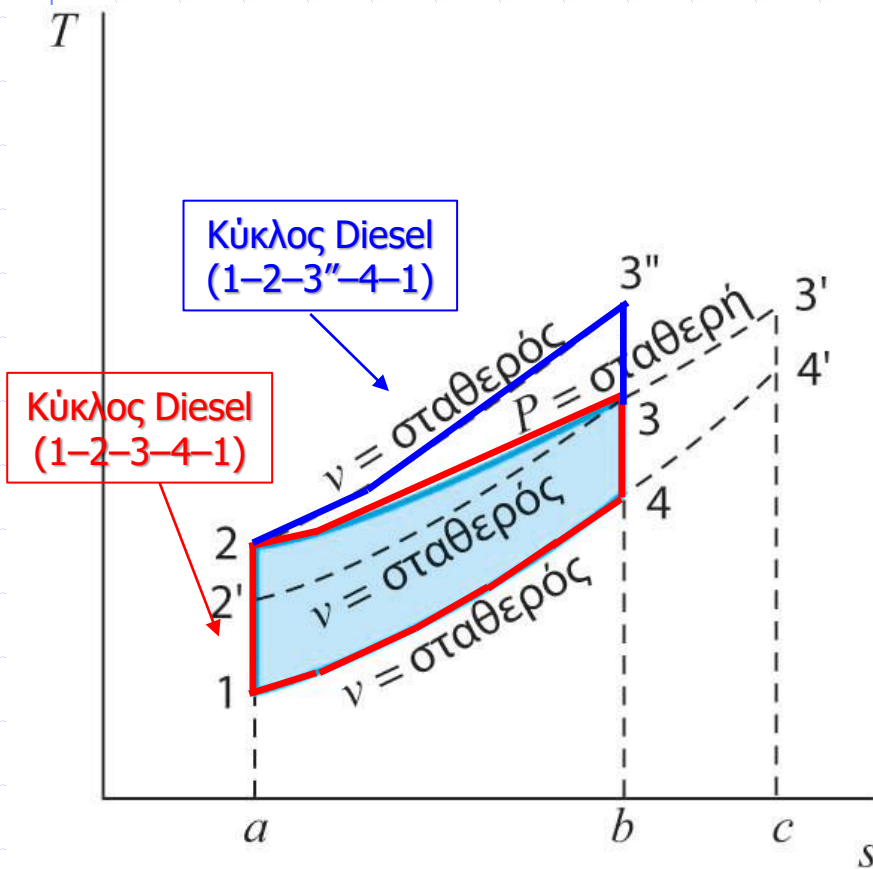
$$\eta = 1 - \frac{q_L}{q_H} \approx 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{kT_2} \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} = 1 - r_v^{1-k} \frac{r_{\text{cutoff}}^k - 1}{k(r_{\text{cutoff}} - 1)}$$

- Ο ισεντροπικός λόγος συμπίεσης είναι μεγαλύτερος από τον ισεντροπικό λόγο εκτόνωσης στον κύκλο Diesel εξαιτίας του λόγου αποκοπής
- Επιπλέον, για μια δεδομένη κατάσταση πριν τη συμπίεση και έναν γνωστό λόγο συμπίεσης (δηλαδή, γνωστές καταστάσεις 1 και 2), η απόδοση του κύκλου μειώνεται καθώς η μέγιστη θερμοκρασία αυξάνεται
- Αυτό είναι εμφανές από το διάγραμμα T-s, επειδή οι καμπύλες σταθερής πίεσης και σταθερού όγκου συγκλίνουν, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας από το 3 στο 3' απαιτεί μεγάλη προσθήκη θερμότητας (εμβαδό περιοχής 3-3'-c-b-3) και έχει ως αποτέλεσμα μια σχετικά μικρή αύξηση του έργου (εμβαδό περιοχής 3-3'-4'-4-3)



# Ο κύκλος Diesel...

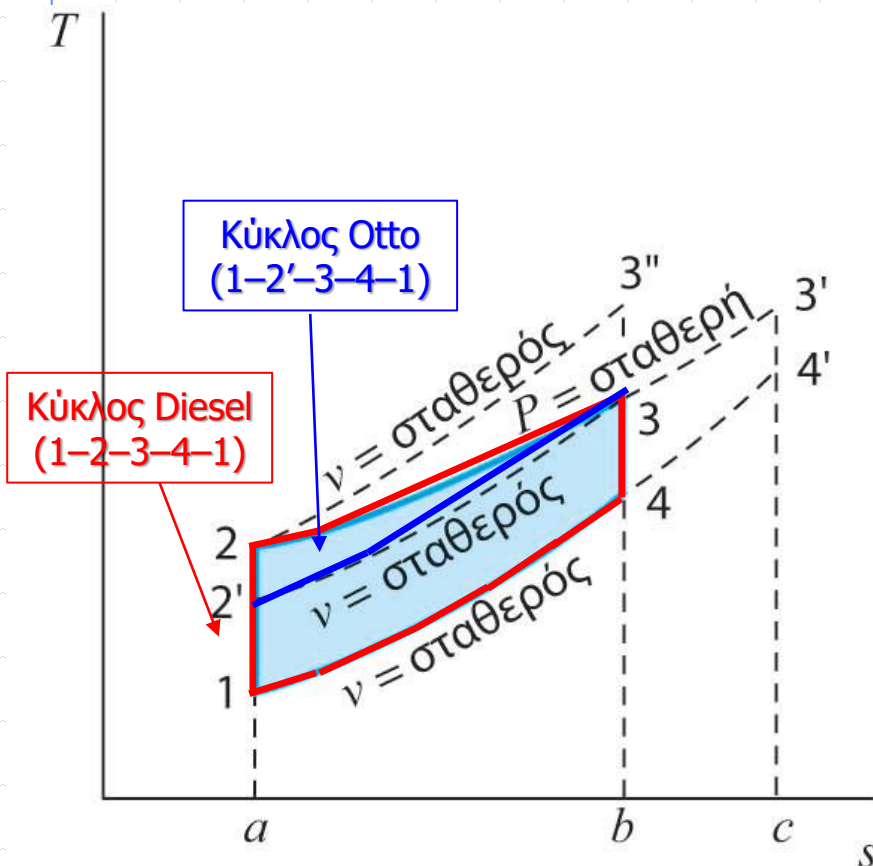
□ Οι κύκλοι Diesel και Otto συγκρίνονται ως εξής:



- Οι δύο κύκλοι εκκινούν από την ίδια κατάσταση (1), και έχουν την ίδια μετατόπιση και λόγο συμπίεσης εμβόλου (διεργασία 1-2)
- Από το διάγραμμα T-s διαπιστώνουμε ότι ο κύκλος Otto έχει υψηλότερη απόδοση
- Στην πράξη, ωστόσο, ο κινητήρας Diesel μπορεί να λειτουργεί με υψηλότερο λόγο συμπίεσης από τον κινητήρα ανάφλεξης με σπινθήρα
- Αυτό συμβαίνει γιατί, στον κινητήρα ανάφλεξης με σπινθήρα, ένα μείγμα αέρα-καυσίμου συμπιέζεται, ενώ η αυτανάφλεξη αποτελεί σοβαρό πρόβλημα αν χρησιμοποιηθεί πολύ υψηλός λόγος συμπίεσης
- Το πρόβλημα δεν υπάρχει στον κινητήρα Diesel, γιατί κατά τον χρόνο συμπίεσης συμπιέζεται μόνο ο αέρας

# Ο κύκλος Diesel...

- Μια ακόμη σύγκριση είναι η ακόλουθη:



- Η μέγιστη πίεση και η μέγιστη θερμοκρασία είναι ίσες και στους δύο κύκλους, γεγονός που σημαίνει ότι ο κύκλος Otto έχει μικρότερο λόγο συμπίεσης από τον κύκλο Diesel
- Από το διάγραμμα T-s διαπιστώνουμε ότι ο κύκλος Diesel έχει υψηλότερη απόδοση
- Ο πραγματικός ανοιχτός κύκλος ανάφλεξης με συμπίεση διαφέρει από τον κύκλο Diesel πρότυπου αέρα με τον ίδιο περίπου τρόπο που διαφέρει ο ανοιχτός κύκλος ανάφλεξης με σπινθήρα από τον κύκλο Otto πρότυπου αέρα

# Ο κύκλος Diesel...

## Παράδειγμα 10.8

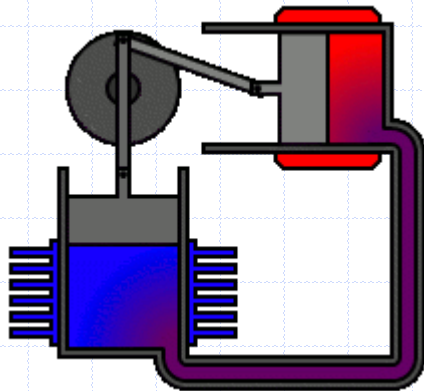
Ένας κύκλος Diesel πρότυπου αέρα έχει λόγο συμπίεσης ίσο με 20, ενώ η θερμότητα που μεταφέρεται στο εργαζόμενο ρευστό ανά κύκλο είναι 1800 kJ/kg. Στην αρχή της διεργασίας συμπίεσης, η πίεση είναι 0,1 MPa και η θερμοκρασία 15°C. Προσδιορίστε 1. Την πίεση και τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του κύκλου. 2. Τη θερμική απόδοση. 3. Τη μέση ενεργό πίεση.

Ο κύκλος προσδιορίζεται από τέσσερις παραμέτρους:  $P_1 = 100$  kPa,  $T_1 = 15^\circ\text{C}$ ,  $r_v = 20$  και  $q_H = 1800$  kJ/kg.



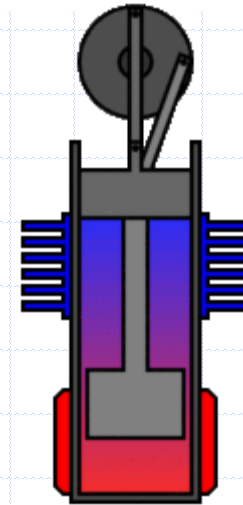
# Ο κύκλος Stirling...

- Η μηχανή **Stirling** είναι πολύπλοκη και βαριά μηχανή, προσομοιώνεται από έναν κύλινδρο που στα δύο άκρα του διαθέτει δύο έμβολα (κλειστό σύστημα) και από εναλλάκτη θερμότητας



**Τύπος αλφα:** Διαθέτει δύο κυλίνδρους

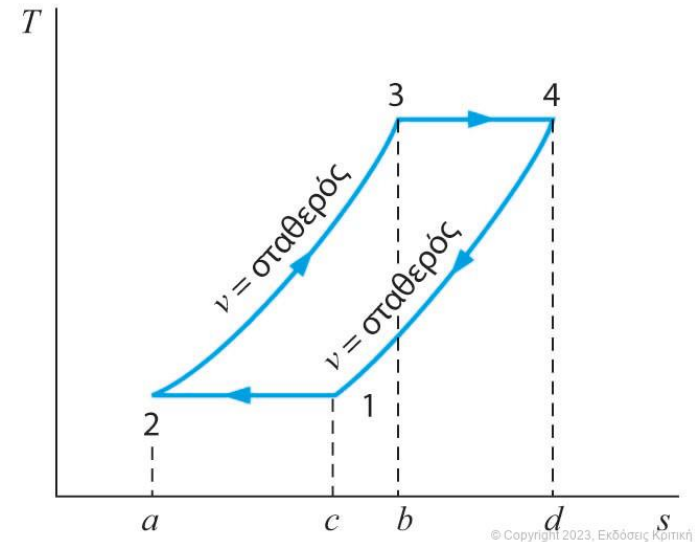
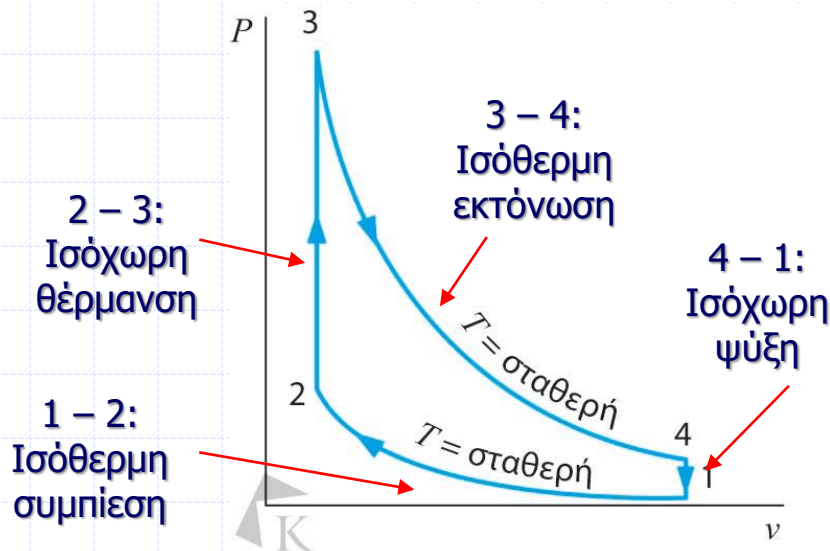
- Ο κύλινδρος διαστολής (κόκκινος) διατηρείται σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ ο κύλινδρος συμπίεσης (μπλε) ψύχεται
- Η διέλευση μεταξύ των δύο κυλίνδρων περιέχει τον αναγεννητή



**Τύπος Βήτα:** Ένας κύλινδρος

- Ο μοναδικός κύλινδρος θερμαίνεται στο ένα άκρο και ψύχεται στο άλλο
- Ένας χαλαρός σύνδεσμος επιτρέπει την διακίνηση του αέρα μεταξύ του ψυχρού και του θερμού άκρου του κυλίνδρου
- Ένα έμβολο ισχύος στο άκρο του κυλίνδρου μεταδίδει την κίνηση

# Ο κύκλος Stirling...



- ❑ Ο κύκλος Stirling είναι ανάλογος με τον κύκλο Otto, με τις αδιαβατικές διεργασίες να αντικαθίστανται από ισοθερμοκρασιακές διεργασίες
- ❑ Ο κύκλος Stirling περιλαμβάνει δύο διεργασίες μεταφοράς θερμότητας υπό σταθερό όγκο, διατηρώντας τη συνολική μεταβολή όγκου κατά τη διάρκεια του κύκλου σε μια ελάχιστη τιμή, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια εφαρμογή εμβόλου/κυλίνδρου με έργο μετακίνησης οριακών επιφανειών
- ❑ Πρέπει να έχει υψηλή μέση ενεργό πίεση

# Ο κύκλος Stirling...

**ΠΙΝΑΚΑΣ 10.4** Οι διεργασίες του κύκλου Stirling

Διεργασία	Εξίσωση ενέργειας	Εξίσωση εντροπίας	Εξίσωση διεργασίας
Συμπίεση/ψύξη	$u_2 - u_1 = -{}_1q_2 - {}_1w_2$	$s_2 - s_1 = {}_1q_2/T_L + 0$	$T_1 = T_2 = T_L$
Καύση $w = 0$	$u_3 - u_2 = {}_2q_3$	$s_3 - s_2 = \int dq/T + 0$	$v_3 = v_2 = C$
Εκτόνωση/θέρμανση	$u_4 - u_3 = {}_3q_4 - {}_3w_4$	$s_4 - s_3 = {}_3q_4/T_H + 0$	$T_3 = T_4 = T_H$
Απόρριψη θερμότητας	$u_1 - u_4 = {}_4q_1$	$s_1 - s_4 = \int dq/T + 0$	$v_4 = v_1 = C$

# Ο κύκλος Stirling...

- Στις διεργασίες σταθερού όγκου, η ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται είναι ίδια, αλλά με αντίθετο πρόσημο:

$${}_2q_3 = u_3 - u_2 = u_{TH} - u_{TL}$$

$${}_4q_1 = u_1 - u_4 = u_{TL} - u_{TH} = -{}_2q_3$$

- Οι όροι του έργου είναι:

$${}_1w_2 = {}_1q_2 = RT_1 \ln(v_2/v_1) = -RT_1 \ln r_v$$

$${}_3w_4 = {}_3q_4 = RT_3 \ln(v_4/v_3) = RT_3 \ln r_v$$

- Η προσθήκη θερμότητας είναι ίση με:

$$q_{in} = {}_2q_3 + {}_3q_4 = C_v(T_3 - T_2) + T_3(s_4 - s_3) = C_v(T_3 - T_1) + RT_3 \ln r_v$$

- Οπότε, η απόδοση του βασικού κύκλου Stirling γίνεται ίση με:

Η απόδοση του κύκλου Stirling είναι συνάρτηση όχι μόνο του λόγου συμπίεσης αλλά και του λόγου των θερμοκρασιών  $T_1 / T_3$

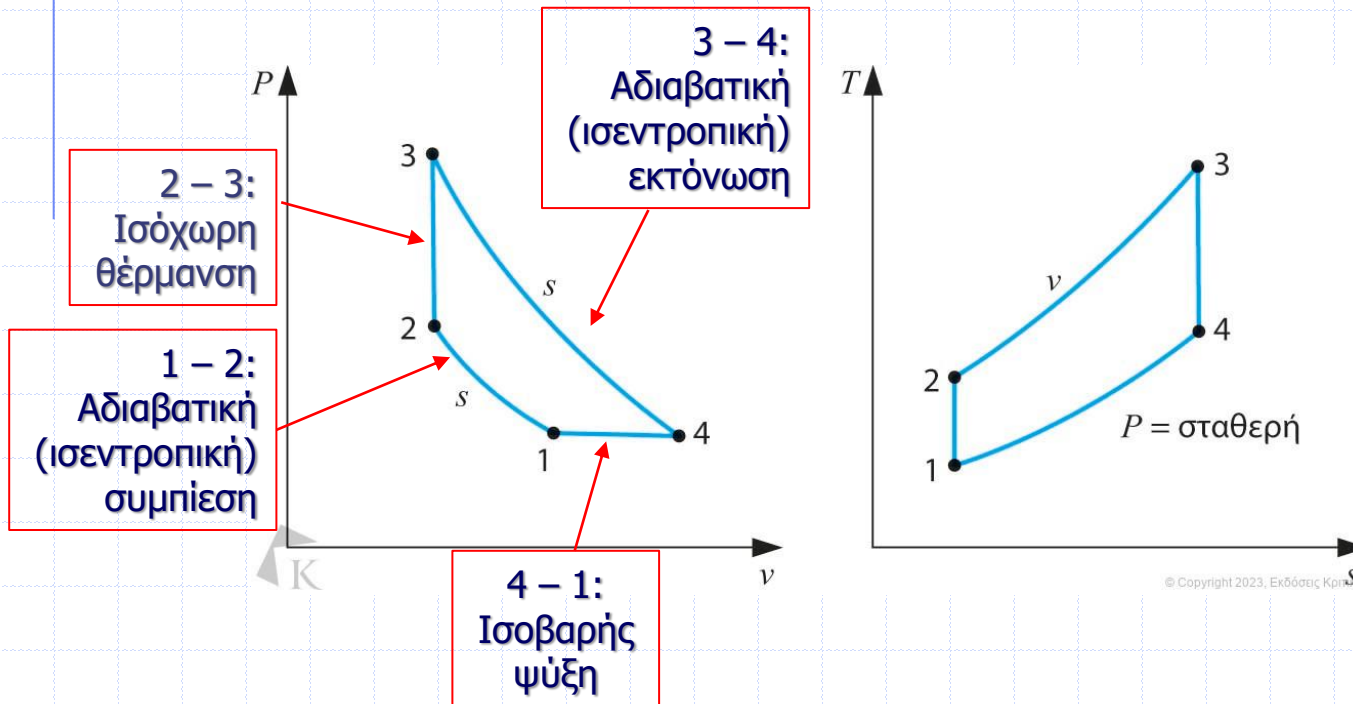
Αν ο λόγος συμπίεσης  $r_v$  γίνει μεγάλος, η απόδοση προσεγγίζει την απόδοση του κύκλου Carnot

$$\eta_{Stirling} = \eta_{Carnot} \ln r_v / [\eta_{Carnot} C_v / R + \ln r_v]$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - T_1 / T_3 = 1 - T_L / T_H$$

# Οι κύκλοι Atkinson και Miller...

- Ο κύκλος Atkinson, που διαφοροποιείται ελαφρά από τον κύκλο Otto, έχει υψηλότερο λόγο εκτόνωσης από λόγο συμπίεσης, και επομένως η απόρριψη θερμότητας πραγματοποιείται υπό σταθερή πίεση



# Οι κύκλοι Atkinson και Miller...

**ΠΙΝΑΚΑΣ 10.5** Οι διεργασίες του κύκλου Atkinson

Διεργασία	Εξίσωση ενέργειας	Εξίσωση εντροπίας	Εξίσωση διεργασίας
Συμπίεση	$u_2 - u_1 = -{}_1w_2$	$s_2 - s_1 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_1 = s_2$
Καύση	$u_3 - u_2 = q_H$	$s_3 - s_2 = \int dq_H/T + 0$	$v_3 = v_2 = C$
Εκτόνωση	$u_4 - u_3 = -{}_3w_4$	$s_4 - s_3 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_3 = s_4$
Απόρριψη θερμότητας	$h_1 - h_4 = -q_L$	$s_1 - s_4 = -\int dq_L/T + 0$	$P_4 = P_{1,4} w_1 = P_4(v_1 - v_4)$

# Οι κύκλοι Atkinson και Miller...

□ Για τις διεργασίες συμπίεσης και εκτόνωσης ( $s = \text{σταθερή}$ ) είναι:

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

□ Ενώ, για την διεργασία απόρριψης θερμότητας ( $P = \text{σταθερή}$ ) είναι:

$$T_4 = \left(\frac{v_4}{v_1}\right) T_1 \quad \text{και} \quad q_L = h_4 - h_1$$

□ Η απόδοση του κύκλου γίνεται ίση με:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{q_H - q_L}{q_H} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{u_3 - u_2} \\ &\cong 1 - \frac{C_p}{C_v} \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - k \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \end{aligned}$$

# Οι κύκλοι Atkinson και Miller...

- Ονομάζοντας τον λόγο συμπίεσης  $CR = (v_1 / v_3)$  και τον λόγο εκτόνωσης  $ER = (v_4 / v_3)$ , οι θερμοκρασίες εκφράζονται ως:

$$T_2 = T_1 CR^{k-1}, \quad T_4 = \left(\frac{v_4}{v_1}\right) T_1 = \frac{ER}{CR} T_1$$

και από τη σχέση μεταξύ των  $T_3$  και  $T_4$  προκύπτει:

$$T_3 = T_4 ER^{k-1} = \frac{ER}{CR} T_1 ER^{k-1} = \frac{ER^k}{CR} T_1$$

- Οπότε, η απόδοση του κύκλου γίνεται:

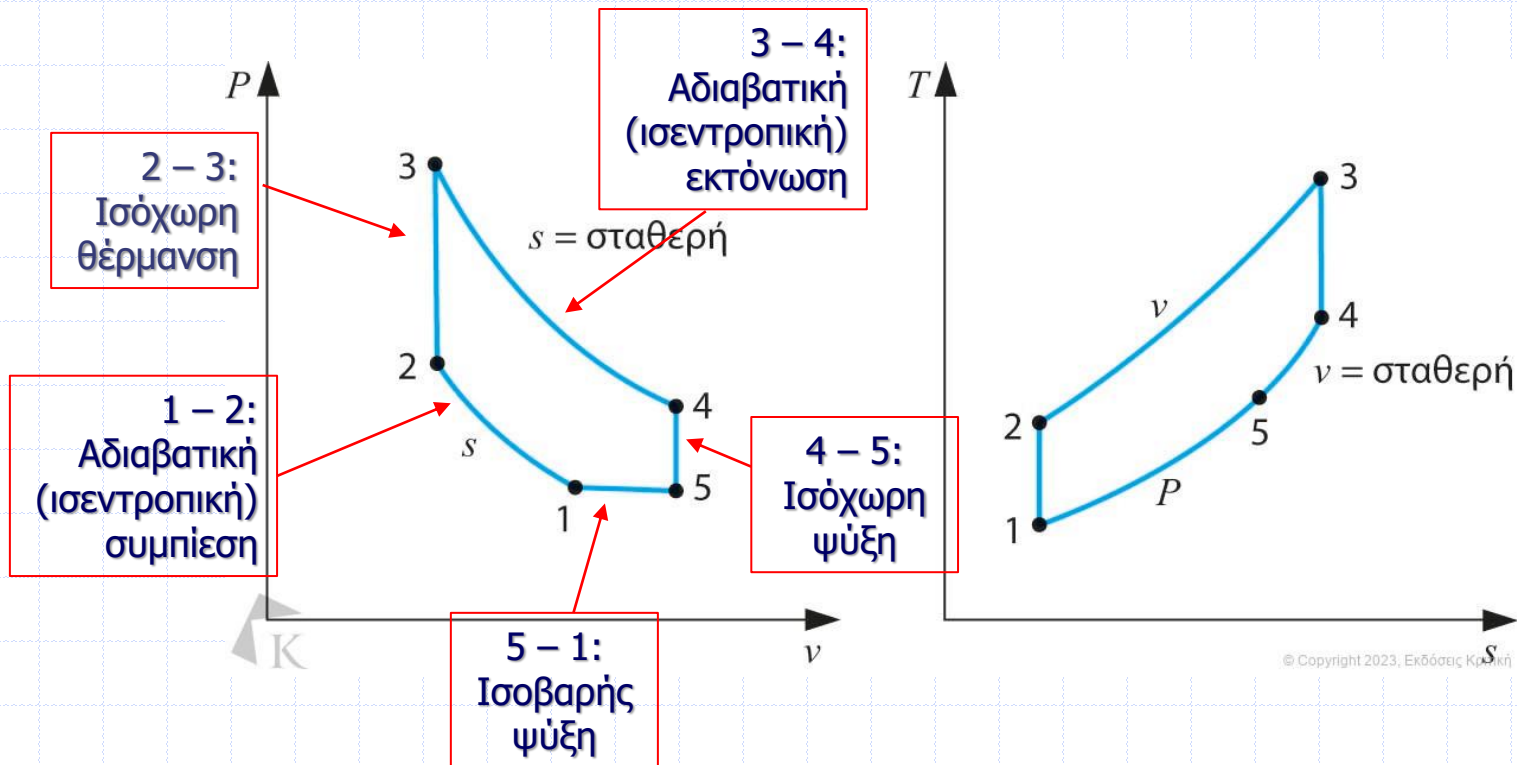
$$\eta = 1 - k \frac{\frac{ER}{CR} - 1}{\frac{ER^k}{CR} - CR^{k-1}} = 1 - k \frac{ER - CR}{ER^k - CR^k}$$

Οι λόγοι εκτόνωσης και συμπίεσης είναι σημαντικοί



# Οι κύκλοι Atkinson και Miller...

- Καθώς είναι δύσκολο να διασφαλιστεί ότι  $P_4 = P_1$ , μια συντομότερη εκτόνωση και μια τροποποίηση με τη χρήση ενός υπερσυμπιεστή προσεγγίζεται με τον κύκλο Miller, που αποτελεί ενδιάμεσο κύκλο μεταξύ των κύκλων Otto και Atkinson



# Οι κύκλοι Atkinson και Miller...

**ΠΙΝΑΚΑΣ 10.6** Οι διεργασίες του κύκλου Miller

Διεργασία	Εξίσωση ενέργειας	Εξίσωση εντροπίας	Εξίσωση διεργασίας
Συμπίεση	$u_2 - u_1 = -{}_1w_2$	$s_2 - s_1 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_1 = s_2$
Καύση	$u_3 - u_2 = q_H$	$s_3 - s_2 = \int dq_H/T + 0$	$w = 0, v_3 = v_2$
Εκτόνωση	$u_4 - u_3 = -{}_3w_4$	$s_4 - s_3 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_3 = s_4$
Απόρριψη θερμότητας 1	$u_5 - u_4 = -q_{L1}$	$s_5 - s_4 = -dq_{L1}/T + 0$	$w = 0, v_4 = v_5$
Απόρριψη θερμότητας 2	$h_1 - h_5 = -q_{L2}$	$s_1 - s_5 = -dq_{L2}/T + 0$	$P_5 = P_{1,5} w_1 = P_1(v_1 - v_4)$

# Οι κύκλοι Atkinson και Miller...

- Η απόδοση του κύκλου Miller εκφράζεται όπως για όλες τις θερμικές μηχανές (υπολογίζοντας την απορριπτόμενη θερμότητα), προκύπτει:

$$\eta_{\text{th}} = w_{\text{net}}/q_H = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{u_4 - u_5 + h_5 - h_1}{u_3 - u_2}$$

- Με την παραδοχή του πρότυπου ψυχρού αέρα και τις διεργασίες του κύκλου προκύπτει:

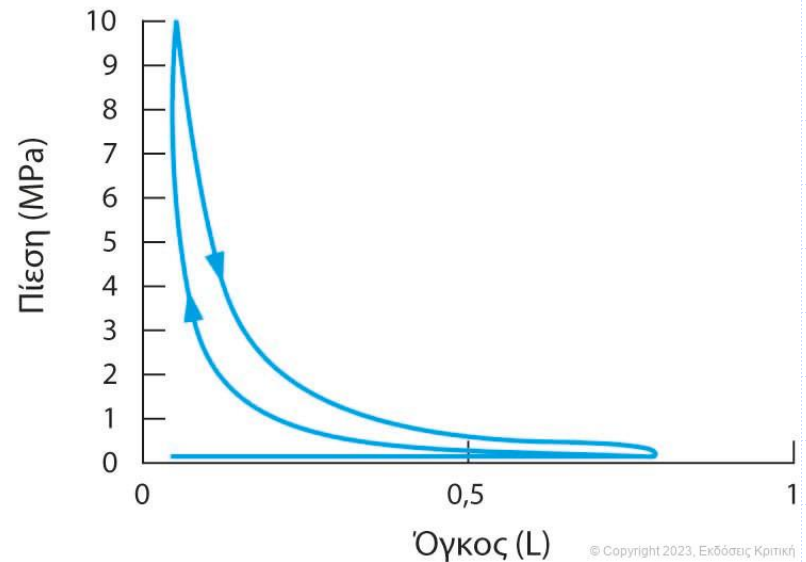
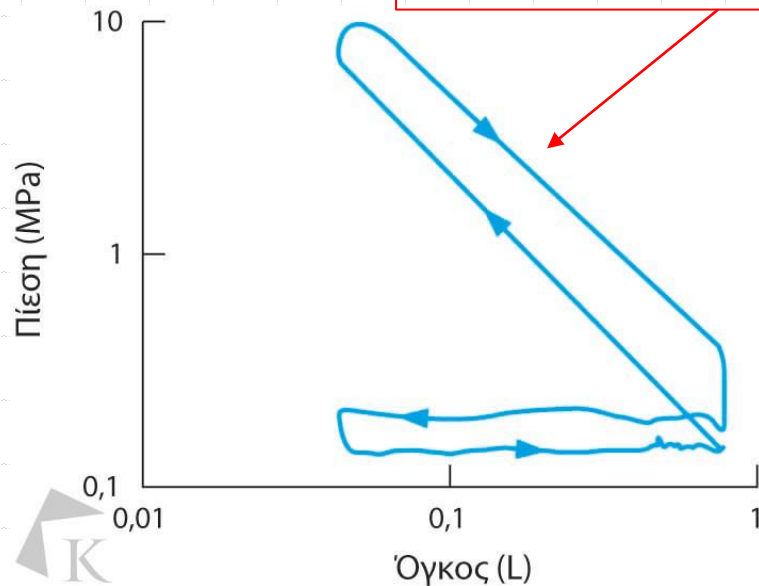
$$\eta_{\text{th}} \approx 1 - \frac{T_4 - T_5 + k(T_5 - T_1)}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{(a - 1)ER + k(ER - CR)}{a ER^k - CR^k}$$

Όπου:  $a = P_4/P_1$ ,  $CR = v_1/v_2$ ,  $ER = v_4/v_3$

- Όταν  $a = 1$ , η απόδοση είναι του κύκλου Atkinson, ενώ, αν το  $a$  είναι πολύ μεγάλο, τείνει στην απόδοση του κύκλου Otto

# Οι κύκλοι Atkinson και Miller...

Οι διεργασίες συμπίεσης και εκτόνωσης είναι πολυτροπικές με  $n \approx 1,32$  και  $n \approx 1,2$  αντίστοιχα



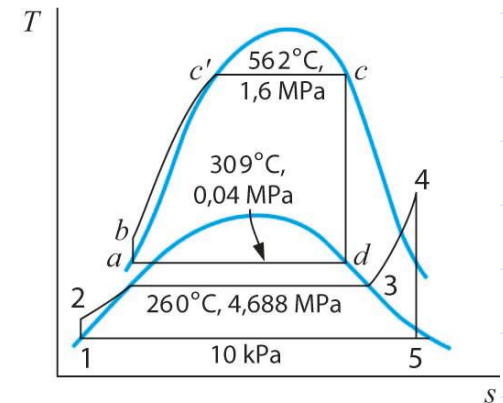
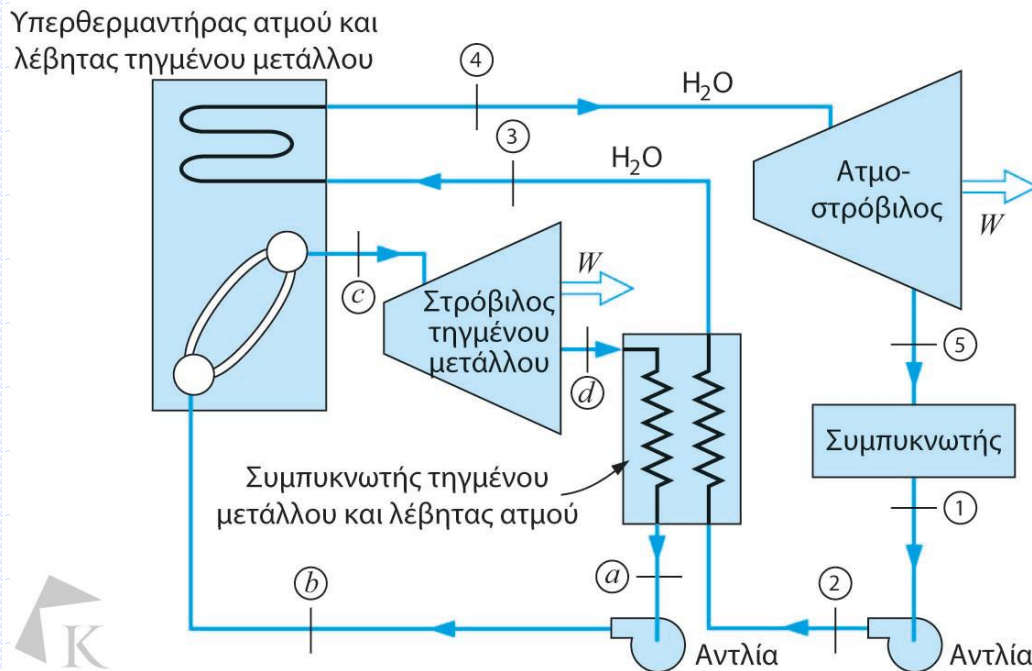
Διάγραμμα πραγματικού κύκλου Diesel  $P-v$  σε κανονικό και λογαριθμικό σύστημα αξόνων

# Συστήματα συνδυασμένου κύκλου ισχύος και ψύξης...

- ❑ Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στις οποίες είναι επιθυμητός ο συνδυασμός δύο κύκλων σε σειρά, είτε σε συστήματα ισχύος είτε σε συστήματα ψύξης, ώστε να επωφεληθούμε από ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών ή να αξιοποιήσουμε αυτό που σε διαφορετική περίπτωση θα αποτελούσε απορριπτόμενη θερμότητα για τη βελτίωση της απόδοσης
- ❑ Ο όρος "**συνδυασμένος κύκλος**" (combined cycle) είναι ο συνδυασμός των δύο κύκλων ισχύος, ενός κύκλου αερίου (πχ. Brayton) και ενός κύκλου ατμού (πχ. Rankine), που μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ή συνδυασμένα, και έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά
- ❑ Η θερμότητα που απορρίπτεται από τον κύκλο αερίου χρησιμοποιείται ως θερμότητα εισαγωγής στον κύκλο ατμού, χωρίς πρόσθετη εισαγωγή θερμότητας, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση του συνδυασμένου κύκλου

# Συστήματα συνδυασμένου κύκλου ισχύος και ψύξης...

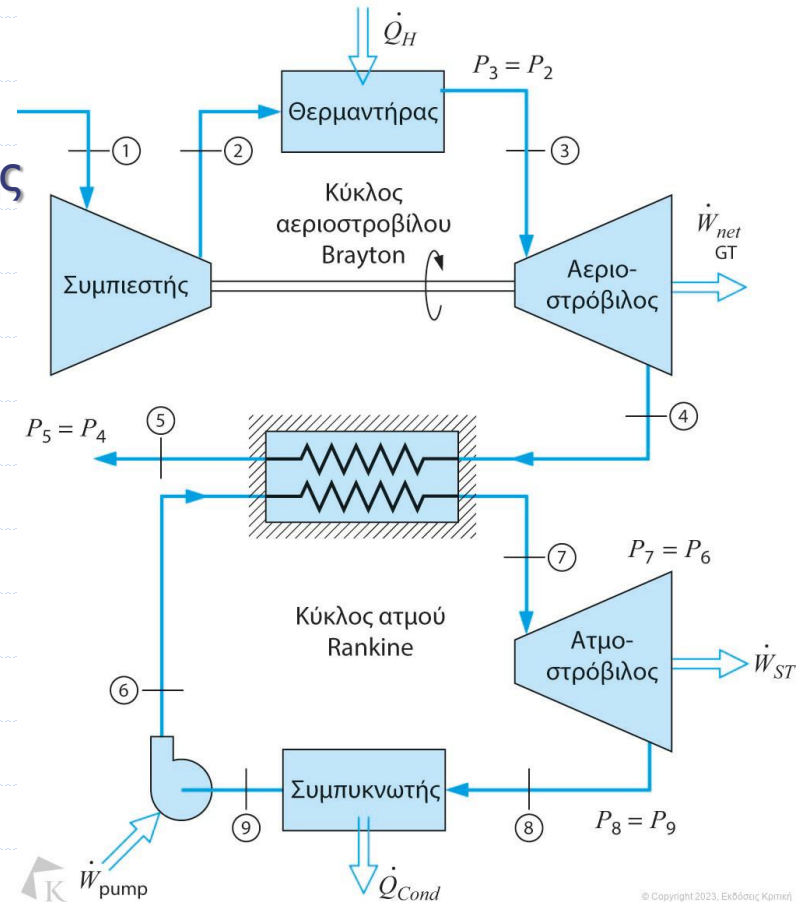
- Ένας συνδυασμένος κύκλος παραγωγής ισχύος φαίνεται στο σχήμα ως ένας απλός κύκλος ατμού με έναν υπερκείμενο κύκλο τηγμένου μετάλλου, ο οποίος αναφέρεται συχνά ως δυαδικός κύκλος



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

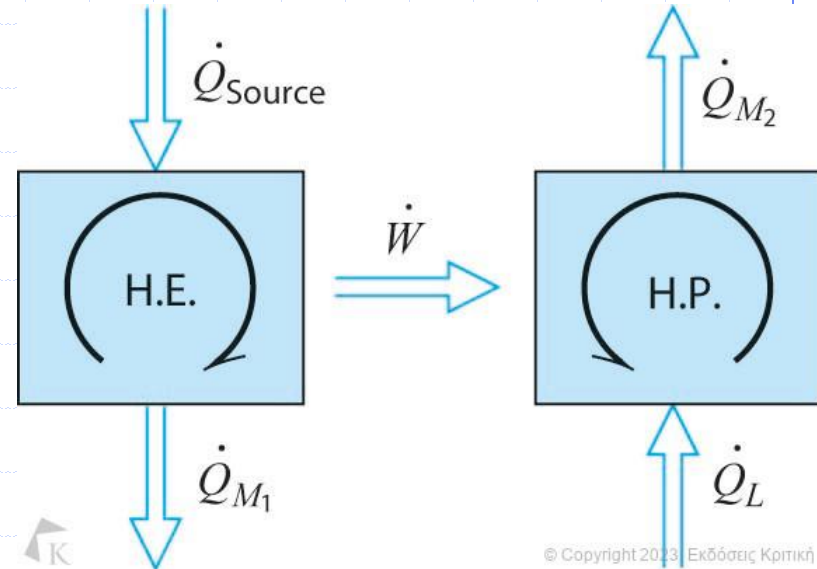
# Συστήματα συνδυασμένου κύκλου ισχύος και ψύξης...

- ❑ Ο συνδυασμένος κύκλος χρησιμοποιεί την “απορριπτόμενη θερμότητα” από έναν κύκλο αεριοστροβίλου Brayton ως πηγή θερμότητας για έναν κύκλο ισχύος υδρατμών ή άλλου είδους ατμού
- ❑ Ο κύκλος ατμού λειτουργεί ως ο κύκλος βάσης για τον κινητήρα αερίου, με στόχο την βελτίωση της ολικής θερμικής απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου
- ❑ Χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις πιο σύγχρονες μονάδες παραγωγής ισχύος αεριοστροβίλων με καύσιμο φυσικό αέριο
- ❑ Για την καλύτερη αξιοποίηση των καυσαερίων του κύκλου Brayton σε έναν συνδυασμένο κύκλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μίγμα ως εργαζόμενο ρευστό στον κύκλο Rankine (πχ. κύκλος Kalina, με εργαζόμενο ρευστό μίγματα αμμωνίας-νερού)



# Συστήματα συνδυασμένου κύκλου ισχύος και ψύξης...

□ Μπορεί επίσης να πρόκειται για συνδυασμό ενός κύκλου μιας θερμικής μηχανής, παρέχοντας το έργο για τη λειτουργία ενός κύκλου ψύξης (πχ. ο κινητήρας ενός αυτοκινήτου παράγει αξονικό έργο για να θέσει σε λειτουργία τη μονάδα κλιματισμού του αυτοκινήτου ή όταν η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την καύση ορισμένων καυσίμων θέτει σε λειτουργία ένα οικιακό ψυγείο)



□ Για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές, το έργο εισόδου μπορεί να περιοριστεί πλήρως, με την καύση προπανίου ως πηγή θερμότητας για τη λειτουργία ενός ψυγείου χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα



# Βασικές έννοιες και σχέσεις...

## Κύκλος Brayton

Πρότυπος κύκλος:

$2 * (P = C, \text{τα } q) + 2 * (s = C, \text{τα } w)$   
Εξισώσεις διεργασιών στον Πίνακα 10.1

Λόγος συμπίεσης:

$$\text{Λόγος πίεσης } r_p = P_{\text{high}}/P_{\text{low}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

Απόδοση (ιδιότ. ψυχρού αέρα):

$$\eta_{\text{th}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \approx 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - r_p^{-(k-1)/k}$$

Αναγεννητής:

Εναλλάκτης θερμότητας διπλού ρευστού, χρησιμοποιεί ενέργεια της ροής εξαγωγής.

Απόδοση αναγεννητή

$$\eta_{\text{regen}} = (h_x - h_2)/(h_{x'} - h_2)$$

Κύκλος με ιδανικό αναγεννητή

$$\eta_{\text{th w. regen}} = 1 - \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4} \approx 1 - \frac{T_2}{T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(1-k)/k}$$

Ενδιάμεσος ψύκτης:

Ψύκτης μεταξύ των βαθμίδων του συμπιεστή, μειώνει την είσοδο έργου.

Κινητήρας αερίωσης:

Μηδενικό αξονικό έργο εξόδου, η κινητική ενέργεια παράγεται στο ακροφύσιο εξόδου.

Ωθηση:

$$F = \dot{m}(V_e - V_i) \text{ εξίσωση ορμής}$$

Προωστική ισχύς:

$$\dot{W} = FV_{\text{aircraft}} = \dot{m}(V_e - V_i)V_{\text{aircraft}}$$

# Βασικές έννοιες και σχέσεις...

## Κύκλος ψύξης πρότυπου αέρα

Πρότυπος κύκλος:  $2 * (P = C, \text{τα } q) + 2 * (s = C, \text{τα } w)$

Ίδιος με έναν κύκλο Brayton, όμως η κατεύθυνση ροής έχει αντιστραφεί

Συντελεστής απόδοσης:  $\text{COP}_{\text{REF}} = \beta_{\text{REF}} = \frac{q_L}{w_{\text{net}}} = [r_p^{(k-1)/k} - 1]^{-1}$

Ψυκτική ικανότητα  $\dot{Q}_L$

## Κύκλοι ισχύος εμβόλου/κυλίνδρου

Λόγος συμπίεσης:  $r_v = CR = V_{\text{max}}/V_{\text{min}} = v_{\text{max}}/v_{\text{min}}$

Όγκος εμβολισμού:  $\Delta V = V_{\text{max}} - V_{\text{min}} = m(v_{\text{max}} - v_{\text{min}}) = SA_{\text{cyl}}$   
 $V_{\text{displ}} = N_{\text{cyl}}\Delta V$

Διαδρομή:  $S = 2R_{\text{crank}}$ , διαδρομή εμβόλου σε συμπίεση/εκτόνωση

Μέση ενεργή πίεση:  $P_{\text{meff}} = w_{\text{net}}/(v_{\text{max}} - v_{\text{min}}) = W_{\text{net}}/(V_{\text{max}} - V_{\text{min}})$

Ισχύς από όλους τους κυλίνδρους:  $\dot{W} = N_{\text{cyl}} m w_{\text{net}} \frac{\text{RPM}}{60} = P_{\text{meff}} V_{\text{displ}} \frac{\text{RPM}}{60}$   
(επί 1/2 για τετράχρονο κύκλο)

# Βασικές έννοιες και σχέσεις...

## Κύκλος Otto

Πρότυπος κύκλος:  $2 * (v = C, \text{ είσοδος } q, \text{ έξοδος } q) + 2 * (s = C, \text{ τα } w)$   
εξισώσεις διεργασίας στον Πίνακα 10.2

Απόδοση (ιδιότ.  
ψυχρού αέρα):  $\eta_{th} \approx 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - r_v^{1-k}$

## Κύκλος diesel

Πρότυπος κύκλος:  $(P = C, \text{ είσοδος } q) + (v = C, \text{ έξοδος } q) + 2 * (s = C, \text{ τα } w)$   
εξισώσεις διεργασίας στον Πίνακα 10.3

Λόγος αποκοπής  $r_{cutoff} = \frac{v_3}{v_2} = \frac{T_3}{T_2}$

Απόδοση (ιδιότ.  
ψυχρού αέρα):  $\eta_{th} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2} \approx 1 - \frac{1}{k} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{r_v^{1-k}}{k} \frac{r_{cutoff}^k - 1}{r_{cutoff} - 1}$

# Βασικές έννοιες και σχέσεις...

## Άλλοι κύκλοι

Κύκλος Stirling:  $2 * (T = C) + 2 * (v = C)$  Σχήμα 10.19  
εξισώσεις διεργασίας στον Πίνακα 10.4

Κύκλος Atkinson:  $ER = v_4/v_3 > CR = v_1/v_2$  Σχήμα 10.20  
εξισώσεις διεργασίας στον Πίνακα 10.5

Απόδοση:  $\eta_{th} = 1 - k \frac{ER - CR}{ER^k - CR^k}$

Κύκλος Miller: Κύκλος 5 διεργασιών,  $ER = v_4/v_3 > CR = v_1/v_2$ . Σχήμα 10.21  
εξισώσεις διεργασίας στον Πίνακα 10.6

Απόδοση:  $\eta_{th} = 1 - \frac{(a - 1)ER + k(ER - CR)}{a ER^k - CR^k}$

Παράμετρος  $a = P_4/P_1$

## Συνδυασμένοι κύκλοι

Κύκλος κορυφής, βάσης: Οι κύκλοι υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας Σχήμα 10.24, Σχήμα 10.25.  
Ο κύκλος χαμηλής  $T$  μπορεί να είναι ένας οργανικός κύκλος Rankine οδηγούμενος από την απορριπτόμενη θερμότητα.

Διαδοχικό σύστημα: Συνδυασμένοι κύκλοι παραγωγής ψύξης ή ισχύος, Σχήμα 10.23.

# Θερμοδυναμική

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!