



[119] Θερμοδυναμική Ι

**Θερμοδυναμικοί κύκλοι
παραγωγής ισχύος με αέρα**

καθηγητής Γ. Σκόδρας

Περιεχόμενα...

Η διάλεξη που ακολουθεί βασίζεται στα συγγράμματα:

(1) "Θερμοδυναμική για Μηχανικούς", 8η Έκδοση, Cengel Yunus A., Boles Michael A

(2) "Θερμοδυναμική και Προχωρημένη Θερμοδυναμική", Α. Πολυζάκης



Περιεχόμενα...

- Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές
- Κύκλος Carnot
- Κύκλος Otto
- Κύκλος Diesel
- Μικτός κύκλος (Diesotto)
- Κύκλος Brayton – Joule
- Ιδανικοί κύκλοι αεριοπροώθησης
- Κύκλος Stirling
- Κύκλος Ericsson
- Ανάλυση κύκλων με το 2^ο Θερμοδυναμικό Αξίωμα



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

- ❑ Οι **κινητήρες** ή **θερμικές μηχανές** ή απλά **μηχανές**, είναι διατάξεις που στοχεύουν στην παραγωγή ισχύος και λειτουργούν με μια πραγματική κυκλική μεταβολή που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο θερμοδυναμικό κύκλο, που επαναλαμβάνεται για όσο χρόνο βρίσκονται σε λειτουργία.
- ❑ Η πραγματική κυκλική μεταβολή προσομοιάζεται από την ανάλυση του ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου με την προσθήκη κατάλληλων δεικτών απόδοσης, που εισάγουν την μη ιδανικότητα των πραγματικών μεταβολών-διεργασιών.
- ❑ Η μελέτη των ιδανικών κύκλων γίνεται με την χρήση των μαθηματικών σχέσεων που περιγράφουν τα φαινόμενα της θερμοδυναμικής



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

Η λειτουργία των ιδανικών θερμοδυναμικών κύκλων εδράζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

1. Όλες οι διεργασίες θεωρούνται αντιστρεπτές, δηλαδή, δεν υπάρχουν απώλειες τριβών
2. Το εργαζόμενο μέσο διατηρεί την ίδια σύσταση εντός του κύκλου, είναι ιδανικό αέριο με σταθερές ειδικές θερμότητες (συνήθως θεωρείται αέρας)
3. Δεν υπάρχουν απώλειες πίεσης
4. Για ανοιχτά συστήματα η μάζα παραμένει σταθερή (αρχή διατήρησης μάζας)
5. Η καύση είναι τέλεια και στιγμιαία
6. Ως συνέπεια των 4 και 5, ο θάλαμος καύσης προσομοιώνεται από έναν θερμικό εναλλάκτη, που τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή θερμότητας (ίδιοι υπολογισμοί σε ανοιχτό και κλειστό κύκλο)
7. Για ανοιχτά συστήματα, οι μεταβολές κινητικής και δυναμικής ενέργειας θεωρούνται αμελητέες [οι ολικές (ανακοπής) ιδιότητες ταυτίζονται με τις στατικές]
8. Στα ανοιχτά συστήματα με ροή, αυτή θεωρείται μονοδιάστατη και ομοιόμορφη (σε επίπεδο κάθετο προς την ροή, οι ιδιότητες παραμένουν σταθερές)



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

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

- **Μηχανές 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-συσσκευή, πχ. κινητήρες Otto και Diesel και αεριοστρόβιλοι (κινητήρες Brayton)
- **Μηχανές 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



Κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές...

- ❑ Αν το εργαζόμενο μέσο ρέει ή όχι κατά την κυκλική μεταβολή, οι κινητήρες ονομάζονται **συνεχούς ή μη ροής**, σε αντιστοιχία με τα ανοιχτά και κλειστά συστήματα.
- ❑ Στους κινητήρες συνεχούς ροής (πχ. αεριστρόβιλος) εφαρμόζεται το 1^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα για ανοιχτά συστήματα. Αντίθετα, όταν το εργαζόμενο μέσο είναι εγκλωβισμένο εντός του κυλίνδρου-εμβόλου (πχ. κινητήρες Otto και Diesel) εφαρμόζεται το 1^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα για κλειστά συστήματα.
- ❑ Οι θερμικές μηχανές εάν το ρευστό λειτουργίας επανέρχεται στο τέλος του κύκλου στην αρχική του κατάσταση, δηλαδή επανακυκλοφορεί ή όχι, ονομάζεται **ανοικτός ή κλειστός κύκλος**, αντίστοιχα. Πχ. στους κινητήρες Otto και Diesel, στο τέλος του κάθε κύκλου τα καυσαέρια αποβάλλονται και αντικαθίστανται από «φρέσκο» μίγμα αέρα-καυσίμου (ανοικτός κύκλος), δηλαδή, η μηχανή λειτουργεί σύμφωνα με ένα πραγματικό θερμοδυναμικό κύκλο, όμως το εργαζόμενο μέσο δεν πραγματοποιεί έναν πλήρη θερμοδυναμικό κύκλο.

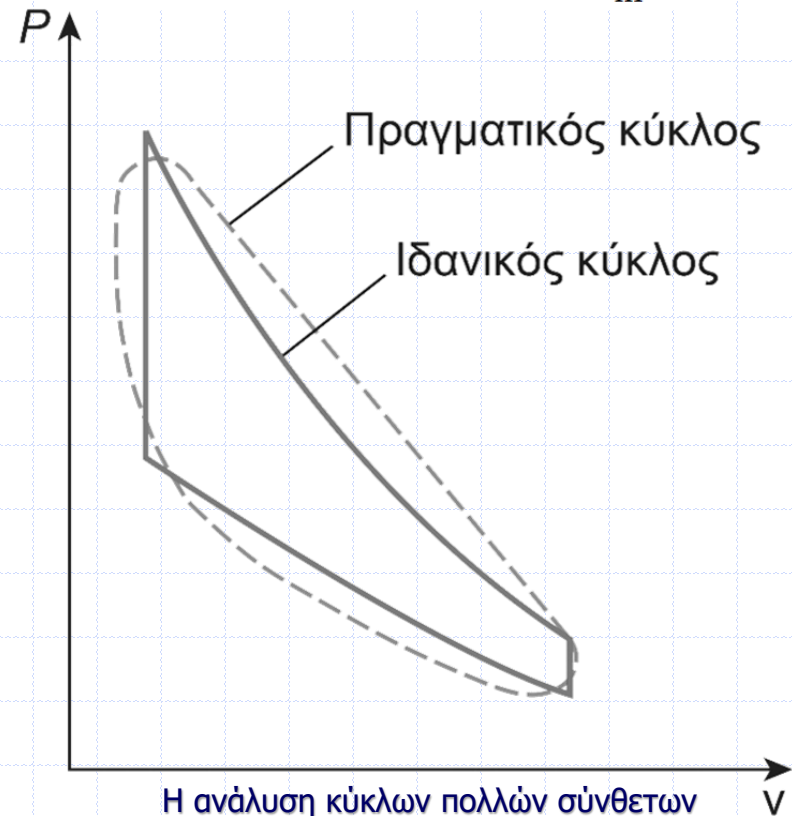


Κύκλοι ισχύος...

- ❑ Οι περισσότερες εργοπαραγωγές μηχανές λειτουργούν σε κύκλο.
- ❑ **Ιδανικός κύκλος:** είναι ένας κύκλος που προσεγγίζει τον πραγματικό κύκλο, αλλά αποτελείται πλήρως από εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες.
- ❑ Οι **αντιστρεπτοί κύκλοι**, όπως ο **κύκλος Carnot**, έχουν την υψηλότερη θερμική απόδοση μεταξύ όλων των θερμικών μηχανών που λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμοκρασιών. Σε αντίθεση με τους ιδανικούς κύκλους, είναι πλήρως αντιστρεπτοί και μάλλον ακατάλληλοι για τη μελέτη πραγματικών μηχανών.

Θερμική απόδοση των θερμικών μηχανών

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad \text{ή} \quad \eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}}$$



Η ανάλυση κύκλων πολλών σύνθετων διεργασιών μπορεί να απλουστευτεί σημαντικά, θεωρώντας κάποιες εξιδανικευμένες παραδοχές.

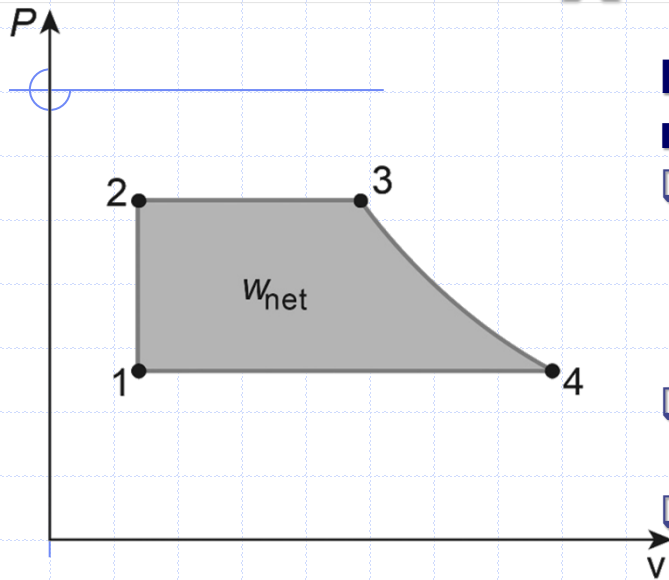


Κύκλοι ισχύος...

- ❑ Οι ιδανικοί κύκλοι είναι *εσωτερικώς αντιστρεπτοί*, αλλά, σε αντίθεση προς τον κύκλο Carnot, δεν είναι κατ' ανάγκη κι *εξωτερικώς αντιστρεπτοί*.
- ❑ Συνεπώς, η θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου είναι, εν γένει, μικρότερη εκείνης ενός πλήρως αντιστρεπτού κύκλου που λειτουργεί ανάμεσα στις ίδιες θερμοκρασίες.
- ❑ Ωστόσο, η θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου είναι σαφώς υψηλότερη εκείνης ενός πραγματικού κύκλου, λόγω των εξιδανικεύσεων που έχουν θεωρηθεί.

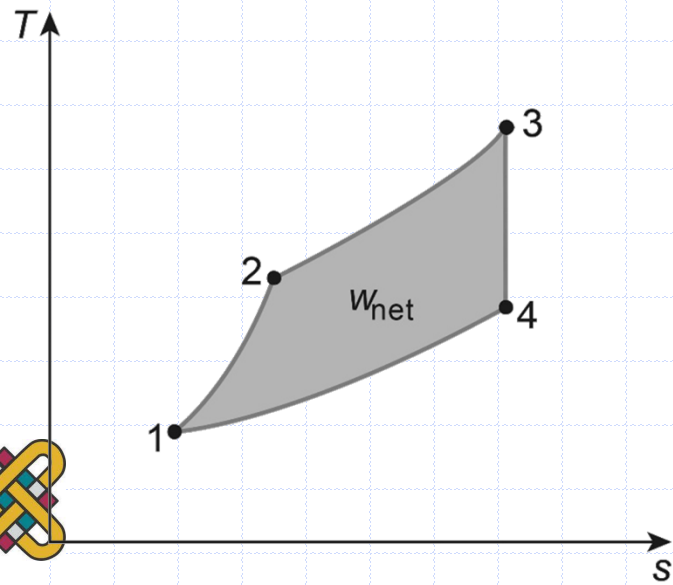


Κύκλοι ισχύος...



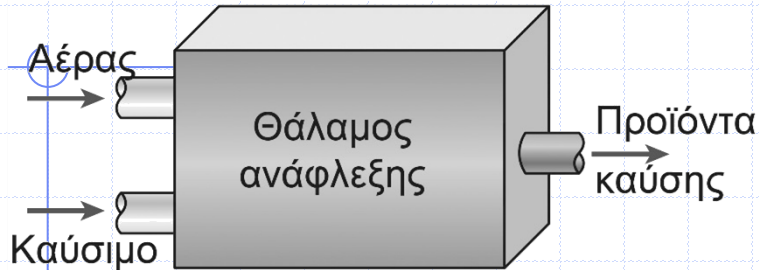
Εξιδανικεύσεις & απλοποιήσεις κατά την ανάλυση κύκλων ισχύος:

- ❑ Στον κύκλο δεν εμφανίζονται **τριβές**. Συνεπώς, το εργαζόμενο μέσο δεν υφίσταται κάποια πτώση πίεσης καθώς διέρχεται από σωληνώσεις ή συσκευές (π.χ. εναλλάκτες θερμότητας)
- ❑ Όλες οι διεργασίες εκτόνωσης & συμπίεσης πραγματοποιούνται σε κατάσταση **ψευδοϊσορροπίας**
- ❑ Οι σωληνώσεις που συνδέουν τα διάφορα επιμέρους στοιχεία του συστήματος είναι τέλεια μονωμένες, άρα η **μετάδοση θερμότητας** μέσω αυτών είναι αμελητέα

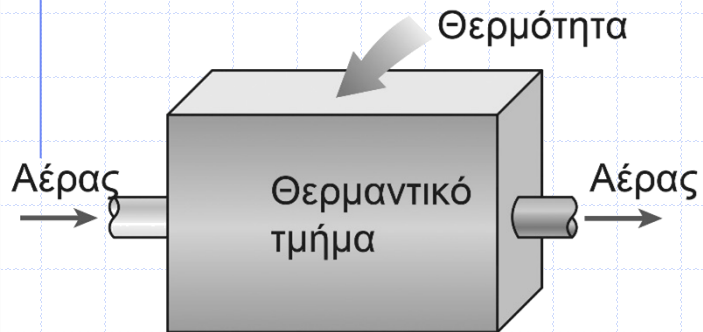


- ❑ Στο διάγραμμα $T-s$, το κλάσμα του εμβαδού του κύκλου προς το εμβαδό της επιφάνειας κάτω από τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις διεργασίες πρόσδοσης θερμότητας, αναπαριστά τη θερμική απόδοση του κύκλου
- ❑ Κάθε τροποποίηση του κύκλου που αυξάνει το λόγο αυτών των δύο εμβαδών, αυξάνει επίσης τη θερμική απόδοση του κύκλου

Παραδοχές πρότυπου αέρα...



(α) Πραγματικό



(β) Ιδανικό

Στους ιδανικούς κύκλους, η καύση μοντελοποιείται ως διεργασία πρόσδοσης θερμότητας

Παραδοχές πρότυπου αέρα:

1. Το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας, ο οποίος κυκλοφορεί συνεχώς εντός κλειστού βρόχου και συμπεριφέρεται πάντα ως ιδανικό αέριο
2. Όλες οι διεργασίες που συνθέτουν έναν ιδανικό κύκλο είναι εσωτερικώς αντιστρεπτές
3. Η διεργασία της καύσης αντικαθίσταται από μια διεργασία πρόσδοσης θερμότητας από μια εξωτερική πηγή
4. Η διεργασία απόρριψης θερμότητας αντικαθίσταται από μια διεργασία αφαίρεσης θερμότητας (ψύξης), που επαναφέρει το εργαζόμενο μέσο στην αρχική κατάστασή ΤΟΥ

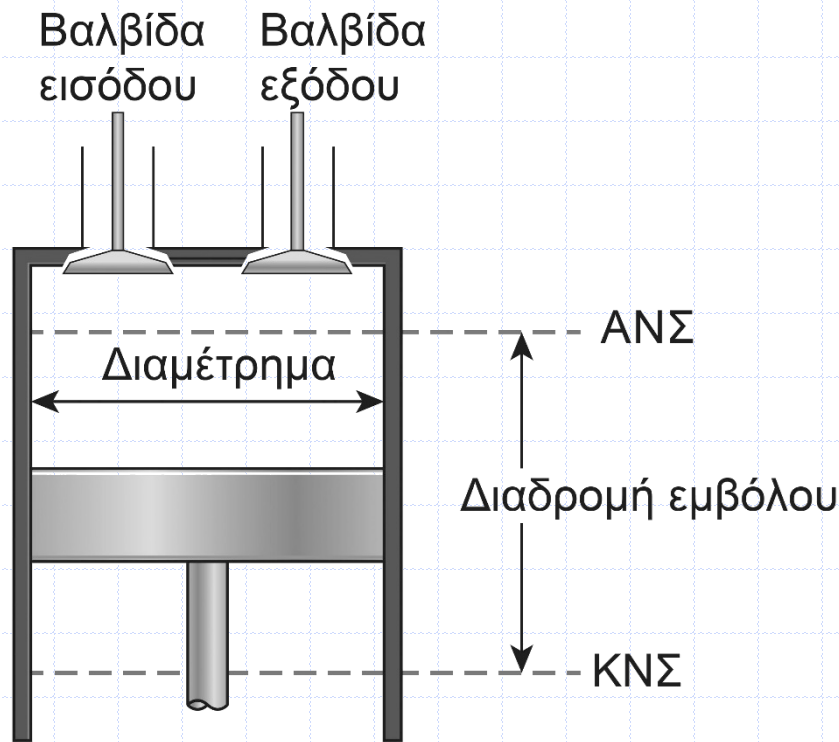
Παραδοχές πρότυπου κρύου αέρα: το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας σταθερών ειδικών θερμοτήτων, ίσων με εκείνες υπό θερμοκρασία δωματίου (25°C)

Κύκλος πρότυπου αέρα: είναι ένας κύκλος, στον οποίο μπορούν να εφαρμοστούν οι παραδοχές πρότυπου αέρα

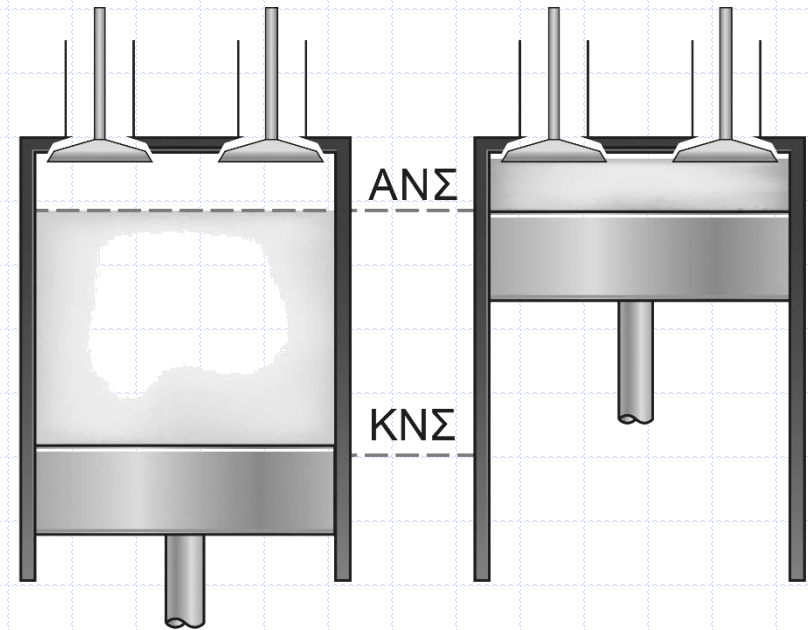


Επισκόπηση των παλινδρομικών μηχανών...

Λόγος συμπίεσης: $r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_{\text{BDC}}}{V_{\text{TDC}}}$



Μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα
Μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση



Όγκος εμβολιασμού και νεκρός όγκος



Ονοματολογία των παλινδρομικών μηχανών

Επισκόπηση των παλινδρομικών μηχανών...

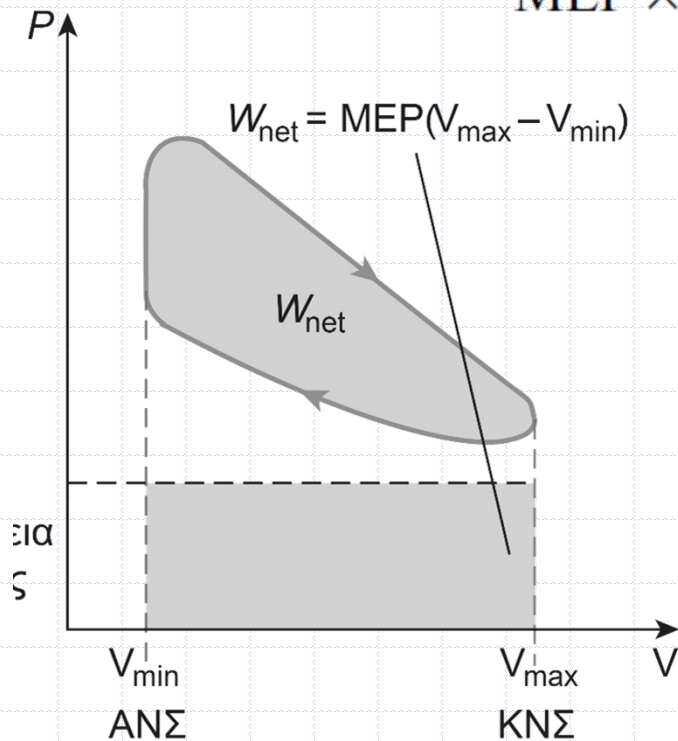
- Ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται συχνά στις εμβολοφόρες μηχανές είναι η "**μέση ενεργός πίεση**" (Mean Effective Pressure – MEP), η οποία υποτίθεται ότι είναι η σταθερή πίεση που εάν ενεργούσε πάνω στο έμβολο σε όλη την διάρκεια της διαδρομής θα παρήγαγε το ίδιο συνολικά έργο, με αυτό που παράγεται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

$$\text{MEP} = \frac{W_{\text{total}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} = \frac{W_{\text{total}}}{v_{\text{max}} - v_{\text{min}}}$$



Επισκόπηση των παλινδρομικών μηχανών...

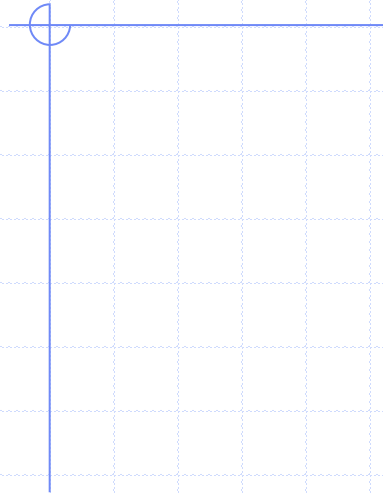
$$W_{\text{net}} = \text{MEP} \times (\text{Επιφάνεια εμβόλου}) \times (\text{Διαδρομή εμβόλου}) = \text{MEP} \times (\text{Όγκος εμβολισμού})$$



$$\text{MEP} = \frac{W_{\text{net}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} = \frac{w_{\text{net}}}{v_{\text{max}} - v_{\text{min}}}$$

Μέση ενεργός πίεση

- Η μέση ενεργός πίεση μπορεί να θεωρηθεί ως κριτήριο σύγκρισης της απόδοσης παλινδρομικών μηχανών του ίδιου μεγέθους.
- Η μηχανή με την υψηλότερη μέση ενεργό πίεση αποδίδει περισσότερο έργο ανά κύκλο, άρα λειτουργεί πιο αποδοτικά.

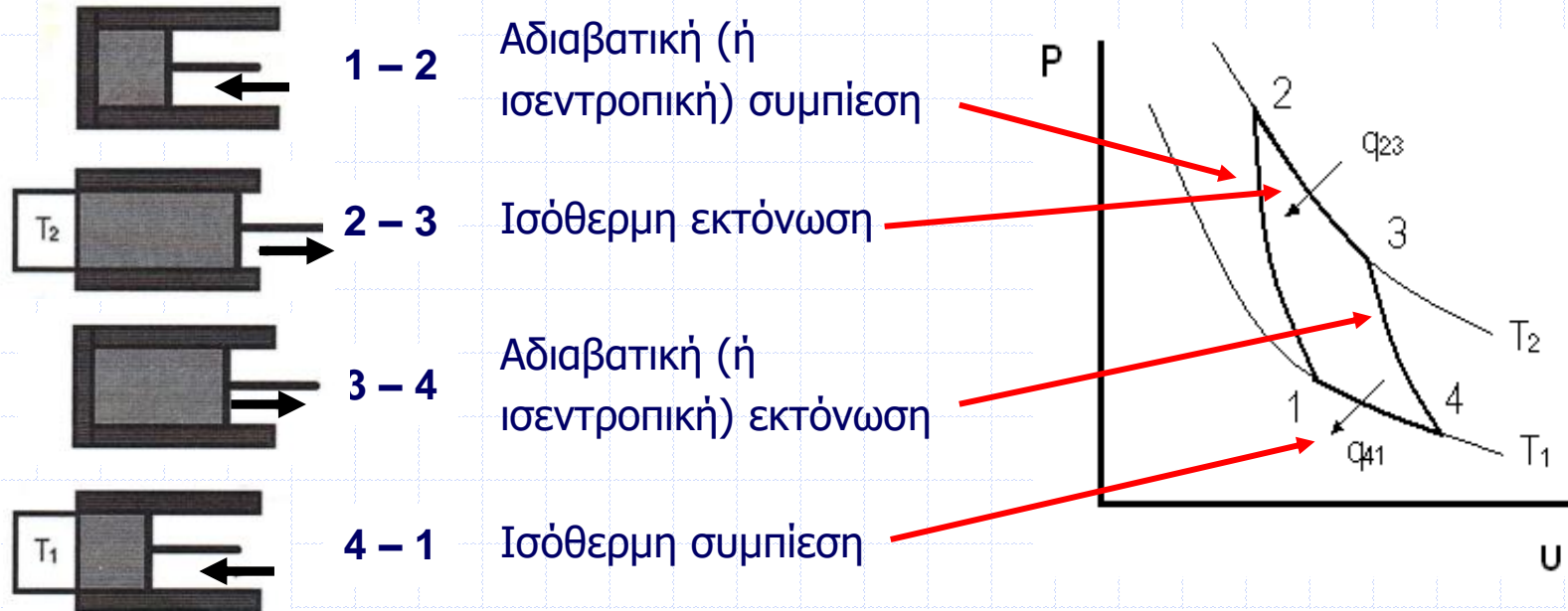


Κύκλος Carnot...



Κύκλος Carnot...

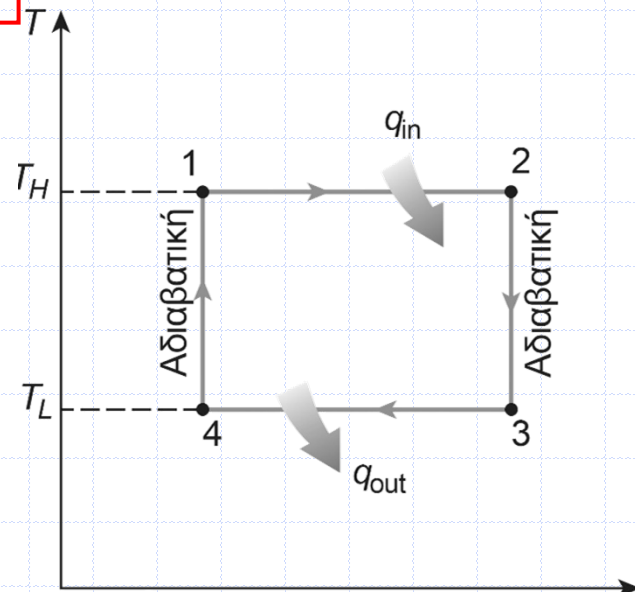
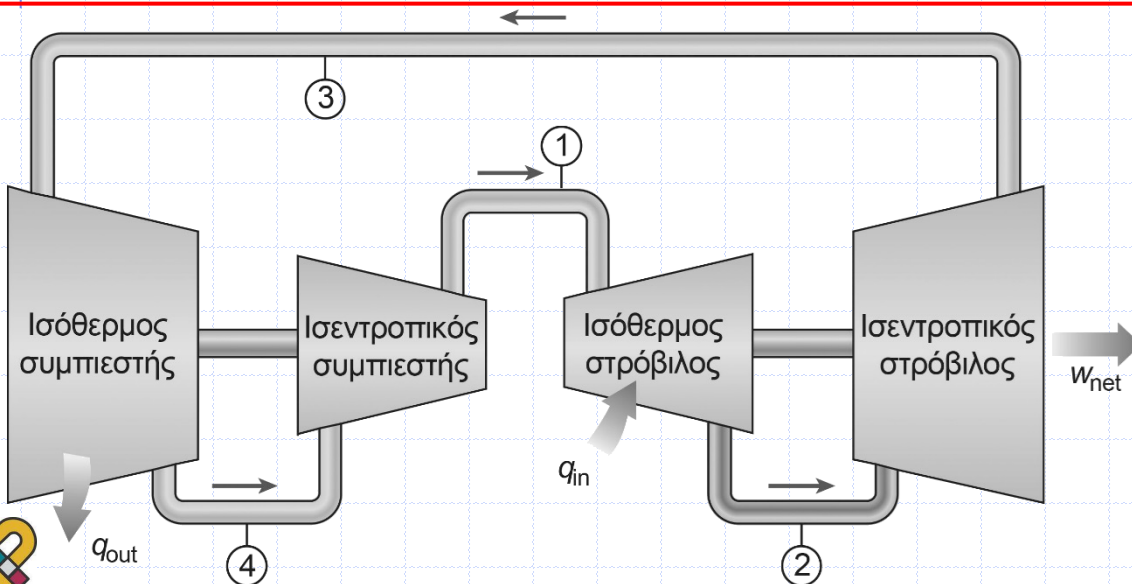
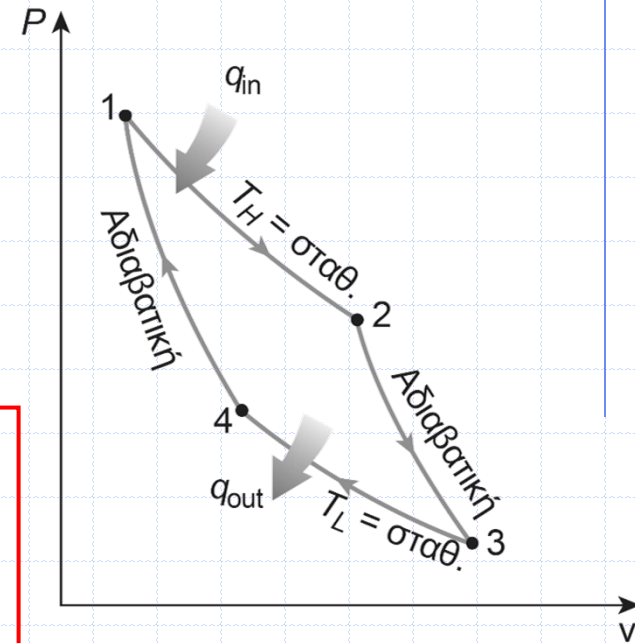
- Η μηχανή **Carnot** είναι μια ιδανική θερμική μηχανή που λειτουργεί σύμφωνα με τον ομώνυμο θερμοδυναμικό κύκλο, και αποτελείται από έναν κύλινδρο στον οποίο κινείται ένα έμβολο χωρίς τριβές
- Η παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου και το έμβολο αποτελούνται από υλικά αδιαπέραστα από την θερμότητα (αδιαβατικά), ενώ ο πυθμένας αποτελείται από υλικό ιδανικό αγωγό θερμότητας.
- Μέσα στον κύλινδρο βρίσκεται ιδανικό αέριο που μπορεί να έρχεται σε επαφή είτε με θερμοδοχείο, είτε με ψυχοδοχείο, είτε να είναι θερμικά μονωμένο



Κύκλος Carnot...

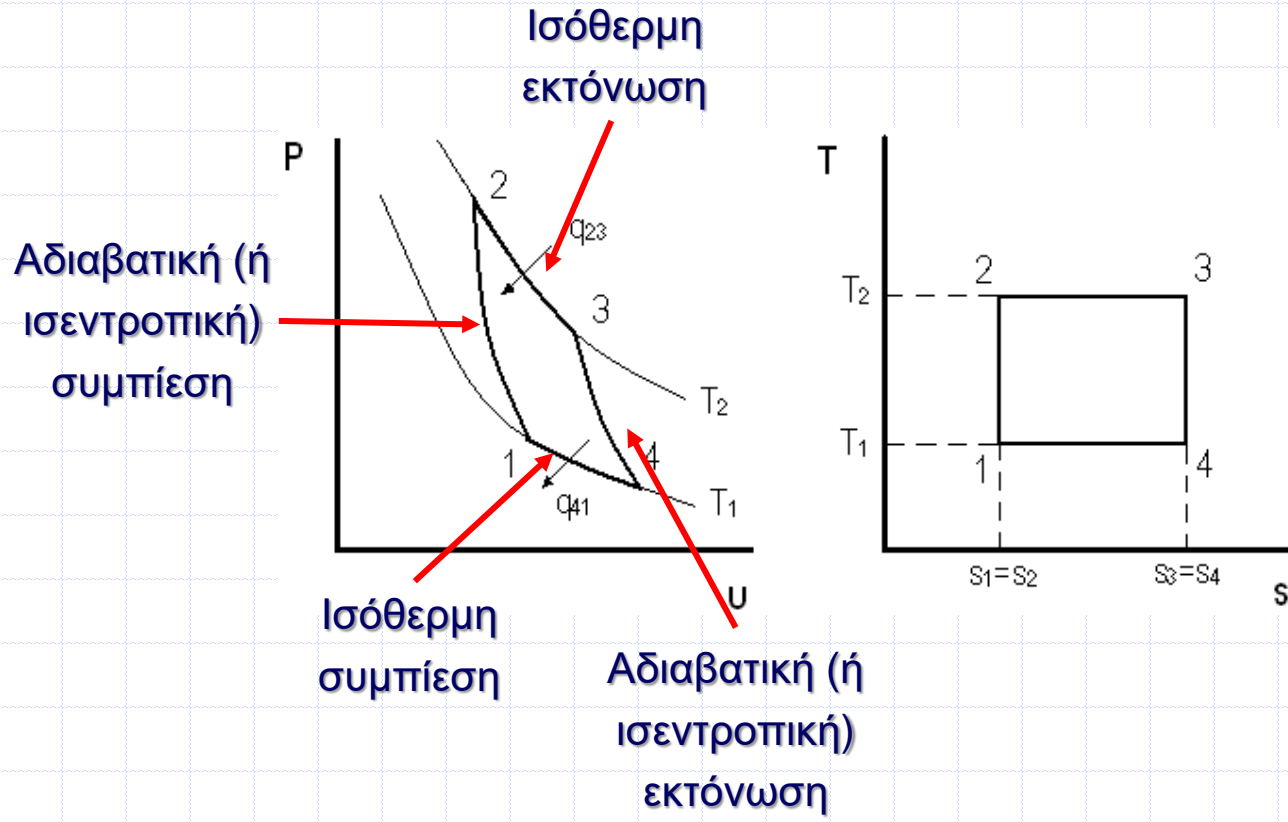
Ο κύκλος Carnot αποτελείται από τέσσερις πλήρως αντιστρεπτές διεργασίες: **ισοθερμοκρασιακή θέρμανση**, **ισεντροπική εκτόνωση**, **ισοθερμοκρασιακή ψύξη** και **ισεντροπική συμπίεση**

Σε ιδανικούς και πραγματικούς κύκλους: η θερμική απόδοση αυξάνεται αυξάνοντας τη μέση θερμοκρασία κατά την οποία προσδίδεται θερμότητα ή μειώνοντας τη μέση θερμοκρασία κατά την οποία απορρίπτεται θερμότητα



Μηχανή Carnot σταθεροποιημένης ροής

Κύκλος Carnot...



Κύκλος Carnot...

□ Αδιαβατική ή ισεντροπική συμπίεση

$$\left. \begin{aligned} q_{12} - w_{12} = du = 0 &\Rightarrow w_{12} = -du \\ du = c_v(T_2 - T_1) & \end{aligned} \right\} \Rightarrow w_{12} = -c_v(T_2 - T_1) < 0$$

□ Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση

$$\left. \begin{aligned} q_{23} - w_{23} = u_3 - u_2 = 0 &\Rightarrow w_{23} = q_{23} \\ w_{23} = RT \ln \frac{v_3}{v_2} & \end{aligned} \right\} \Rightarrow q_{23} = RT \ln \frac{v_3}{v_2} > 0$$

□ Αδιαβατική ή ισεντροπική εκτόνωση

$$w_{34} = du = -c_v(T_1 - T_2) > 0$$

□ Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση

$$w_{41} = q_{41} = RT \ln \frac{v_1}{v_4} < 0$$



Κύκλος Carnot...

- Το **συνολικό έργο** (ογκομεταβολής) είναι το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους έργων

$$W_{\text{total}} = UW = w_{12} + w_{23} + w_{34} + w_{41}$$

- Στις αδιαβατικές μεταβολές ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} T_1 V_1^k = T_2 V_2^k &\Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \\ T_2 V_3^k = T_1 V_4^k &\Rightarrow \frac{v_4}{v_3} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4} \Rightarrow \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_4}{v_1}$$

Επίσης είναι: $w_{12} = -w_{34}$

Τελικά: $W_{\text{total}} = UW = R(T_2 - T_1) \ln \frac{v_3}{v_2}$



Κύκλος Carnot...

- Στον κύκλο Carnot προσδίδεται θερμότητα στο σύστημα q_{23} και απομακρύνεται θερμότητα q_{41} , και επομένως, ο συντελεστής θερμικής απόδοσης είναι:

$$\eta_{th} = \frac{W_{total}}{q_{23}}$$

Τελικά: $\eta_{th} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

- Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Carnot εξαρτάται μόνο από τις θερμοκρασίες των δύο δεξαμενών, και είναι η μεγαλύτερη απόδοση που θεωρητικά μπορεί να επιτευχθεί από θερμική μηχανή, που λειτουργεί μεταξύ των θερμοκρασιών T_1 και T_2 , και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στους ιδανικούς, όσο και στους πραγματικούς κύκλους.
- Στην πράξη, είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί η αντιστρεπτή προσθήκη θερμότητας q_{23} ισοθερμοκρασιακά, καθώς θα απαιτούσε πολύ μεγάλους εναλλάκτες και πολύ μεγάλο χρόνο επαφής. Συνεπώς, δεν έχει πρακτική αξία η κατασκευή μιας μηχανής που προσεγγίζει τον κύκλο Carnot.



Κύκλος Carnot...

- ❑ Η πραγματική αξία του κύκλου Carnot έγκειται στο γεγονός ότι αποτελεί ένα πρότυπο με το οποίο συγκρίνονται οι πραγματικοί και ιδανικοί κύκλοι, ενώ ταυτόχρονα οριοθετεί την μέγιστη απόδοση θερμικής μηχανής που λειτουργεί μεταξύ δύο δεδομένων θερμοκρασιών.
- ❑ Η θερμική απόδοση αυξάνει με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας πρόσδοσης θερμότητας ή με την μείωση της μέσης θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας στο σύστημα, ή και με τα δύο ταυτόχρονα.
- ❑ Όμως, οι θερμοκρασίες του θερμοδοχείου και του ψυχοδοχείου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πράξη περιορίζονται, η μεν υψηλή από την μέγιστη θερμοκρασία που μπορούν να αντέξουν τα υλικά κατασκευής της μηχανής, ενώ η χαμηλότερη από την θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου



Κύκλος Carnot...

- Θεωρούνται δύο μηχανές Carnot που λαμβάνουν το ίδιο ποσό θερμότητας Q από δύο θερμοδοχεία θερμοκρασιών T_1 και T'_1 αντίστοιχα, με $T_1 > T'_1$, ενώ αποβάλλουν θερμότητα σε ψυχροδοχεία της ίδιας θερμοκρασίας T_2

Η πρώτη μηχανή έχει απόδοση: $\eta_{th1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ και $T_1 > T'_1$

Η δεύτερη μηχανή έχει απόδοση: $\eta_{th2} = 1 - \frac{T_2}{T'_1}$

οπότε $\eta_{th1} > \eta_{th2}$

- Επομένως, το ίδιο ποσό θερμότητας Q που αποδίδεται σε μια θερμική μηχανή από θερμοδοχεία διαφορετικής θερμοκρασίας, έχουν διαφορετική ικανότητα παραγωγής έργου
- Μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής έργου έχει το ποσό θερμότητας που προέρχεται από το θερμοδοχείο υψηλότερης θερμοκρασίας



Κύκλος Carnot...

- Η εντροπία συνδέεται άμεσα με το ενεργειακό περιεχόμενο ενός θερμοδυναμικού συστήματος, συγκεκριμένα, η δεξαμενή με θερμοκρασία T_1 , μεταβάλλει την εντροπία της κατά:

$$\Delta S_1 = \frac{|Q|}{T_1}$$

- και η δεξαμενή με θερμοκρασία T'_1 , μεταβάλλει την εντροπία της κατά:

$$\Delta S_2 = \frac{|Q|}{T'_1}$$

- Δηλαδή, η θερμότητα $|Q|$ στην πρώτη μηχανή βρισκόταν σε μικρότερη εντροπία $|Q|/T_1$, ενώ στην δεύτερη μηχανή σε μεγαλύτερη εντροπία $|Q|/T'_1$
- Επομένως, όσο μεγαλύτερη τάξη έχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα (μικρότερη εντροπία) όσο μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής μηχανικού έργου έχει. Επομένως, όλα τα συστήματα τείνουν να αυξήσουν την αταξία τους (άρα και την εντροπία τους), και υποβαθμίζουν το ενεργειακό τους περιεχόμενο



Κύκλος Carnot...

- Το αέριο που εκτελεί κύκλο Carnot απορροφά θερμότητα $|Q_1|$ κατά την ισόθερμη εκτόνωση από ένα θερμοδοχείο T_1 και αποδίδει θερμότητα $|Q_2|$ σε ψυχοδοχείο T_2 κατά την ισόθερμη συμπίεση. Επειδή, όλες οι μεταβολές είναι αντιστρεπτές, από το 2^ο Θερμοδυναμικό αξίωμα είναι:

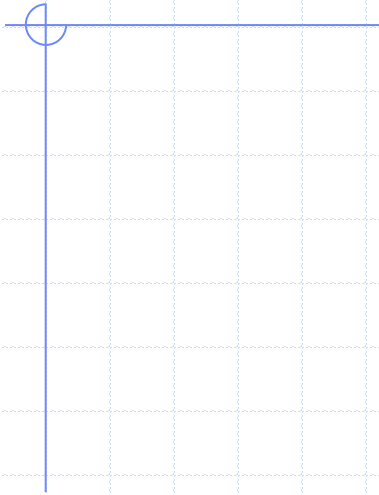
$$\Delta S_{\text{total}} = 0$$

- Επιπλέον ισχύει: $\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_{\text{system}}$
όπου $\Delta S_1, \Delta S_2$ οι μεταβολές εντροπίας των θερμοδοχείων
 ΔS_{system} η μεταβολή εντροπίας του συστήματος
- Σε έναν κύκλο Carnot ισχύει:

$$\Delta S_1 = -\frac{|Q_1|}{T_1} \quad \text{και} \quad \Delta S_2 = +\frac{|Q_2|}{T_2} \quad \text{και} \quad \Delta S_{\text{system}} = 0$$

$$0 = -\frac{|Q_1|}{T_1} + \frac{|Q_2|}{T_2} \Rightarrow \frac{|Q_1|}{T_1} = \frac{|Q_2|}{T_2}$$



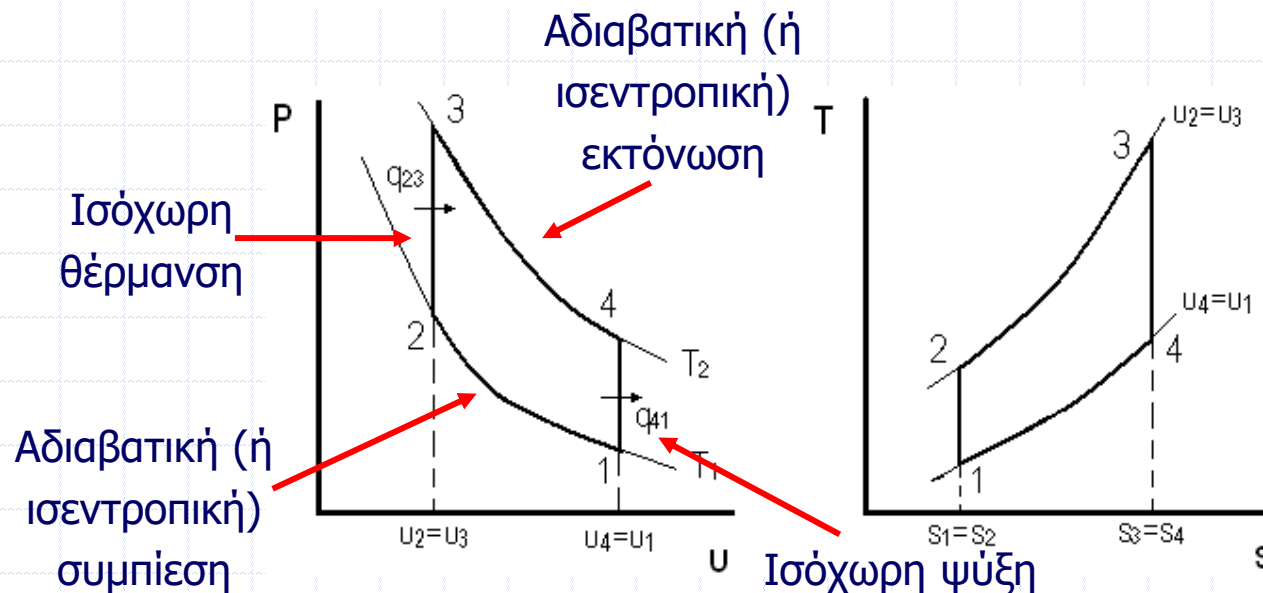


Κύκλος Otto...



Κύκλος Otto...

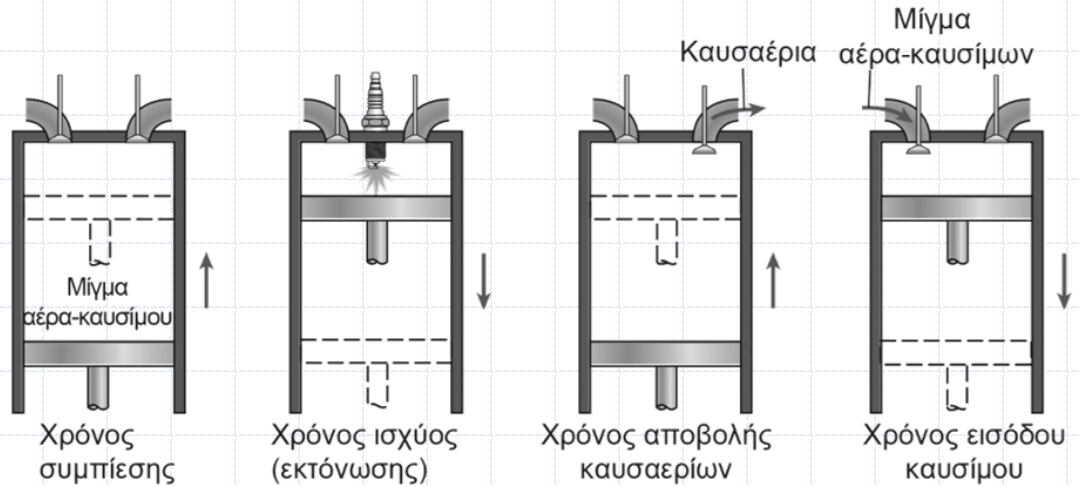
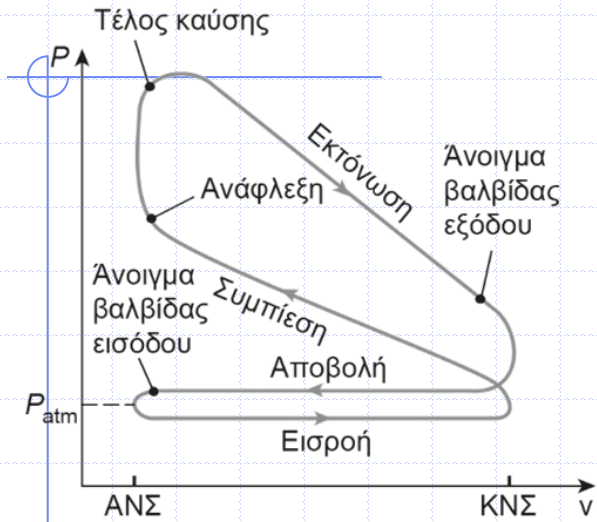
- Στον ιδανικό κύκλο Otto στηρίζουν την λειτουργία τους οι βενζινοκινητήρες (gasoline ή petrol engines), και πραγματοποιείται σε μια αδιαβατική διάταξη κυλίνδρου – εμβόλου που διαθέτει μια βαλβίδα εισαγωγής και μια εξαγωγής, καθώς και έναν αναφλεκτήρα (μπουζί, spark), και παρουσιάζεται στο σχήμα



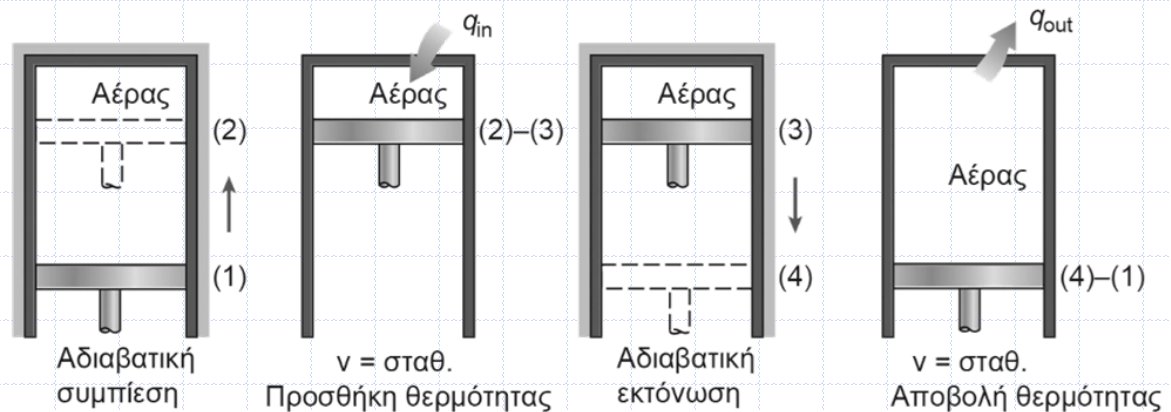
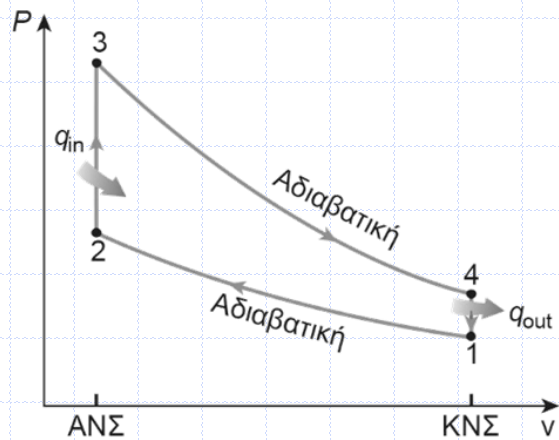
Ορίζεται ως "**λόγος συμπίεσης**" (compression ratio, r) ο λόγος των όγκων (και όχι πιέσεων):

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Κύκλος Otto...



(α) Πραγματικός τετράχρονος κινητήρας ανάφλεξης



(β) Ιδανικός κύκλος Otto

Πραγματικός (α) & ιδανικός (β) κύκλοι των μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα και τα αντίστοιχα διαγράμματα $P-v$

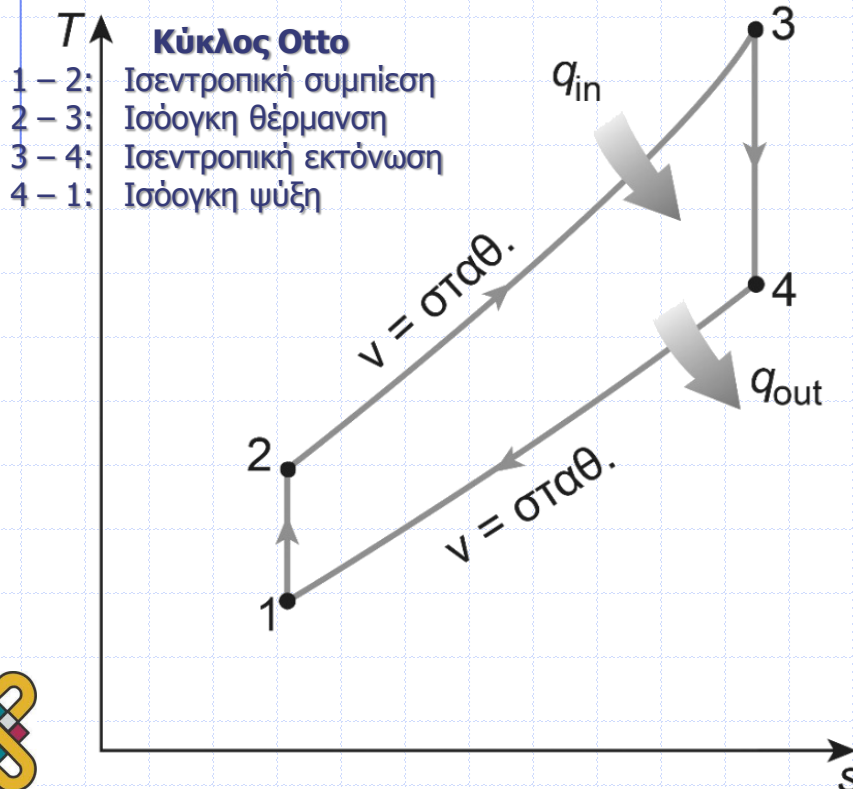
Κύκλος Otto...

Τετράχρονη μηχανή

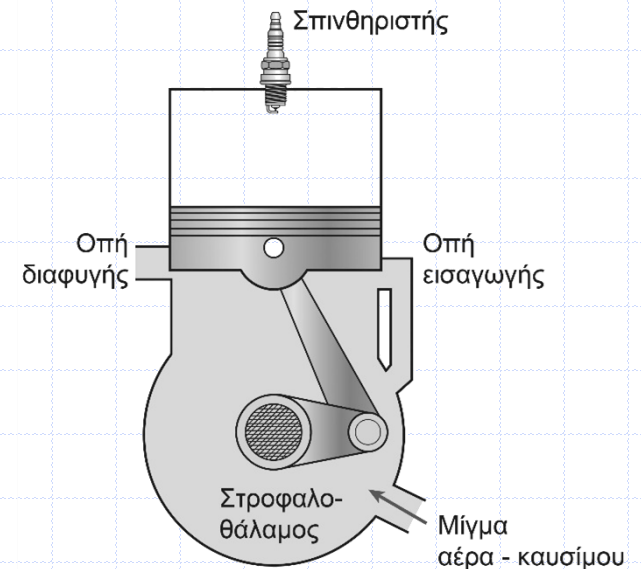
1 κύκλος = 4 διαδρομές = 2 στροφές

Δίχρονη μηχανή

1 κύκλος = 2 διαδρομές = 1 στροφή

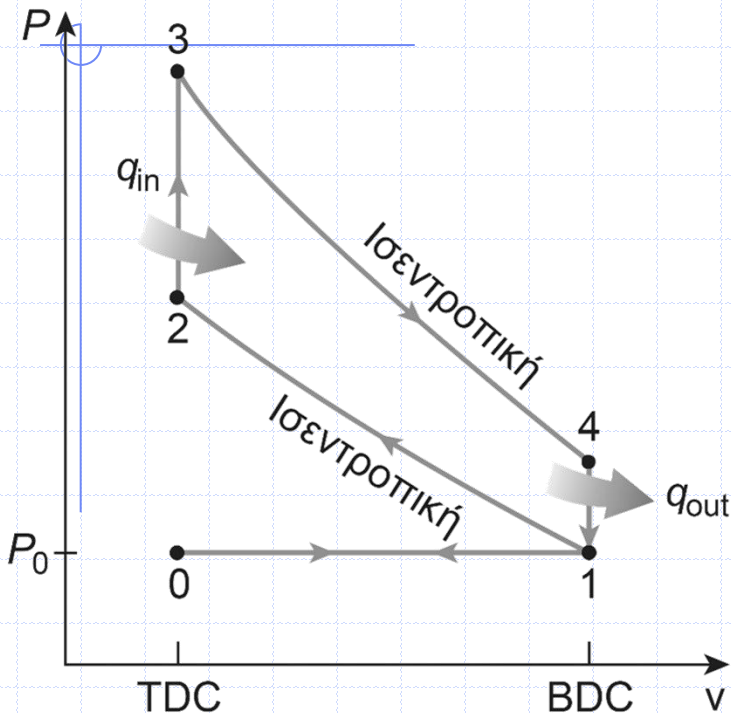


Οι δίχρονες μηχανές είναι γενικά λιγότερο αποδοτικές από τις τετράχρονες, αλλά είναι κατασκευαστικά απλούστερες και παρουσιάζουν υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος



Σκαρίφημα δίχρονης παλινδρομικής μηχανής

Κύκλος Otto...



Διάγραμμα $P-v$ του ιδανικού κύκλου Otto, με επισήμανση των διεργασιών εισαγωγής και εξαγωγής.

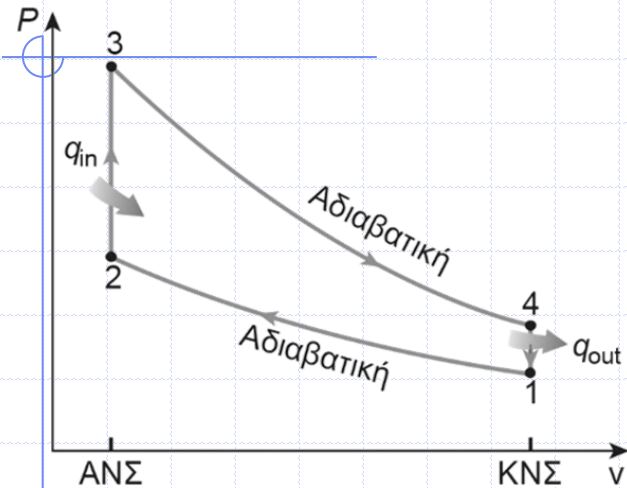
$$W_{\text{out},0-1} = P_0(v_1 - v_0)$$

$$W_{\text{in},1-0} = P_0(v_1 - v_0)$$

- ❑ Ο αέρας εισέρχεται στον κύλινδρο μέσω της ανοιχτής βαλβίδας εισαγωγής υπό ατμοσφαιρική πίεση P_0 (διεργασία 0-1), καθώς το έμβολο κινείται από το άνω νεκρό σημείο (TDC) προς το κάτω νεκρό σημείο (BDC)
- ❑ Η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει στην κατάσταση 1 κι ο αέρας συμπιέζεται ισεντροπικά ως την κατάσταση 2. Η θερμότητα προσδίδεται ισόογκα (διεργασία 2-3). Ακολουθεί η ισεντροπική εκτόνωση ως την κατάσταση 4 και η ισόογκη απόρριψη θερμότητας (ψύξη), που αντιστοιχεί στη διεργασία 4-1
- ❑ Ο αέρας εξωθείται μέσω της ανοιχτής βαλβίδας εξαγωγής (διεργασία 1-0)
- ❑ Οι συναλλαγές έργου κατά την εισαγωγή και την εξαγωγή του αέρα αλληλοαναιρούνται, άρα η συμπερίληψή τους στον υπολογισμό του καθαρού παραγόμενου έργου θα ήταν άνευ σημασίας.
- ❑ Ωστόσο, κατά τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος από έναν ιδανικό κύκλο Otto, θα πρέπει να θυμόμαστε ότι ο ιδανικός κύκλος Otto έχει τέσσερις «χρόνους», ακριβώς όπως μια πραγματική τετράχρονη μηχανή ανάφλεξης με σπινθήρα



Κύκλος Otto...



$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{exit} - h_{inlet}$$

$$q_{in} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2)$$

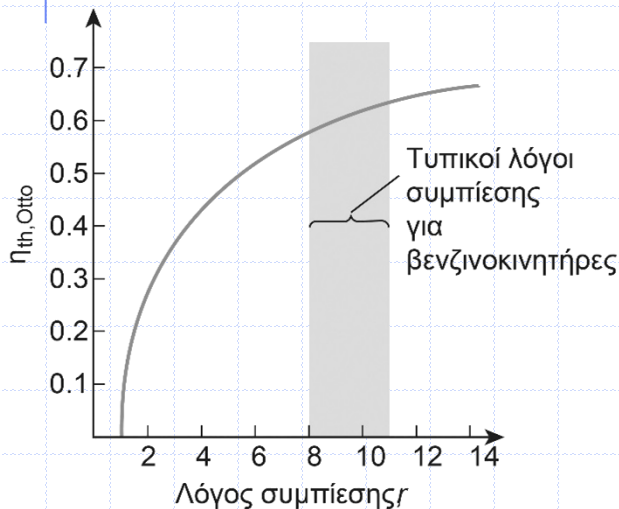
$$q_{out} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$$

$$\eta_{th,Otto} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

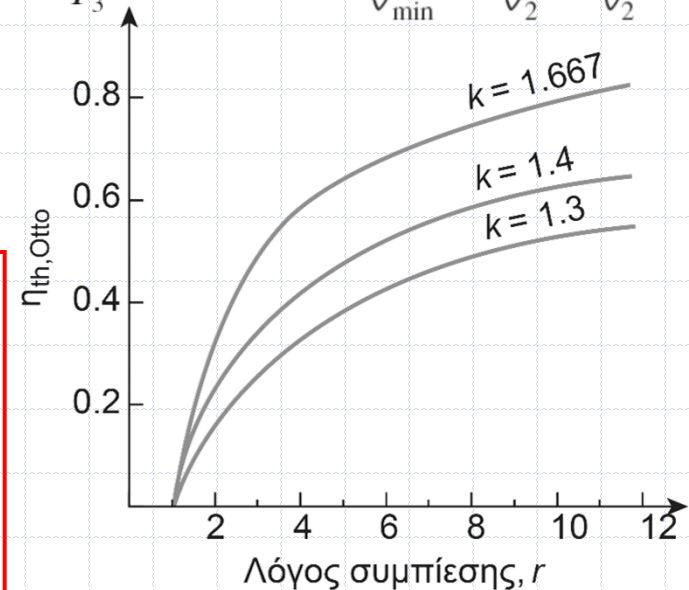
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\eta_{th,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$



Στις μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα, ο λόγος συμπίεσης περιορίζεται από την αυτανάφλεξη ή κρότο της μηχανής



Η θερμική απόδοση του κύκλου Otto αυξάνεται με την αύξηση του λόγου k του εργαζομένου μέσου. **31**



Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Otto αυξάνεται με το λόγο συμπίεσης.

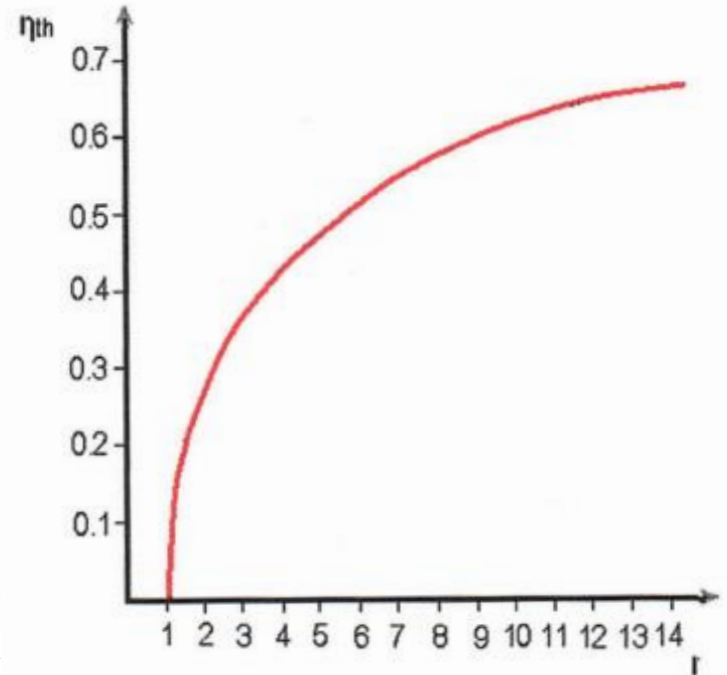
Κύκλος Otto...

Απόδοση κύκλου Otto

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

- Από την ανωτέρω σχέση γίνεται φανερό ότι η απόδοση του θεωρητικού λόγου Otto εξαρτάται από δύο μεγέθη, τον λόγο συμπίεσης r και τον λόγο k των ειδικών θερμοτήτων. Συγκεκριμένα:

1. Όσο αυξάνεται ο λόγος συμπίεσης r τόσο αυξάνεται η απόδοση για σταθερό k . Η αύξηση είναι πιο έντονη σε μικρούς λόγους r , ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει άνω όριο στον λόγο r εξαιτίας της εμφάνισης φαινομένων αυτανάφλεξης (πρόωρη ανάφλεξη μίγματος)
2. Όσο αυξάνεται ο λόγος k τόσο αυξάνεται η απόδοση, για δεδομένο λόγο r

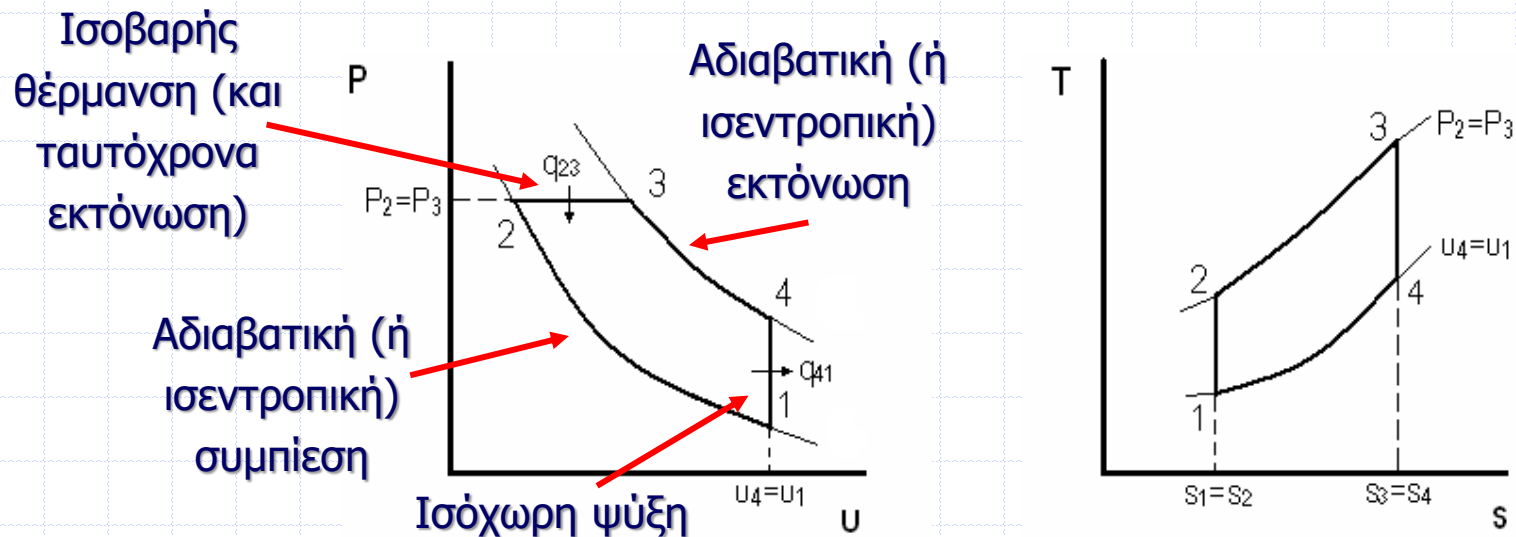


Κύκλος Diesel...



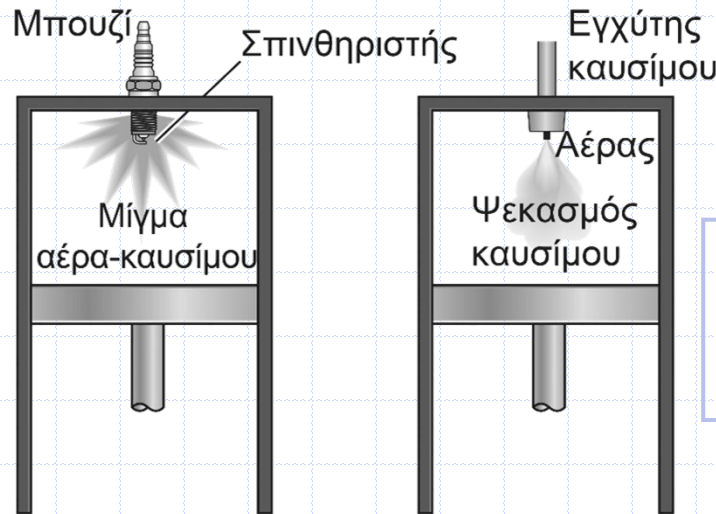
Κύκλος Diesel...

- ❑ Στον ιδανικό κύκλο Diesel 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.
- ❑ 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 θεωρητικός θερμοδυναμικός κύκλος Diesel φαίνεται στο σχήμα:



Κύκλος Diesel...

- ❑ Στις μηχανές Diesel, κατά τη συμπίεση συμπιέζεται μόνο αέρας, εξαλείφοντας το ενδεχόμενο της αυτανάφλεξης
- ❑ Συνεπώς, οι μηχανές αυτές μπορούν να σχεδιαστούν για λειτουργία σε υψηλότερους λόγους πίεσης σε σχέση με τις μηχανές ανάφλεξης με σπινθηριστή (συνήθως, 12 – 24)

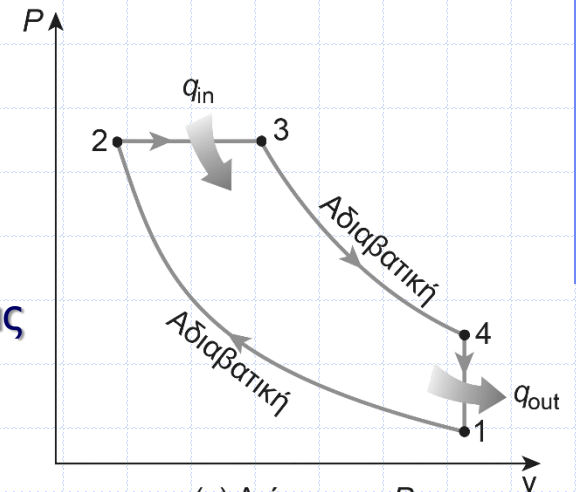


Βενζινοκινητήρας

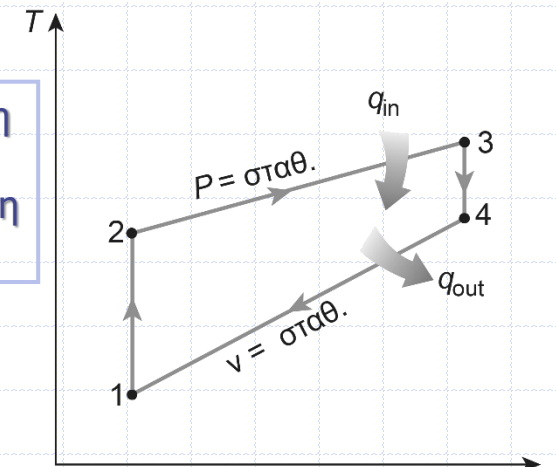
Κινητήρας Diesel

Στους κινητήρες Diesel, ο σπινθηριστής αντικαθίσταται από έναν εγχυτήρα καυσίμου. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, συμπιέζεται μόνο αέρας

- 1-2** ισεντροπική συμπίεση
- 2-3** ισόθλιπτη θέρμανση
- 3-4** ισεντροπική εκτόνωση
- 4-1** ισόογκη ψύξη



(α) Διάγραμμα P-v



(β) Διάγραμμα T-s

Ιδανικός κύκλος Diesel



Κύκλος Diesel...

$$q_{in} - w_{b,out} = u_3 - u_2 \rightarrow q_{in} = P_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2)$$

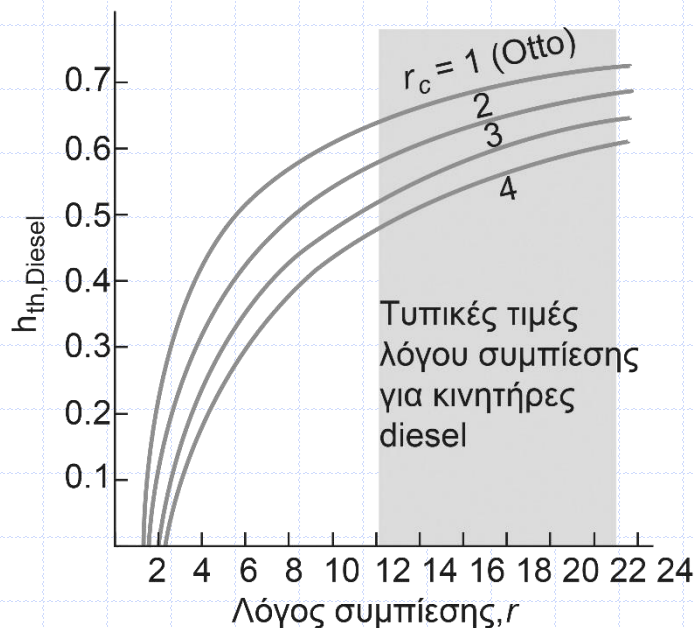
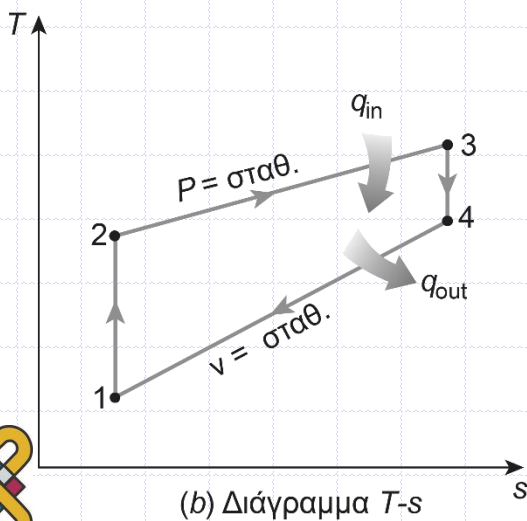
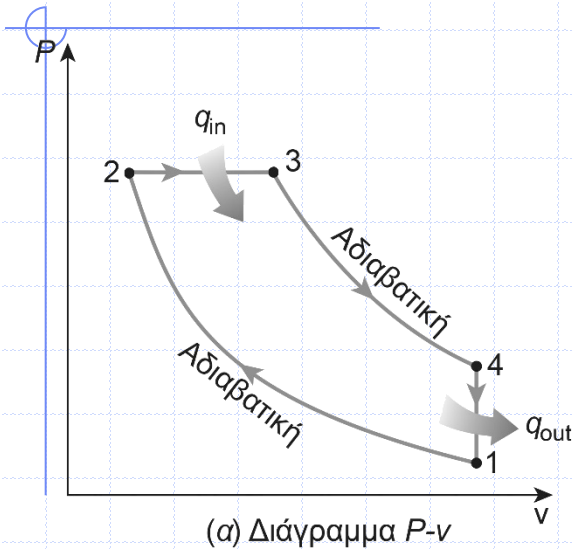
$$= h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$-q_{out} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{out} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$$

$$\eta_{th,Diesel} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)}$$

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_3}{V_2} \quad \text{Λόγος αποκοπής} \quad \eta_{th,Diesel} = 1 - \frac{1}{r_c^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

$\eta_{th,Otto} > \eta_{th,Diesel}$ Για τον ίδιο λόγο συμπίεσης



Θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου Diesel συναρτήσει των λόγων συμπίεσης και αποκοπής ($k=1.4$)

Κύκλος Diesel...

Απόδοση κύκλου Diesel

$$n_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)}$$

Ορίζεται ο λόγος ανακοπής (cut off, r_c) ως ο λόγος όγκων (και όχι πιέσεων)

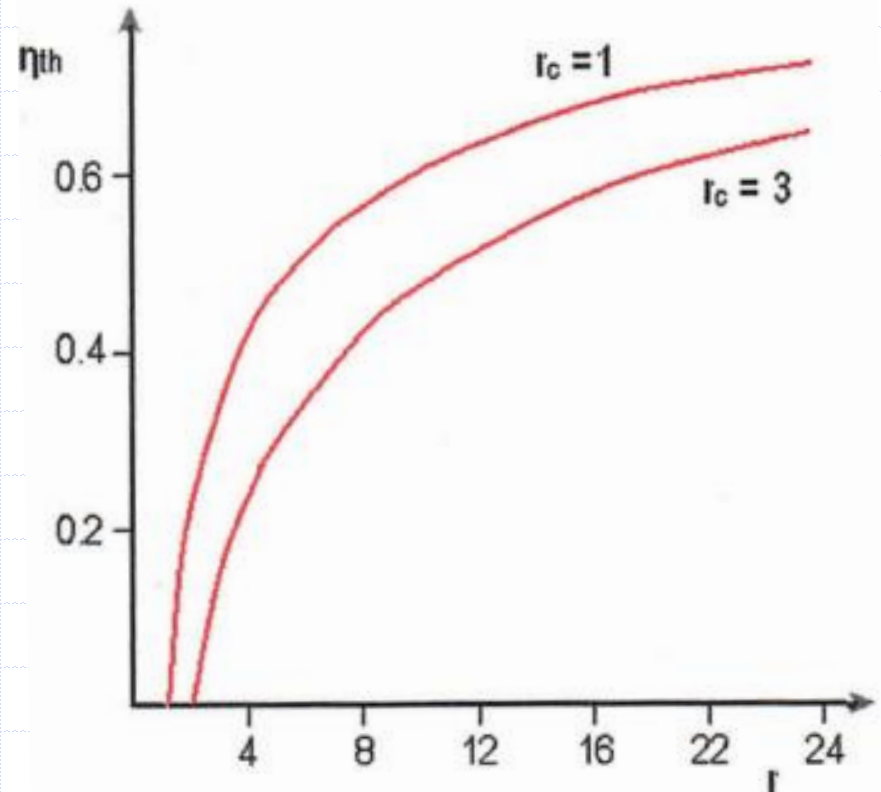
$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$$

και

$$r_c = \frac{T_3}{T_2}$$

οπότε

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



Κύκλος Diesel...

- ❑ Συγκρίνοντας τις σχέσεις:

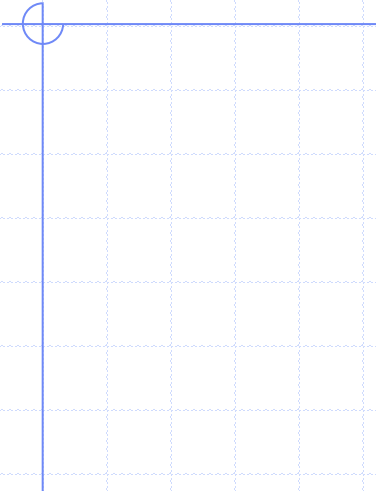
$$n_{th} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad n_{th} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

- ❑ Παρατηρείται ότι διαφέρουν κατά τον όρο που βρίσκεται μέσα στην αγκύλη, που είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας, και επομένως, για τον ίδιο λόγο συμπίεσης r , ισχύει πάντα:

$$n_{th, Otto} > n_{th, Diesel}$$

- ❑ Παρατηρείται επίσης ότι όσο αυξάνει ο λόγος αποκοπής r_c τόσο μειώνεται η απόδοση του κύκλου Diesel και μάλιστα όταν $r_c = 1$ η ποσότητα εντός των αγκυλών γίνεται ίση με την μονάδα, οπότε οι αποδόσεις των δύο κύκλων γίνονται ίσες.
- ❑ Στην μηχανή Diesel, προκειμένου να υπάρξει αυτανάφλεξη, ο λόγος συμπίεσης πρέπει να είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν του Otto.
- ❑ Επιπλέον, οι μηχανές Diesel λειτουργούν με λιγότερες στροφές ανά λεπτό (rpm), οπότε δίνεται περισσότερος χρόνος ώστε η καύση να είναι πληρέστερη, και να γίνει μεγαλύτερη εκμετάλλευση της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου, με αποτέλεσμα οι μηχανές Diesel να έχουν μεγαλύτερη θερμική απόδοση

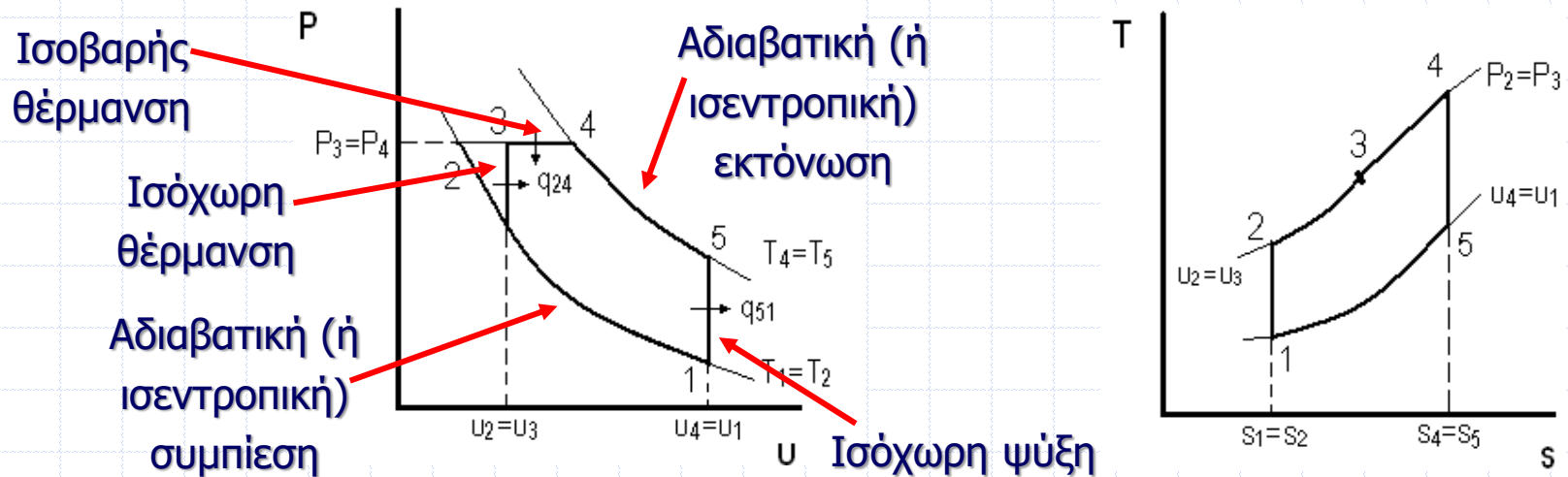




Μικτός κύκλος (Diesotto)...

Μικτός κύκλος (Diesotto)...

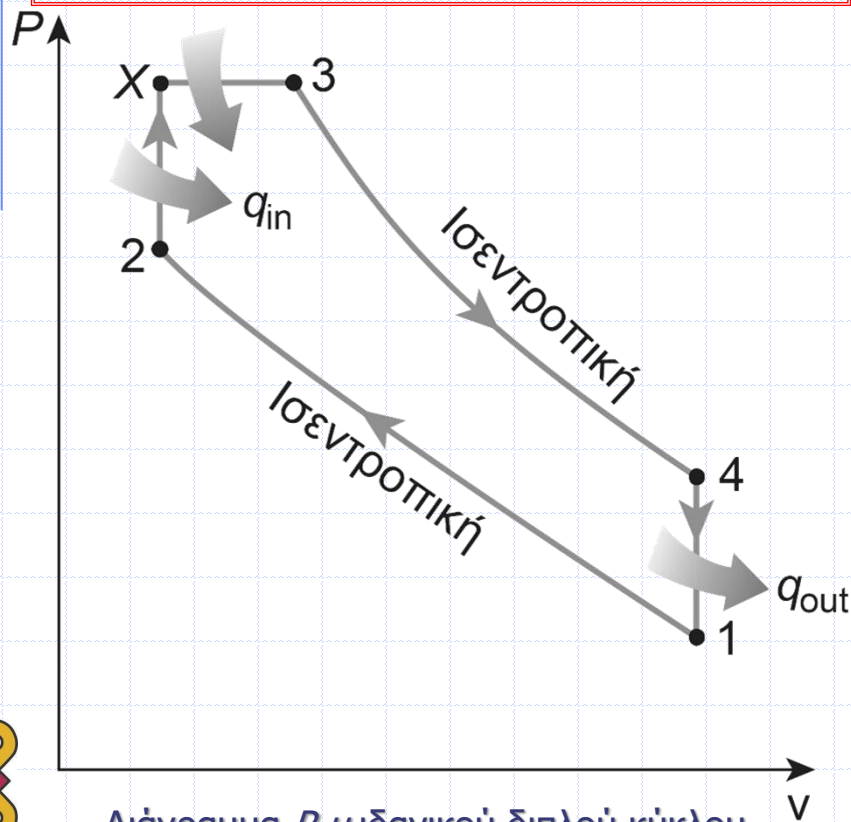
- Στην πράξη, όλοι οι σύγχρονοι κινητήρες Otto και Diesel δεν λειτουργούν ακριβώς σύμφωνα με τους ιδανικούς κύκλους
- Ειδικότερα η καύση δεν γίνεται ποτέ αποκλειστικά με σταθερό όγκο ή πίεση, αλλά κατά ένα ποσοστό με σταθερό όγκο και το υπόλοιπο με σταθερή πίεση



- Ο πραγματικός κύκλος λειτουργίας των μηχανών Otto και Diesel προσεγγίζεται καλύτερα θεωρώντας τον ιδανικό κύκλο του σχήματος, όπου η προσθήκη θερμότητας γίνεται και ισόχωρα (2 – 3) και ισοβαρώς (3 – 4)
- Όταν η μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας προσδίδεται ισόχωρα, ο κύκλος προσομοιάζει με τον ιδανικό κύκλο Otto, ενώ όταν προσδίδεται ισοβαρώς, προς τον ιδανικό κύκλο Diesel

Μικτός κύκλος (Diesotto) ...

Διπλός κύκλος: είναι ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο ιδανικού κύκλου για τους σύγχρονους κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση



- ❑ Στους σύγχρονους ταχύστροφους κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση, το καύσιμο εγχύεται στο θάλαμο καύσης πολύ νωρίτερα σε σχέση με τις πρώιμες μηχανές Diesel
- ❑ Το καύσιμο αρχίζει να αναφλέγεται κατά τα τελευταία στάδια της συμπίεσης, συνεπώς μέρος της καύσης διεξάγεται υπό σταθερό όγκο
- ❑ Η έγχυση του καυσίμου συνεχίζεται μέχρι το καύσιμο να αγγίξει το ΑΝΣ κι η καύση του καυσίμου διατηρεί την πίεση σε υψηλά επίπεδα
- ❑ Δηλαδή, η όλη διεργασία της καύσης μοντελοποιείται καλύτερα ως ο συνδυασμός μιας ισόογκης και μιας ισόθλιπτης διεργασίας

Μικτός κύκλος (Diesotto) ...

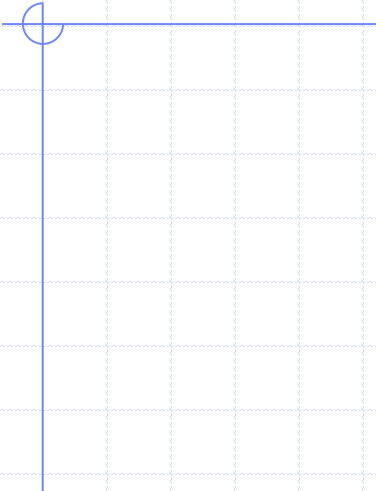
Απόδοση κύκλου Diesotto

$$\eta_{th} = \frac{W_{total}}{q_{23} + q_{34}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{q_{23} + q_{34} + q_{51}}{q_{23} + q_{34}}$$

Ο λόγος συμπίεσης (r) στην περίπτωση του μικτού κύκλου ορίζεται ως:

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

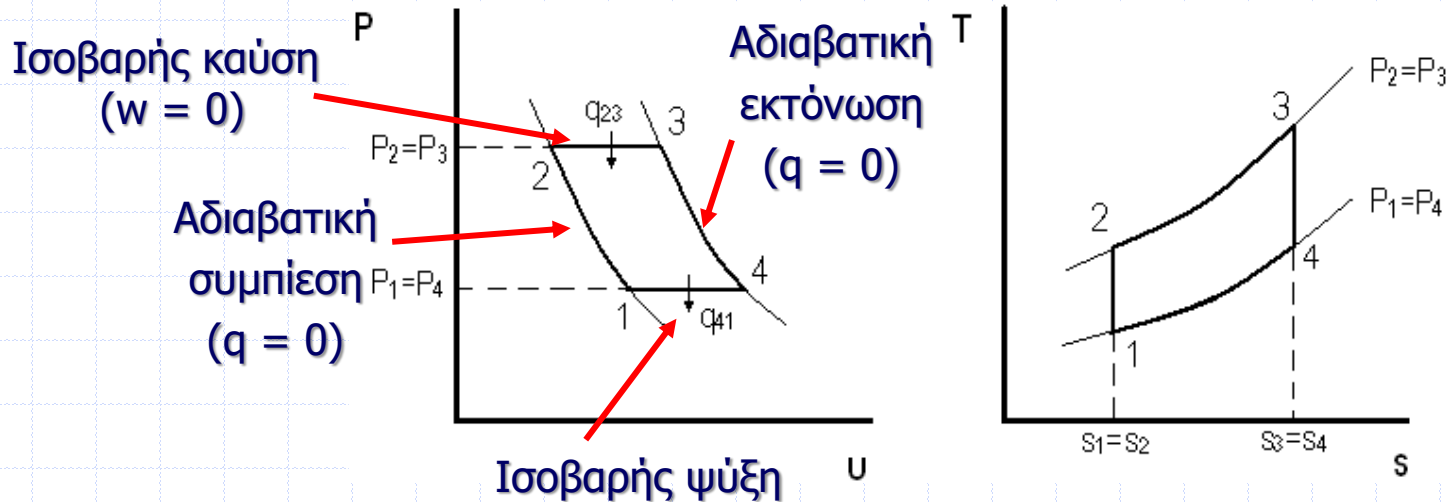




Κύκλος Brayton – Joule...

Κύκλος Brayton – Joule...

- Ο θεωρητικός απλός κύκλος λειτουργίας των αεριοστροβίλων (gas turbines) ή κύκλος Brayton ή Joule, φαίνεται στο σχήμα:



- Η γραμμή 4 – 1, που παριστάνει την ισοβαρή ψύξη των καυσαερίων, θα έπρεπε να είναι διακεκομμένη για την περίπτωση του ανοικτού κύκλου, καθώς η συνεχής γραμμή υποδηλώνει ότι η ίδια μάζα αέρα επανεισέρχεται στον κύκλο από την εισαγωγή (σημείο 1), πράγμα που ισχύει μόνο στον κλειστό κύκλο. Όμως για λόγους ευκολίας τόσο στον ανοιχτό, όσο και στον κλειστό κύκλο η μεταβολή 4 – 1 σχεδιάζεται με συνεχόμενη γραμμή



Κύκλος Brayton – Joule...

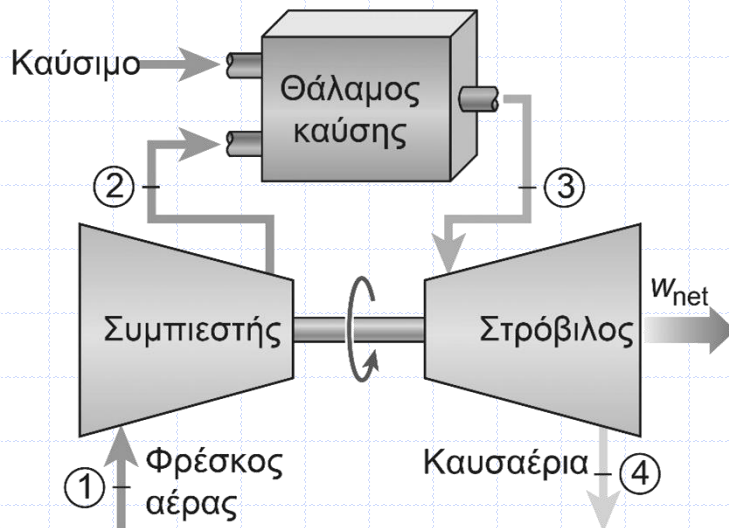
Η διεργασία της καύσης αντικαθίσταται από μια διεργασία ισόθλιπτης θέρμανσης από μια εξωτερική πηγή κι η διεργασία της εξαγωγής των καυσαερίων από μια διεργασία ισόθλιπτης απόρριψης θερμότητας στον αέρα περιβάλλοντος.

1-2 Ισεντροπική συμπίεση (σε έναν συμπιεστή)

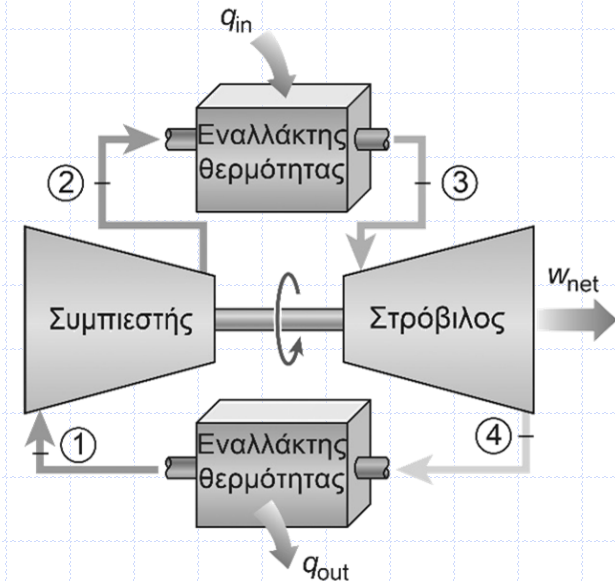
2-3 Ισόθλιπτη θέρμανση

3-4 Ισεντροπική εκτόνωση (σε ένα στρόβιλο)

4-1 Ισόθλιπτη ψύξη



Ανοιχτός κύκλος Brayton



Κλειστός κύκλος Brayton

Κύκλος Brayton – Joule...

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{exit} - h_{inlet}$$

$$q_{in} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

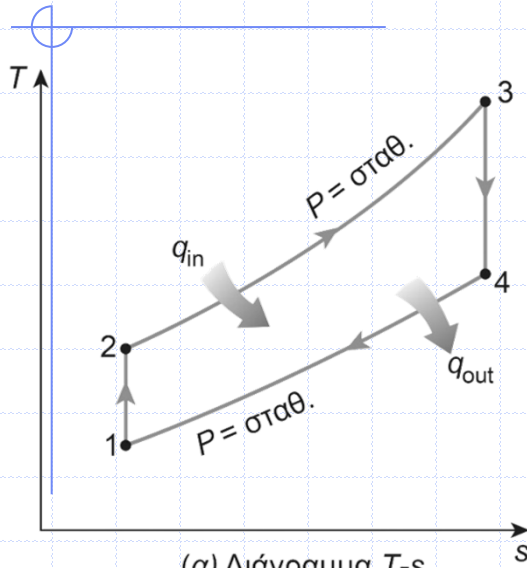
$$q_{out} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$

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

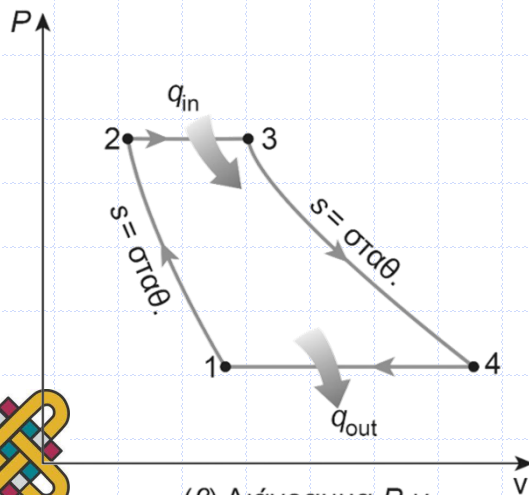
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Λόγος συμπίεσεως}$$

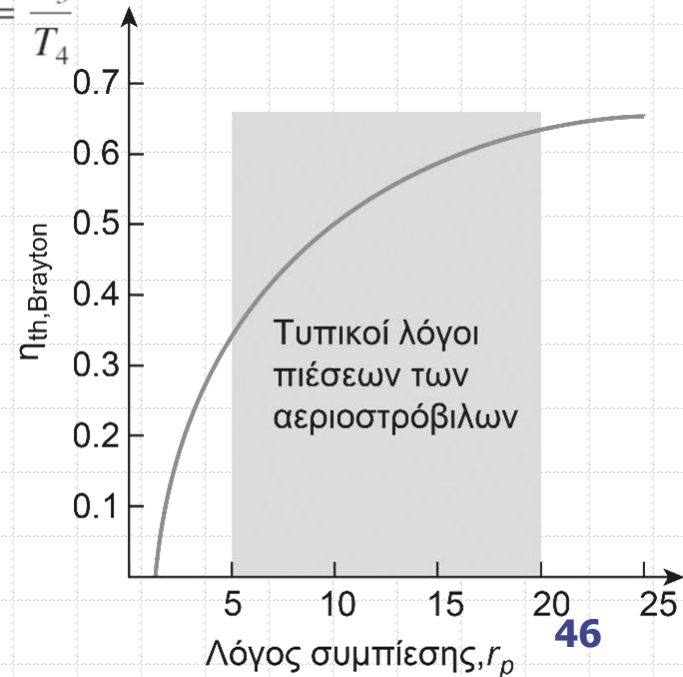
$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$



(α) Διάγραμμα T-s



(β) Διάγραμμα P-v



Κύκλος Brayton – Joule...

Ωφέλιμο έργο (useful work)

$$UW = c_p [T_3 - T_1 R_C^{(k-1)/k}] [1 - R_C^{-(k-1)/k}]$$

όπου $R_C = P_2/P_1$ είναι ο λόγος πιέσεων

Ο συντελεστής θερμικής απόδοσης του κύκλου, n_{th} είναι:

$$n_{th} = 1 - \frac{1}{R_C^{(k-1)/k}} \Rightarrow n_{th} = 1 - \left(\frac{1}{R_C}\right)^{(k-1)/k}$$

Αδιαβατική συμπίεση ($q = 0$)

Έργο συμπίεσης
(compression work)

$$CW = -c_p(T_2 - T_1) \Rightarrow CW = -c_p T_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \text{ (J/kg)}$$



Κύκλος Brayton – Joule...

Ισοβαρής καύση ($w = 0$)

Προσδιδόμενη θερμότητα

$$HI = c_p \cdot (T_3 - T_2)$$

Αδιαβατική εκτόνωση ($q = 0$)

Έργο εκτόνωσης $EW = c_p \cdot (T_3 - T_4) \Rightarrow EW = c_p \cdot T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right)$ (J/kg)

Το **ωφέλιμο έργο** (Useful Work, UW) που στην πραγματικότητα είναι η ωφέλιμη ισχύς, είναι:

$$UW = c_p \left[T_3 - T_1 R_C^{(k-1)/k} \right] \left[1 - R_C^{-(k-1)/k} \right]$$

όπου $R_C = P_2/P_1$ είναι ο λόγος πιέσεων



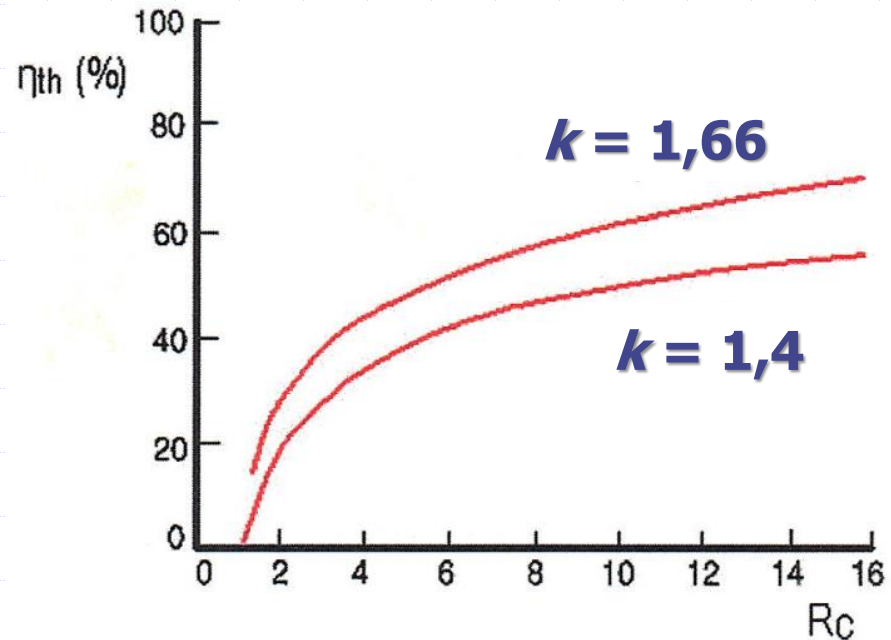
Κύκλος Brayton – Joule...

- Ο συντελεστής θερμικής απόδοσης του κύκλου, η_{th} είναι:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{R_C^{(k-1)/k}} \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \left(\frac{1}{R_C}\right)^{(k-1)/k}$$

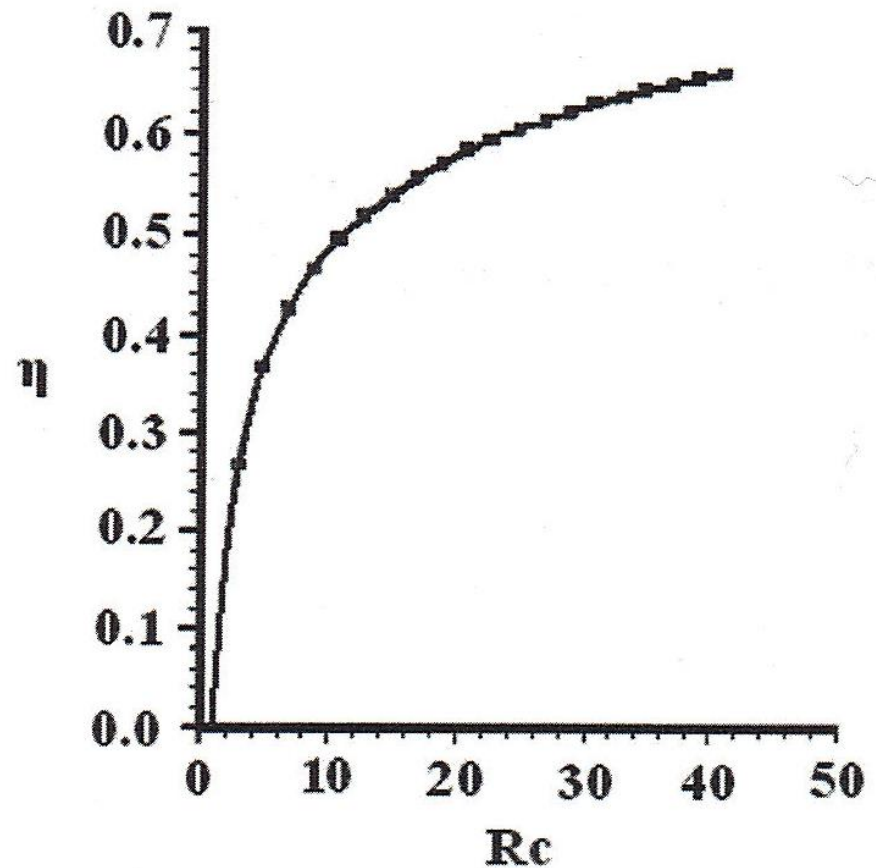
- Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι η απόδοση του κύκλου η_{th} εξαρτάται από το k και από τον λόγο πιέσεων R_C .

- Από το σχήμα γίνεται αντιληπτό γιατί επιλέγεται μονοατομικό αέριο ως εργαζόμενο μέσο στους κλειστούς κύκλους ισχύος αερίου



Κύκλος Brayton – Joule...

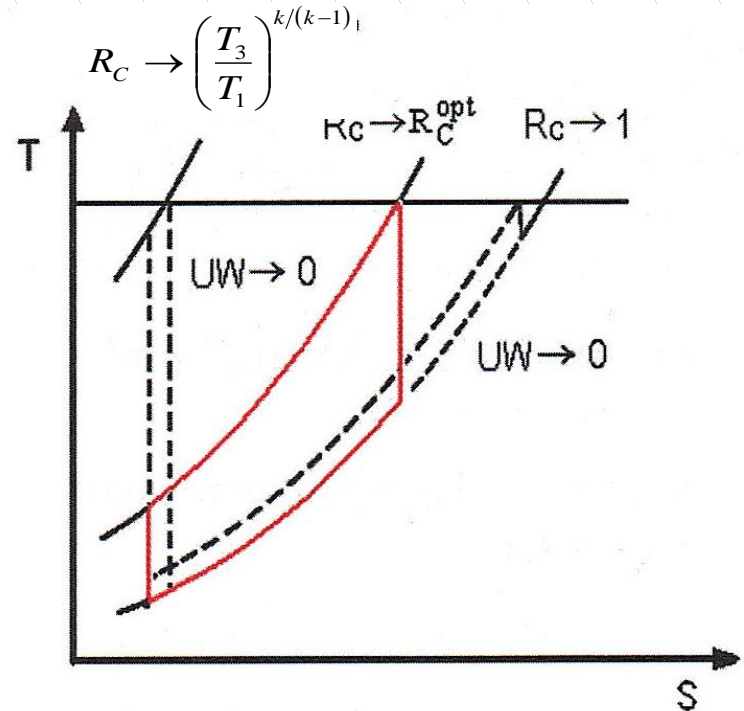
- Από το σχήμα γίνεται φανερό, ότι όταν ο λόγος R_c αυξάνεται, ο συντελεστής η_{th} αυξάνεται συνεχώς και τείνει ασυμπτωτικά στην μονάδα
- Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής θερμικής απόδοσης αποτελεί μέτρο της οικονομικής λειτουργίας μιας θερμικής μηχανής



Κύκλος Brayton – Joule...

$$UW = c_p \left[T_3 - T_1 R_C^{(k-1)/k} \right] \left[1 - R_C^{-(k-1)/k} \right]$$

- Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ότι το ωφέλιμο έργο (Useful Work, UW) του κύκλου, για δεδομένη θερμοκρασία T_1 (συνήθως η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος) εξαρτάται από την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_3 (που εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής του κύκλου, την μέθοδο ψύξης κλπ.) τον λόγο πιέσεων R_C και από το k του αερίου



Κύκλος Brayton – Joule...

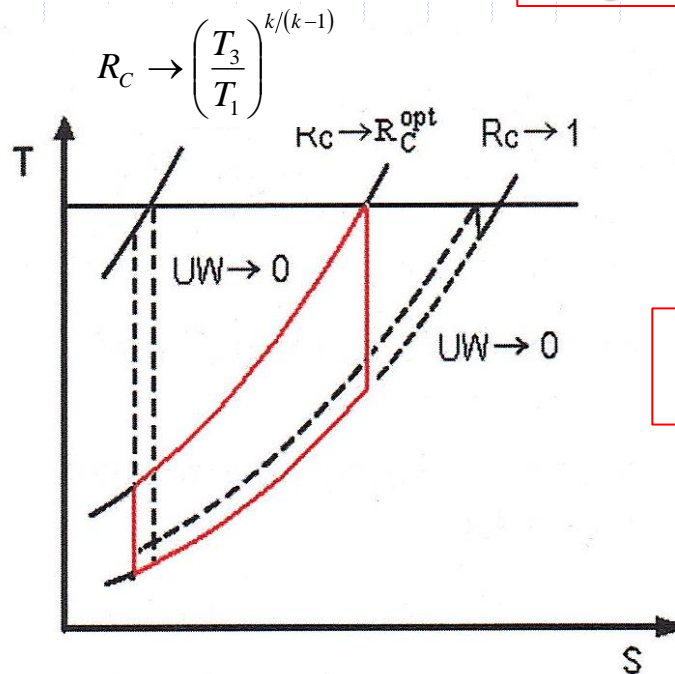
□ Το ωφέλιμο έργο UW γίνεται μηδέν όταν:

A. $T_2 = T_3$, δηλαδή δεν πραγματοποιείται καύση, οπότε:

$$R_C = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{k/(k-1)}$$

B. $T_1 = T_2$, δηλαδή δεν πραγματοποιείται συμπίεση, οπότε:

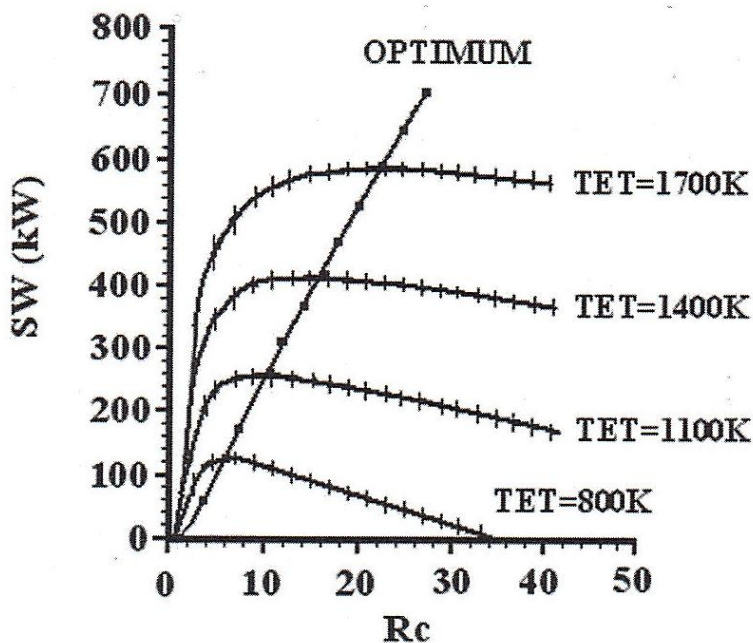
$$R_C = 1 \Rightarrow P_1 = P_2$$



$$UW = c_p \left[T_3 - T_1 R_C^{(k-1)/k} \right] \left[1 - R_C^{-(k-1)/k} \right]$$

Κύκλος Brayton – Joule...

- Από την γραφική παράσταση του SW συναρτήσει του R_c (για δεδομένη T_3) διαπιστώνεται η ύπαρξη μεγίστου, που προσδιορίζεται μηδενίζοντας την πρώτη παράγωγο ως προς την T_2 .



$$\frac{\partial(UW)}{\partial T_2} = 0 \Rightarrow T_2 = \sqrt{T_1 \cdot T_3} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{T_3}{T_1}}$$

- Επειδή οι διεργασίες 1 – 2 και 3 – 4 είναι αδιαβατικές μεταβολές, μεταξύ ίδιων πιέσεων P_1 και P_2 , ισχύει:

$$T_2 = T_4$$

που σημαίνει ότι οι θερμοκρασίες εξόδου από τον συμπιεστή και από τον στρόβιλο είναι ίσες, οπότε ο λόγος πιέσεων γίνεται:

$$R_c^{opt} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{k/(2(k-1))}$$



Κύκλος Brayton – Joule...

- Για τιμές R_C από 1 ως R_C^{opt} , ισχύει $T_2 < T_4$, και επομένως με την χρήση εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να αξιοποιηθεί το ποσό θερμότητας που πλεονάζει λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας $T_4 - T_2$, για την προθέρμανση του αέρα πριν εισέλθει στον θάλαμο, οπότε απαιτείται μικρότερη τροφοδοσία θερμότητας και βελτιώνεται ο η_{th}
- Στο σημείο αυτό ορίζεται ένα νέο μέγεθος, το ειδικό έργο (Specific Work, SW) που ορίζεται ως εξής:

$$SW = \frac{UW}{\dot{m}}$$

όπου \dot{m} είναι η παροχή μάζας, που θεωρήθηκε ίση με την μονάδα.

Επομένως: $SW = UW$

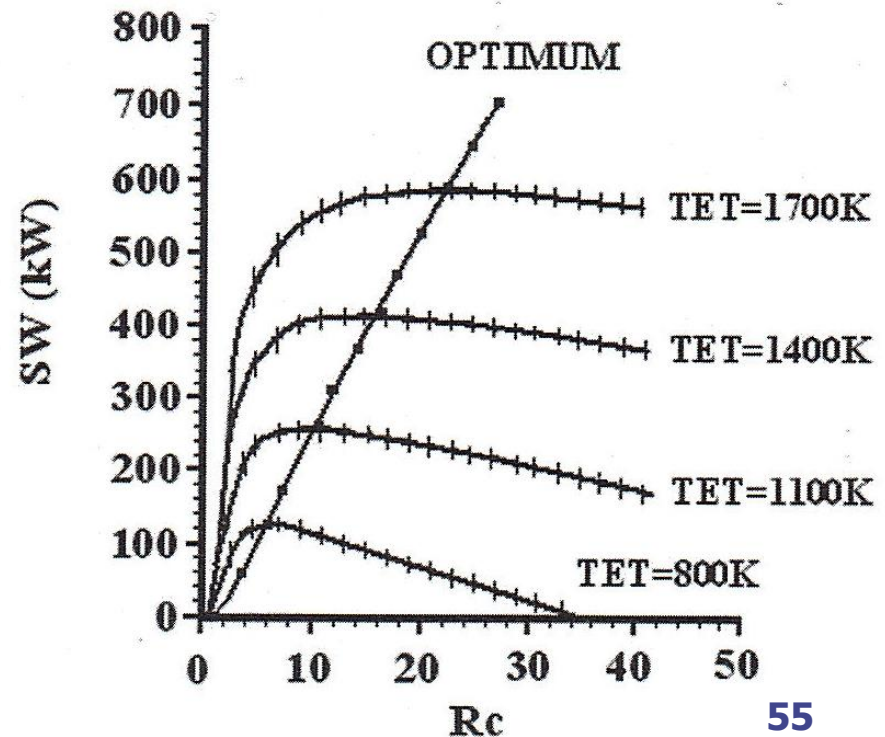
και σε αδιάστατη μορφή:

$$\frac{SW}{C_P T_1} = \frac{T_3}{T_1} \left[1 - R_C^{-(k-1)/k} \right] - \left[R_C^{(k-1)/k} - 1 \right] = \frac{(T_3 - T_2)(T_2 - T_1)}{T_2 T_1}$$



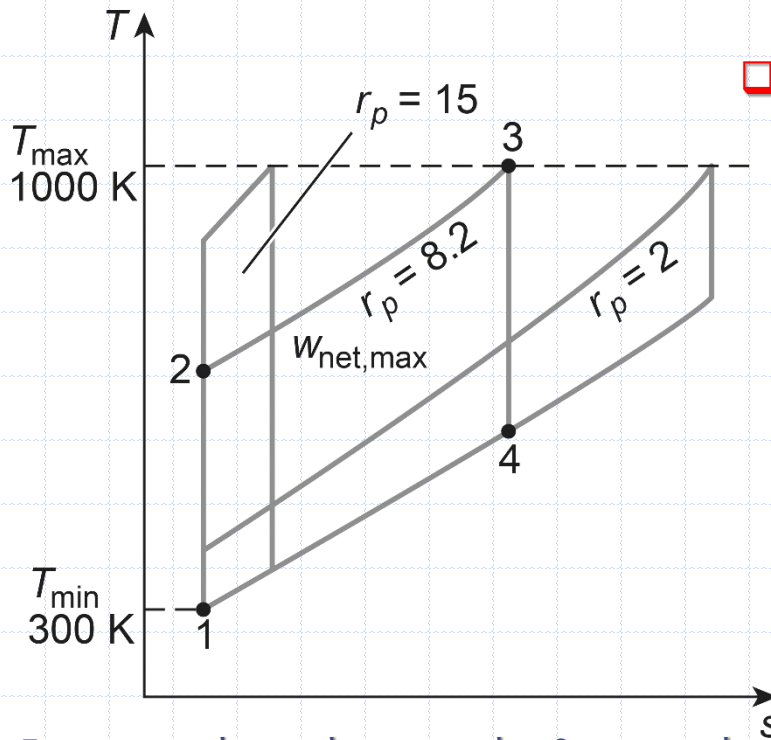
Κύκλος Brayton – Joule...

- Το ειδικό έργο (SW) είναι ένα μέτρο του μεγέθους του αεριοστροβίλου και συγκεκριμένα της διαμέτρου της μετωπικής επιφάνειας του και, επομένως, της μάζας του αέρα που διέρχεται. Συνεπώς, μεγάλη τιμή SW για το ίδιο χρήσιμο έργο (UW) σημαίνει μικρότερη παροχή μάζας και άρα μικρότερη διάμετρο μετωπικής επιφάνειας, και άρα μικρότερο αεριοστρόβιλο
- Από το σχήμα συμπεραίνεται ότι για σταθερή θερμοκρασία T_3 υπάρχει μια τιμή του λόγου R_c όπου το SW γίνεται μέγιστο. Επίσης, όσο η θερμοκρασία T_3 αυξάνεται για δεδομένο R_c και T_1 , τόσο το SW αυξάνει, και επομένως το μέγεθος του αεριοστροβίλου μικραίνει (για δεδομένο UW)



Κύκλος Brayton – Joule...

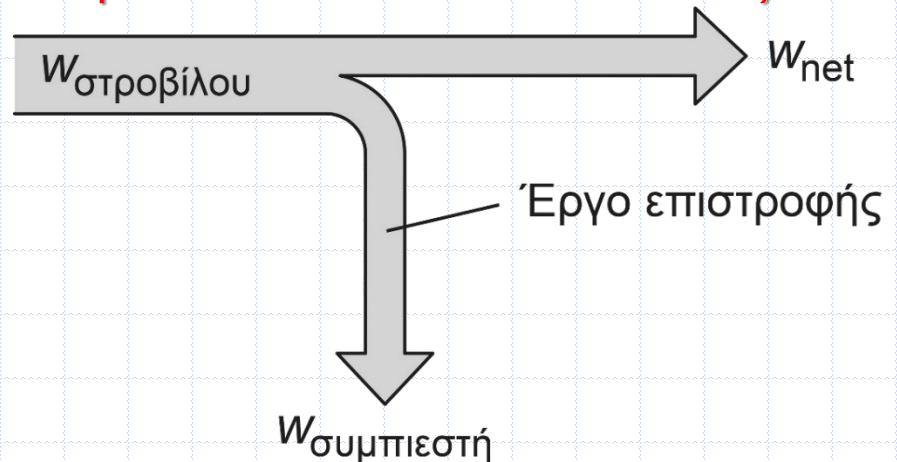
Οι κύριες εφαρμογές των αεριοστροβίλων είναι **η προώθηση αεροσκαφών** και **η ηλεκτροπαραγωγή**



Για συγκεκριμένες τιμές των ακραίων θερμοκρασιών, το συνολικό έργο του κύκλου Brayton αρχικώς αυξάνεται με το λόγο των πιέσεων, στη συνέχεια φθάνει μια μέγιστη τιμή για $r_p = 8,2$ και τελικά μειώνεται.

□ Η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου περιορίζεται από τη θερμοκρασία που μπορούν αν αντέξουν τα πτερύγια του στροβίλου. Όμοια περιορίζονται κι οι λόγοι πίεσης που μπορούν να εφαρμοστούν στον κύκλο

□ Ο αέρας προσφέρει το απαραίτητο μέσο οξείδωσης για την καύση, αλλά αποτελεί κι ένα μέσο καταστολής της θερμοκρασίας εντός ασφαλών ορίων. Τιμές για το λόγο αέρα – καυσίμου άνω του 50 δεν είναι σπάνιες



Το κλάσμα του έργου του στροβίλου που οδηγεί το συμπιεστεί καλείται λόγος επιστροφής έργου



Κύκλος Brayton – Joule...

Βελτίωση των στροβιλομηχανών

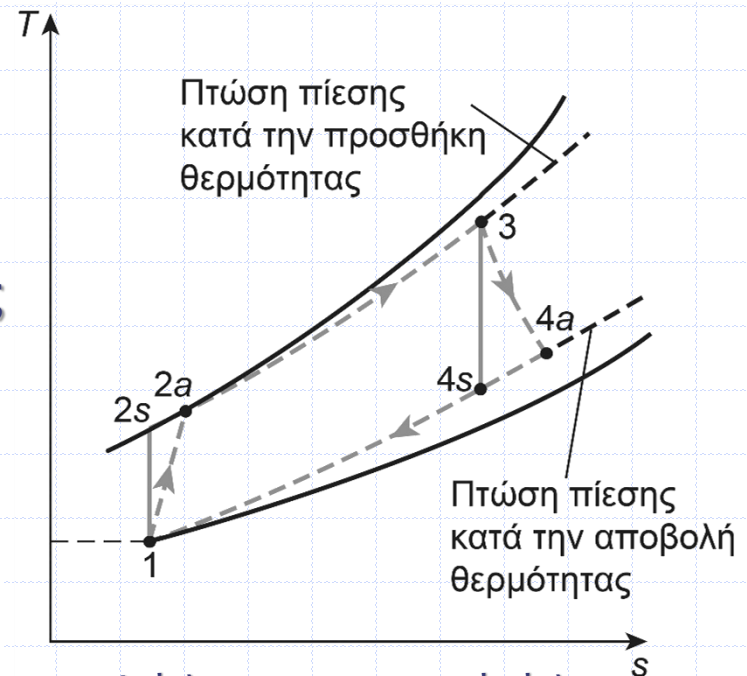
1. Αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο
2. Βελτίωση της ισεντροπικής απόδοσης των επιμέρους μηχανών (στροβιλων & συμπιεστών)
3. Εντοπισμένες τροποποιήσεις στο βασικό κύκλο (ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση κι αναθέρμανση)

Απόκλιση των πραγματικών στροβιλομηχανών από τις ιδανικές

Αίτια: Αναντιστρεπτότητες σε στρόβιλο και συμπιεστή, πτώσεις πίεσης, άδηλες θερμικές απώλειες

Ισεντροπικές αποδόσεις συμπιεστή & στροβίλου

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

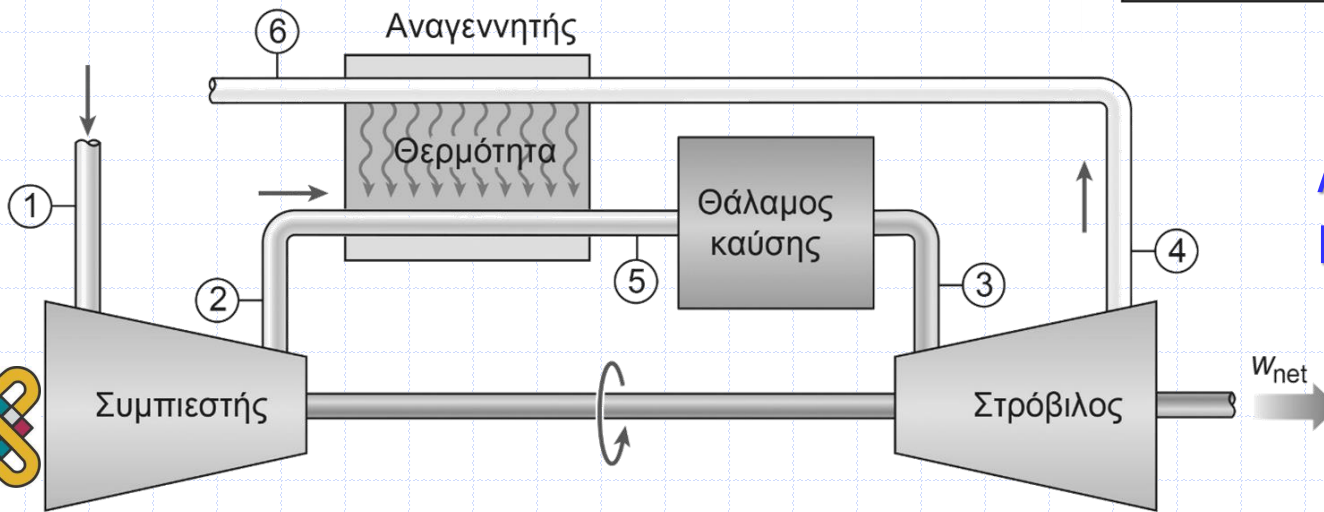
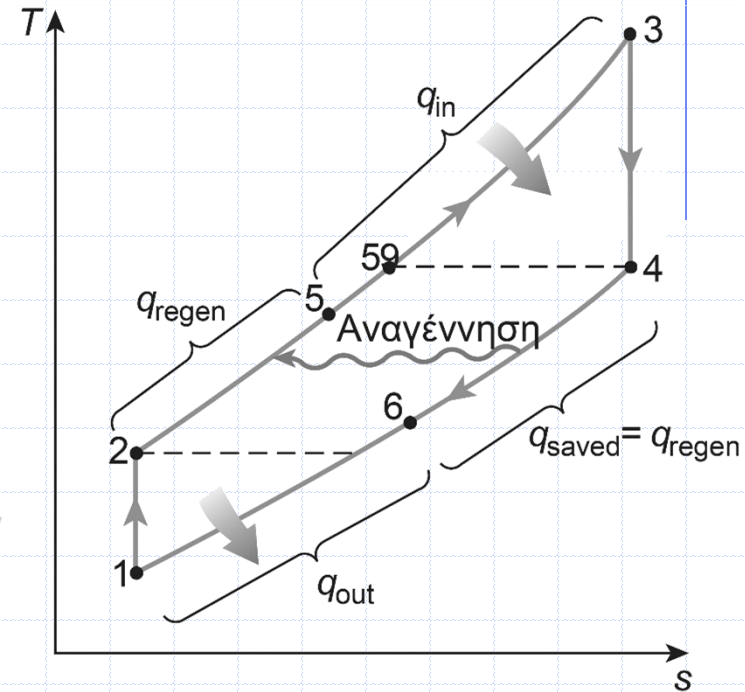


Απόκλιση του πραγματικού κύκλου αεριοστροβίλου από τον ιδανικό κύκλο Brayton, συνεπεία αναντιστρεπτοτήτων



Κύκλος Brayton με αναγέννηση...

- ❑ Στις στροβιλομηχανές, η θερμοκρασία των καυσαερίων, όταν αυτά εξέρχονται του στροβίλου, είναι σημαντικά υψηλότερη της θερμοκρασίας του αέρα, όταν αυτός εξέρχεται του συμπιεστή..
- ❑ Έτσι, ο υψηλής πίεσης αέρας που εξέρχεται του συμπιεστή μπορεί να θερμανθεί από τα θερμά καυσαέρια σε έναν εναλλάκτη αντιρροής (που καλείται **αναγεννητής**).
- ❑ Η θερμική απόδοση του κύκλου Brayton αυξάνεται, μιας και λόγω της ανάκτησης απαιτείται λιγότερο καύσιμο για την ίδια παραγωγή έργου.



Αεριοστροβίλος
με αναγεννητή

Κύκλος Brayton με αναγέννηση...

$$q_{\text{regen,act}} = h_5 - h_2$$

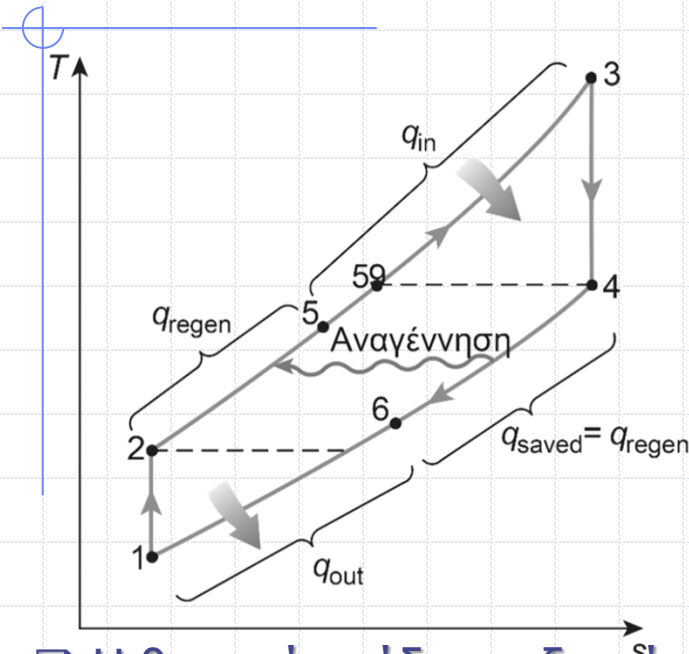
$$q_{\text{regen,max}} = h_{5'} - h_2 = h_4 - h_2$$

$$\epsilon = \frac{q_{\text{regen,act}}}{q_{\text{regen,max}}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \quad \text{Αποτελεσματικότητα του αναγεννητή}$$

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

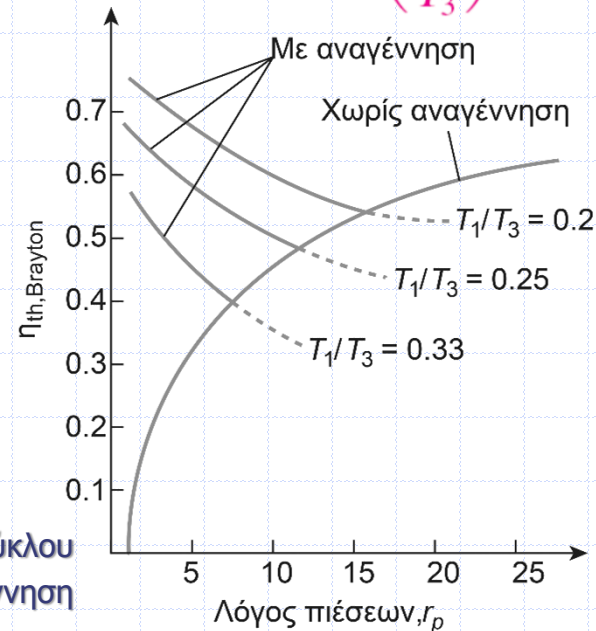
Αποτελεσματικότητα αναγεννητή υπό παραδοχές πρότυπου ψυχρού αέρα

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



□ Η θερμική απόδοση εξαρτάται από το λόγο των ακραίων θερμοκρασιών και το λόγο συμπίεσης.

□ Η αναγέννηση είναι περισσότερο αποδοτική υπό χαμηλούς λόγους πίεσης και χαμηλούς λόγους ακραίων θερμοκρασιών.



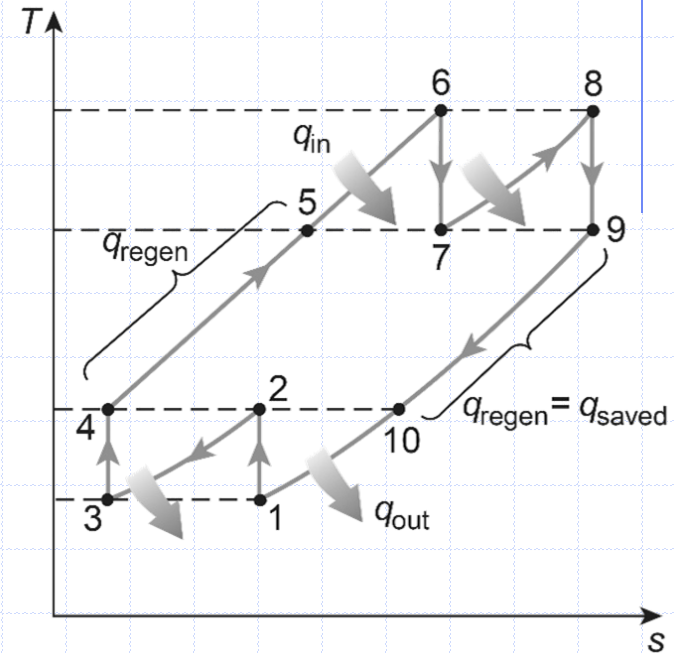
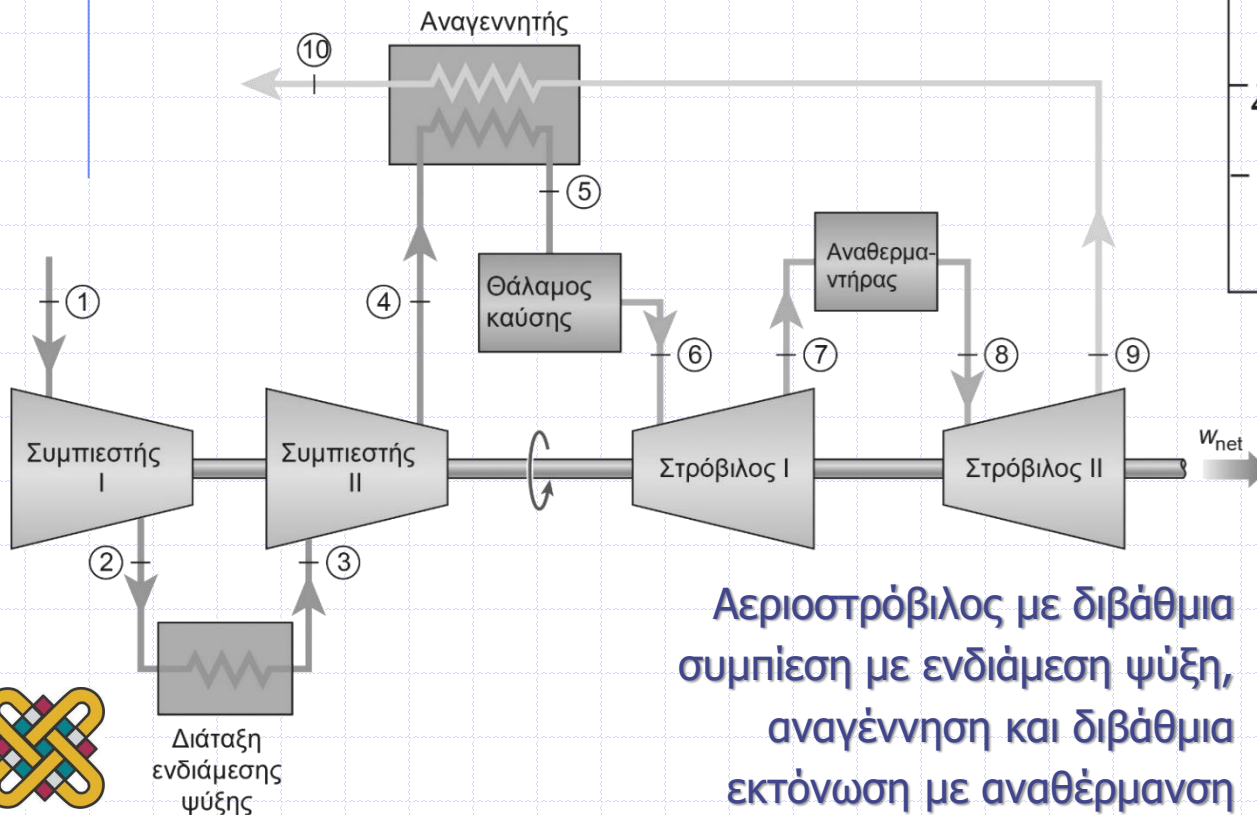
Θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Brayton με και χωρίς αναγέννηση



Κύκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση και αναθέρμανση...

Για ελαχιστοποίηση του έργου του συμπιεστή και μεγιστοποίηση του έργου του ατμοποιητή,

θα πρέπει: $\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3}$ και $\frac{P_6}{P_7} = \frac{P_8}{P_9}$

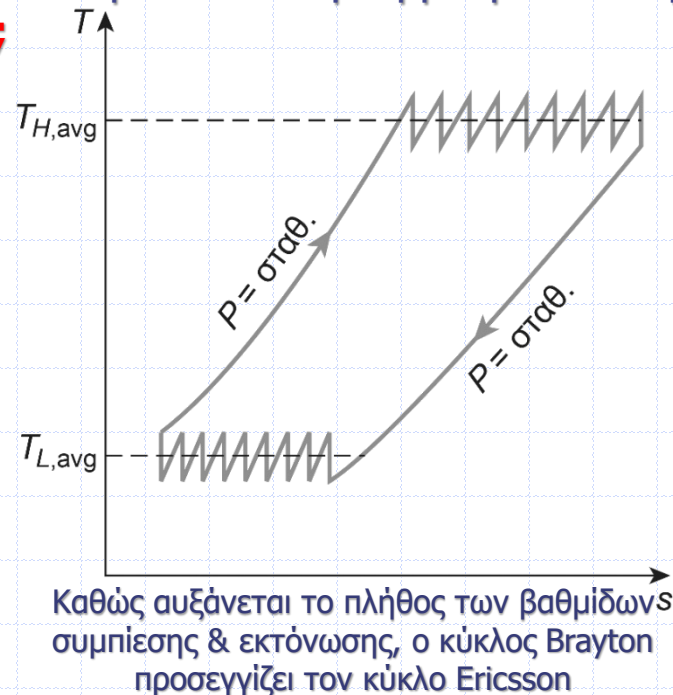
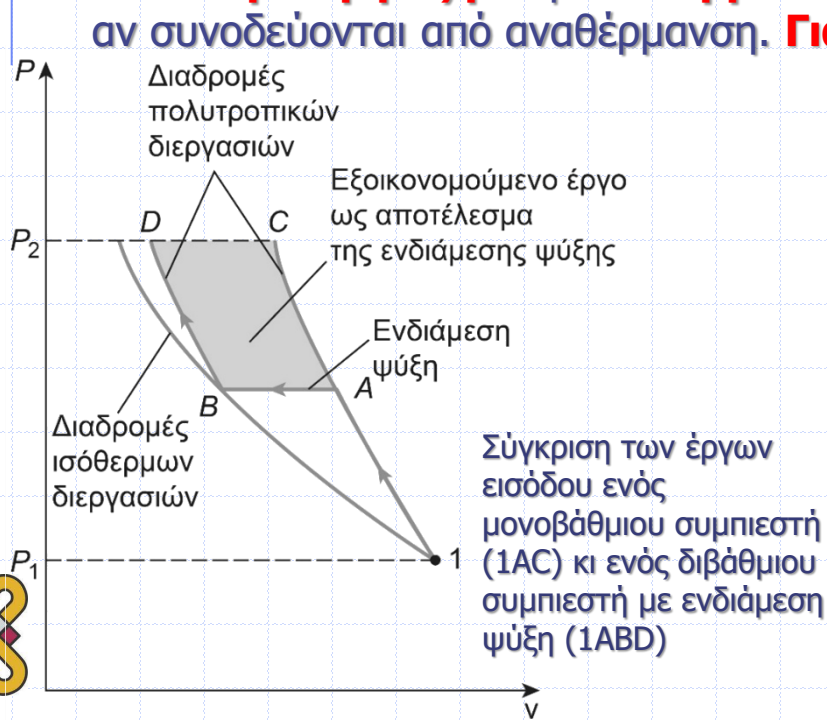


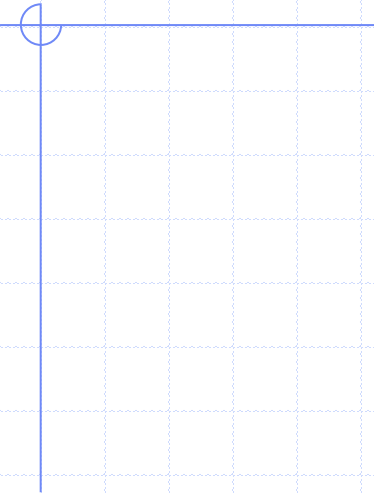
Διάγραμμα *T-s diagram* ιδανικού αεριοστροβίλου με ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση & αναθέρμανση

Αεριοστρόβιλος με διβάθμια συμπίεση με ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση και διβάθμια εκτόνωση με αναθέρμανση

Κύκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση και αναθέρμανση...

- ❑ **Πολυβάθμια συμπίεση με ενδιάμεση ψύξη:** Το έργο που απαιτείται για τη συμπίεση ενός αερίου μεταξύ δύο δεδομένων πιέσεων μπορεί να μειωθεί, αν η συμπίεση γίνεται κατά βαθμίδες και με ενδιάμεση ψύξη του αερίου μεταξύ δύο διαδοχικών βαθμίδων. Με τον τρόπο αυτό, ο ειδικός όγκος διατηρείται όσο το δυνατό χαμηλότερος.
- ❑ Η **πολυβάθμια εκτόνωση με αναθέρμανση** διατηρεί τον ειδικό όγκο όσο το δυνατό υψηλότερα κατά την εκτόνωση, μεγιστοποιώντας έτσι το παραγόμενο έργο.
- ❑ Η **ενδιάμεση ψύξη** κι η **αναθέρμανση** πάντα μειώνουν τη θερμική απόδοση εκτός αν συνοδεύονται από αναθέρμανση. **Γιατί;**





***Ιδανικοί κύκλοι
αεριοπροώθησης...***



Ιδανικοί κύκλοι αεριοπροώθησης...

- ❑ Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για την ώση αεροσκαφών, επειδή είναι ελαφρείς, συμπαγείς και χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση ισχύος
- ❑ Οι αεριοστρόβιλοι των αεροσκαφών λειτουργούν με έναν ανοιχτό κύκλο, που καλείται **κύκλος αεριοπροώθησης**
- ❑ Ο ιδανικός κύκλος αεριοπροώθησης διαφέρει από τον απλό ιδανικό κύκλο Brayton στο ότι τα αέρια δεν εκτονώνονται στο στρόβιλο μέχρι της ατμοσφαιρικής πίεσης. Αντίθετα, εκτονώνονται μέχρι την πίεση που απαιτείται ώστε να παράγεται ακριβώς η πίεση που απαιτείται για τη λειτουργία του συμπιεστή και του βοηθητικού εξοπλισμού
- ❑ Το καθαρό παραγόμενο έργο ενός κύκλου αεριοπροώθησης είναι μηδενικό. Τα καυσαέρια εξέρχονται του στροβίλου υπό σχετικά υψηλή πίεση και ακολούθως επιταχύνονται σε ένα ακροφύσιο, ώστε να παρέχουν ώση για την κίνηση του αεροσκάφους
- ❑ Τα αεροσκάφη ωθούνται επιταχύνοντας ένα ρευστό προς διεύθυνση, αντίθετη με της κίνησής τους. Αυτό επιτυγχάνεται είτε επιταχύνοντας λίγο μια μεγάλη μάζα ρευστού (**ελικοφόρα αεροσκάφη**) ή επιταχύνοντας πολύ μια μικρή μάζα ρευστού (**αεροσκάφη τζετ**) ή και τα δύο (**αεροσκάφη turboprop**)



Ιδανικοί κύκλοι αεριοπροώθησης...



Στους αεριοθούμενους κινητήρες, τα υψηλής θερμοκρασίας και ταχύτητας καυσαέρια που εξέρχονται από το στρόβιλο επιταχύνονται σε ένα ακροφύσιο, ώστε να παραχθεί ωστική ισχύς



Ιδανικοί κύκλοι αεριοπροώθησης...

Ώση

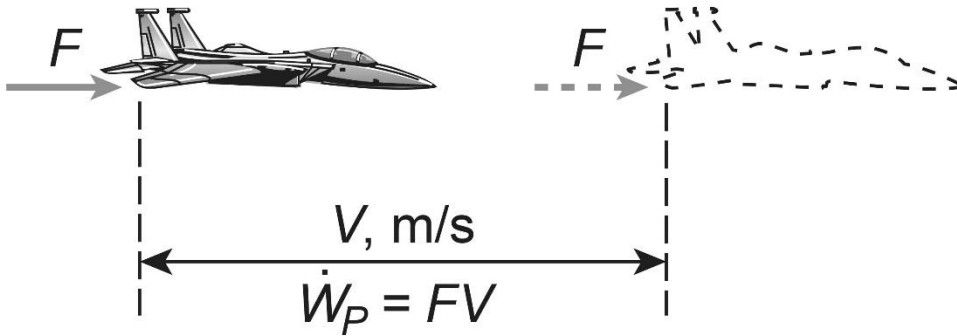
$$F = (\dot{m}V)_{\text{exit}} - (\dot{m}V)_{\text{inlet}} = \dot{m}(V_{\text{exit}} - V_{\text{inlet}}) \quad (\text{N})$$

Πρωθητική ισχύς

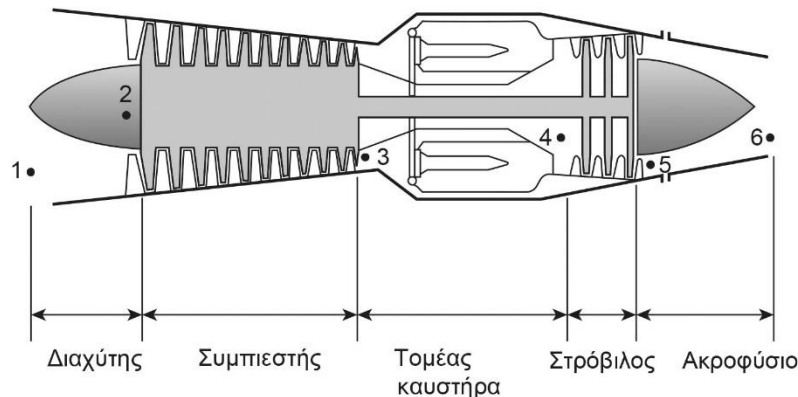
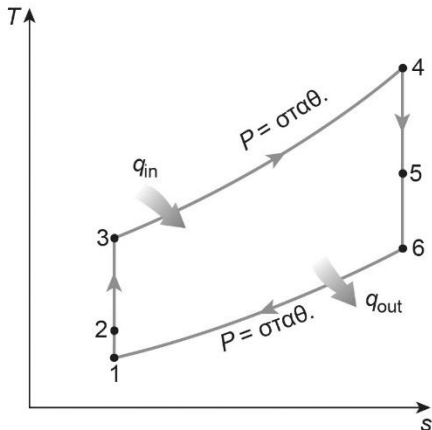
$$\dot{W}_P = FV_{\text{aircraft}} = \dot{m}(V_{\text{exit}} - V_{\text{inlet}})V_{\text{aircraft}} \quad (\text{kW})$$

Πρωθητική απόδοση:

$$\eta_P = \frac{\dot{W}_P}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$

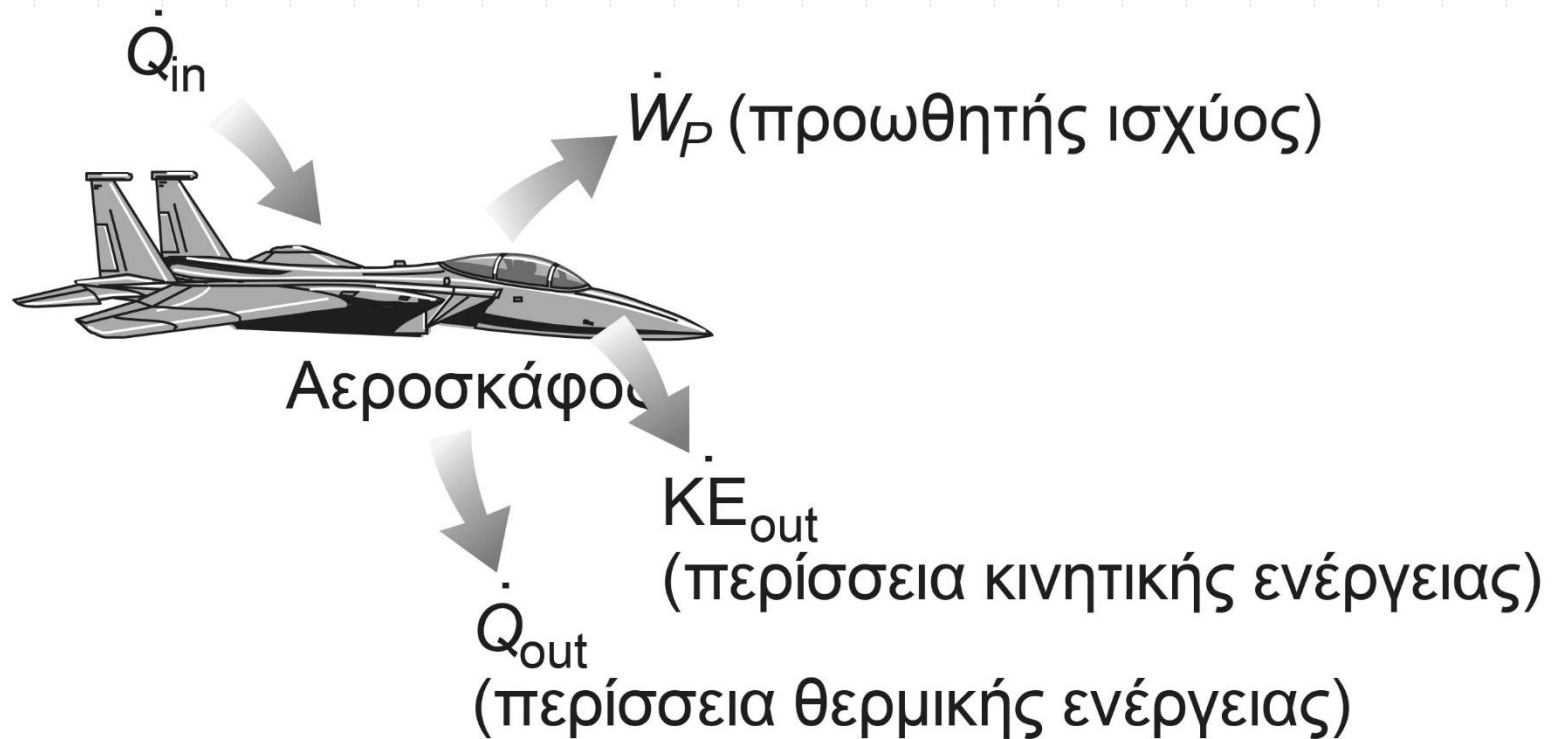


Η πρωθητική ισχύς είναι η ώθηση που ασκείται στο αεροσκάφος κατά τη διάνυση μιας απόστασης στη μονάδα του χρόνου



Βασικά εξαρτήματα ενός στροβιλοκινητήρα και το διάγραμμα T - s του αντίστοιχου ιδανικού κύκλου

Ιδανικοί κύκλοι αεριοπροώθησης...



Η ενέργεια που προσφέρεται σε ένα αεροσκάφος, μέσω της καύσης του καυσίμου, μετατρέπεται σε διάφορες μορφές

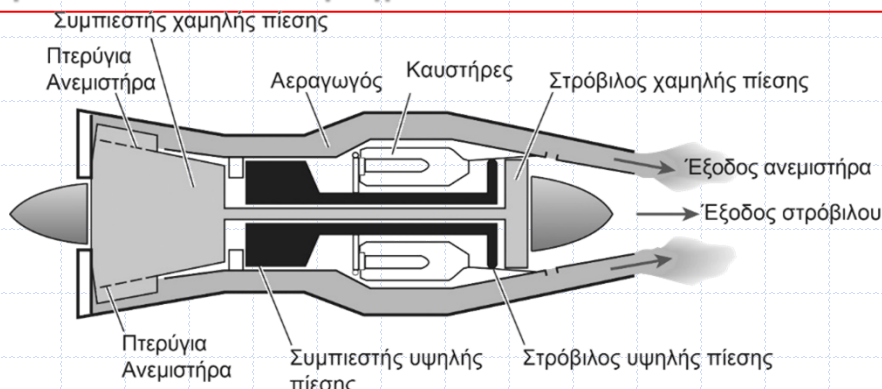


Ιδανικοί κύκλοι αεριοπροώθησης...

Τροποποιήσεις των μηχανών Turbojet

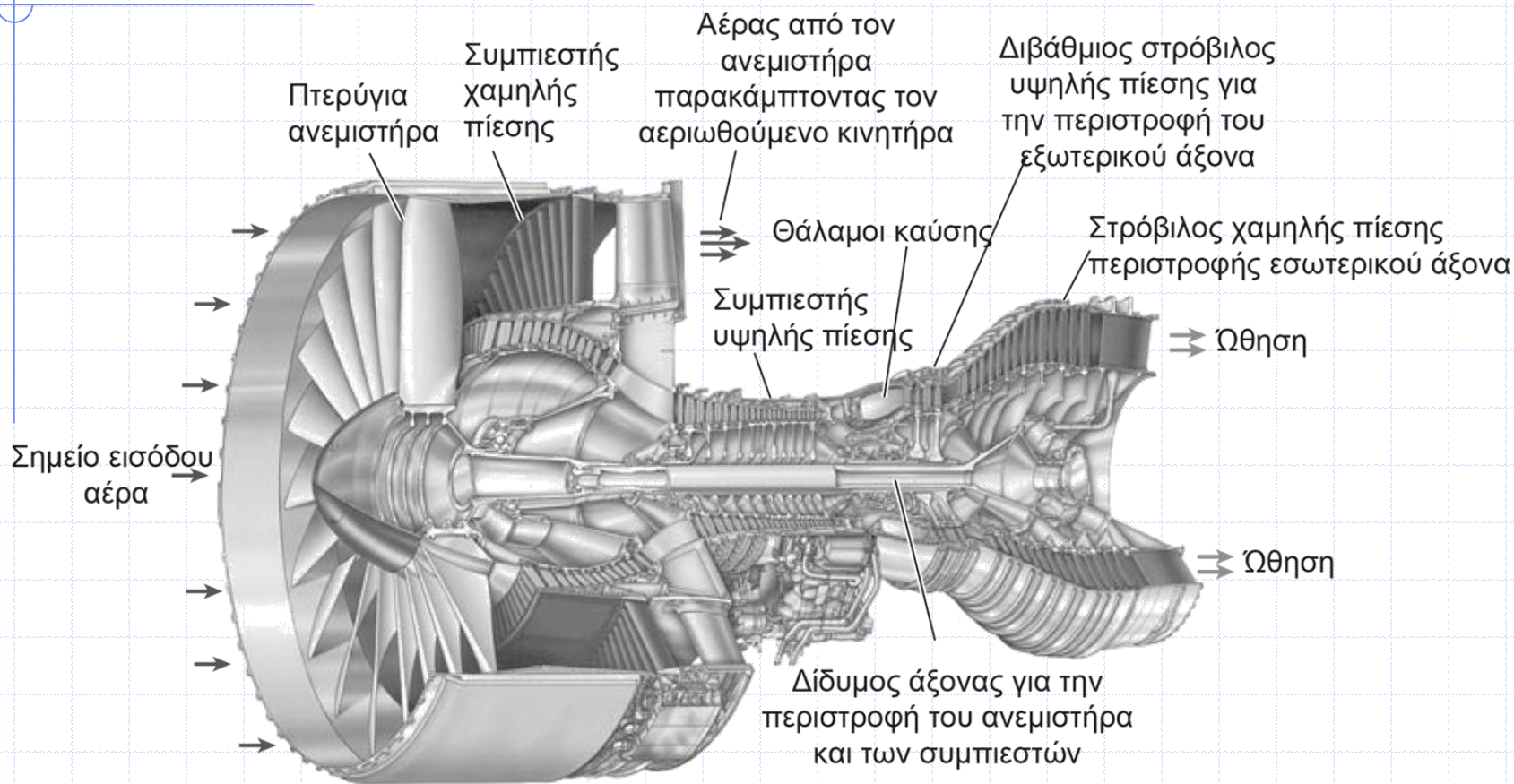
- ❑ Τα πρώτα αεροσκάφη ήταν όλα ελικοφόρα κι οι έλικες οδηγούνται από κινητήρες όμοιους με τους κινητήρες των αυτοκινήτων
- ❑ Τόσο οι ελικοφόροι κινητήρες, όσο κι οι turbojet έχουν ο καθένας τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κατά καιρούς έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες ώστε να συνδυαστούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και των δύο αυτών τύπων κινητήρων σε έναν κινητήρα
- ❑ Δύο τέτοιες τροποποιήσεις είναι οι μηχανές *propjet* και *turbofan*

Ο συχνότερα χρησιμοποιούμενος κινητήρας για την προώθηση αεροσκαφών είναι ο *turbofan* (or *fanjet*), όπου ένας μεγάλος ανεμιστήρας, οδηγούμενος από το στρόβιλο, οδηγεί μια σημαντική ποσότητα αέρα μέσω ενός κοιλώματος που περιβάλλει τον κινητήρα.



Στροβιλοκινητήρας
διπλής ροής

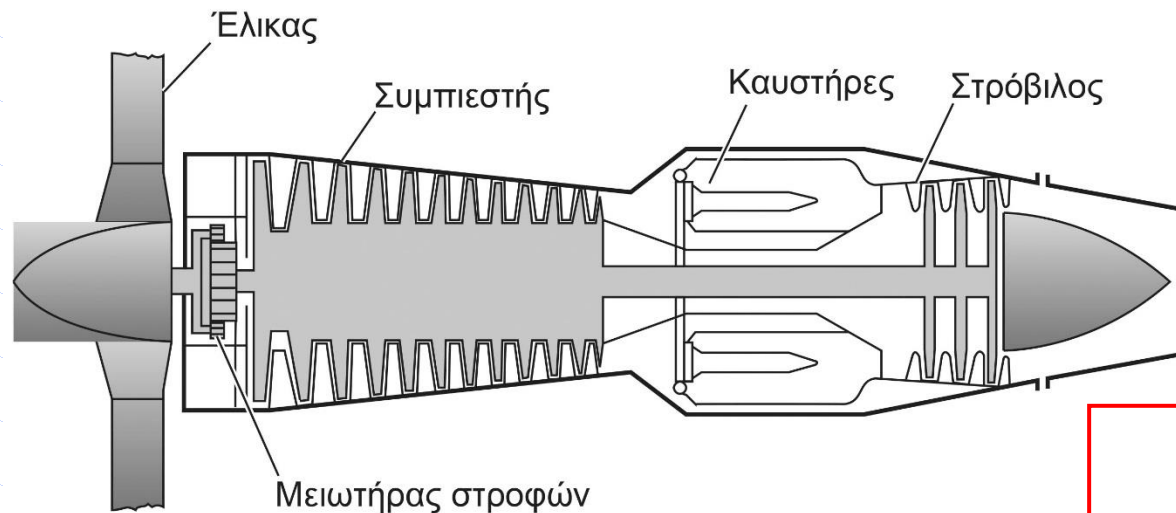
Ιδανικοί κύκλοι αεριοπροώθησης...



Σύγχρονος αεριοθούμενος κινητήρας, που χρησιμοποιείται για την κίνηση αεροσκαφών Boeing 777. Με μήκος 4,87 m, διάμετρο πτερυγίων 2,84 m και βάρος 6.800 kg, παράγει 30.000 kg_f ώσης

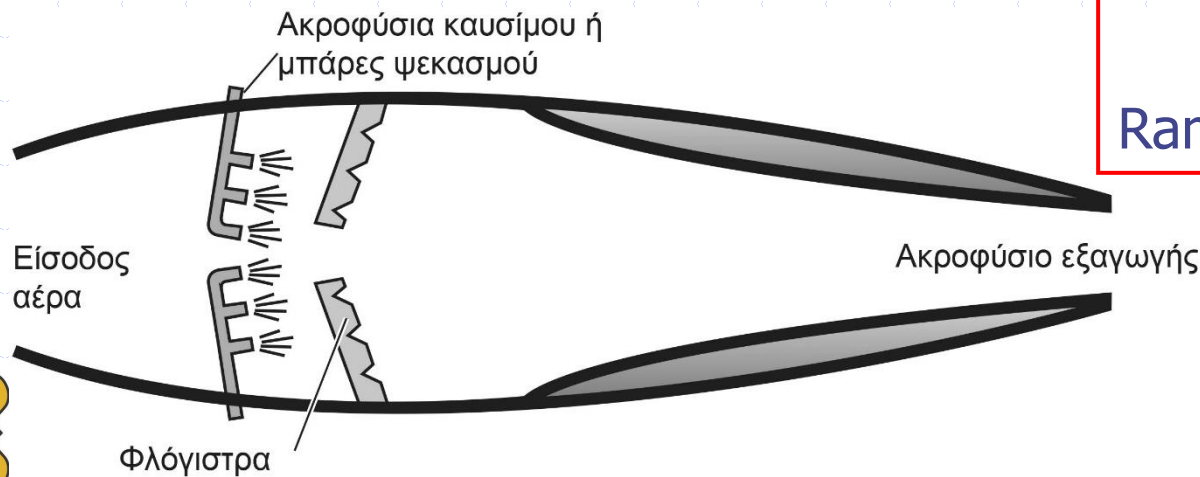


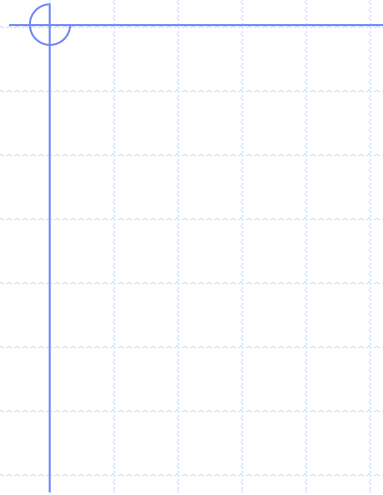
Ιδανικοί κύκλοι αεριοπροώθησης...



**Διάφοροι τύποι
κινητήρων:**

Turbofan, Propjet,
Ramjet, Scramjet, Rocket

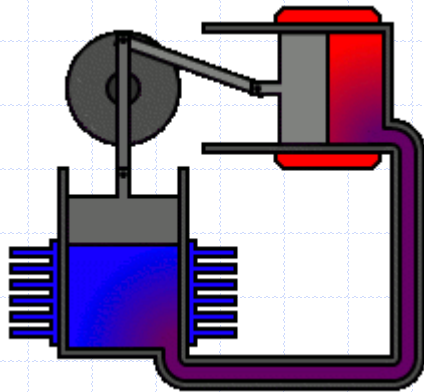




Κύκλος Stirling...

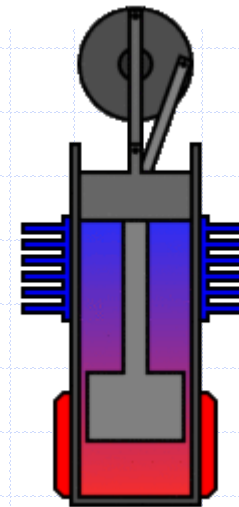
Κύκλος Stirling...

Η μηχανή **Stirling** είναι πολύπλοκη και βαριά μηχανή, η οποία 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



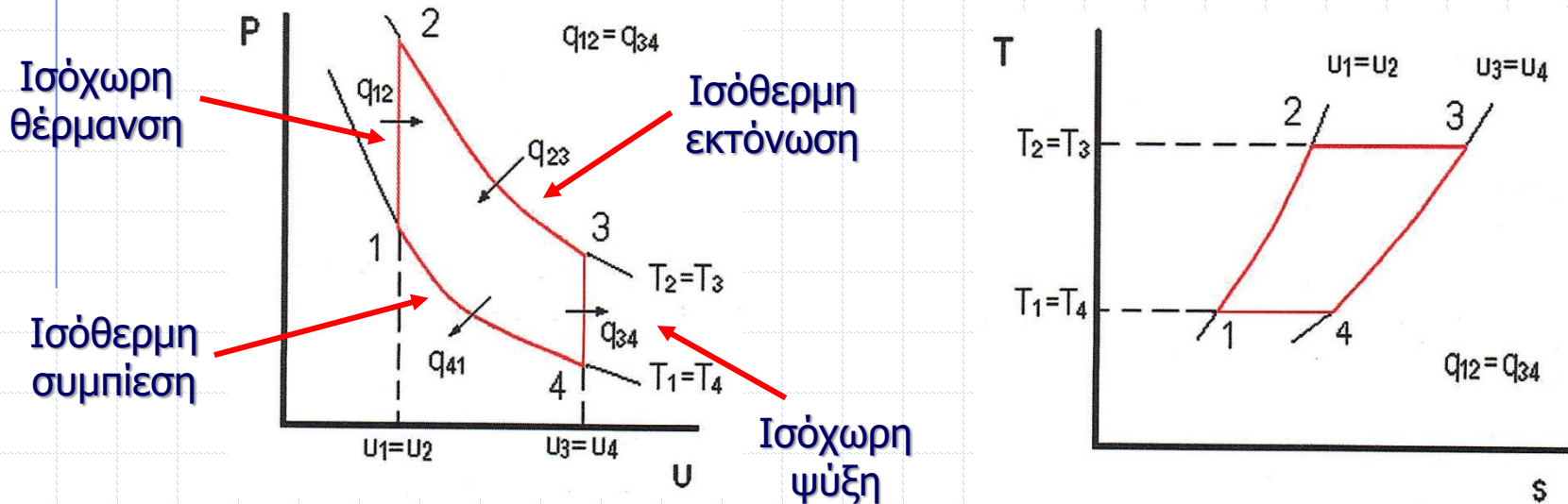
Τύπος Βήτα: Ένας κύλινδρος

- ❑ 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



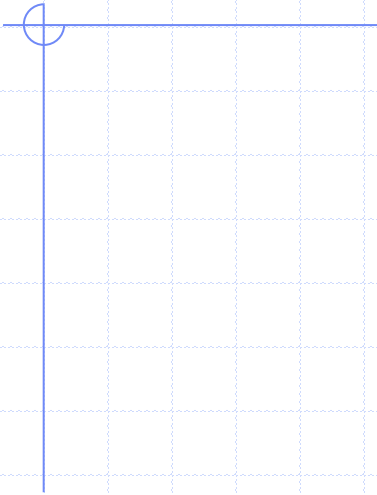
Κύκλος Stirling...

Ο ιδανικός θερμοδυναμικός κύκλος Stirling παρουσιάζεται στο σχήμα:



Βαθμός απόδοσης κύκλου Stirling

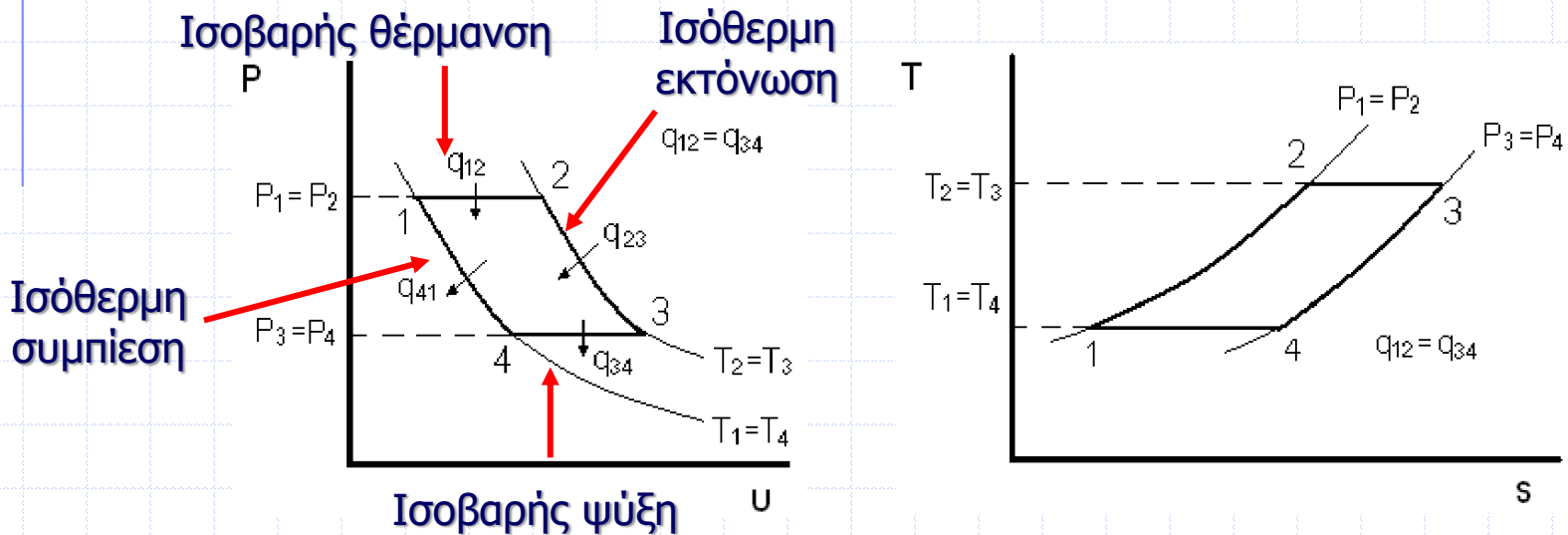
$$\eta_{th} = \frac{W_{total}}{q_{41}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{R(T_2 - T_1) \ln \frac{v_1}{v_4}}{RT_1 \ln \frac{v_1}{v_4}} \Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



Κύκλος Ericsson...

Κύκλος Ericsson...

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

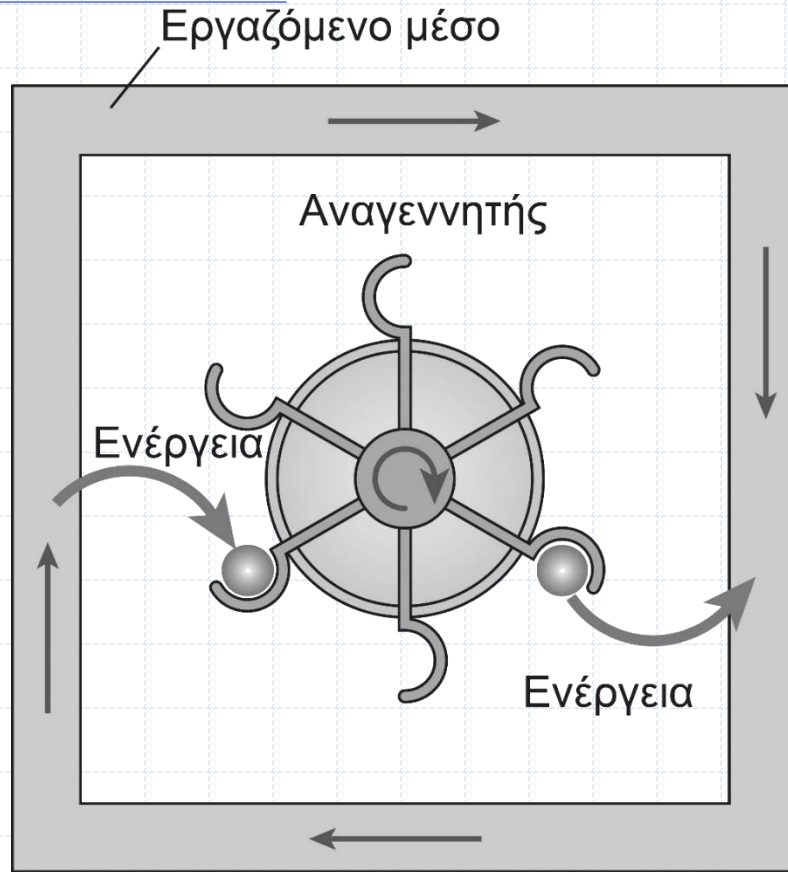


Βαθμός απόδοσης κύκλου Ericsson

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



Κύκλοι Stirling-Ericsson...



Κύκλος Stirling

1-2 Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση
(πρόσδοση θερμότητας από
εξωτερική πηγή)

2-3 Ισόογκη αναγέννηση
(εσωτερική μετάδοση θερμότητας
από το εργαζόμενο μέσο προς τον
αναγεννητή)

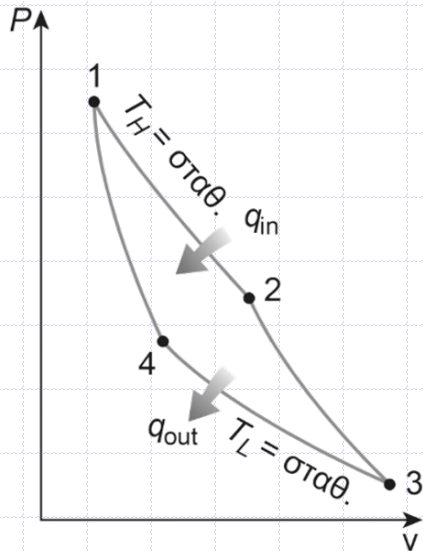
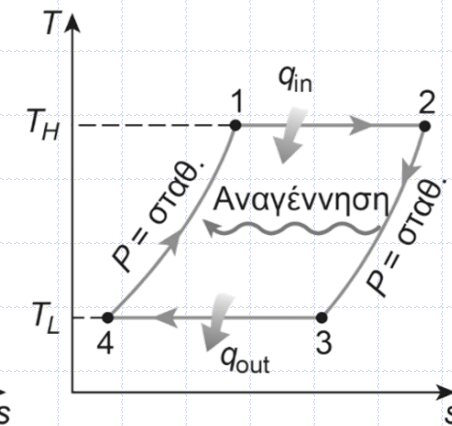
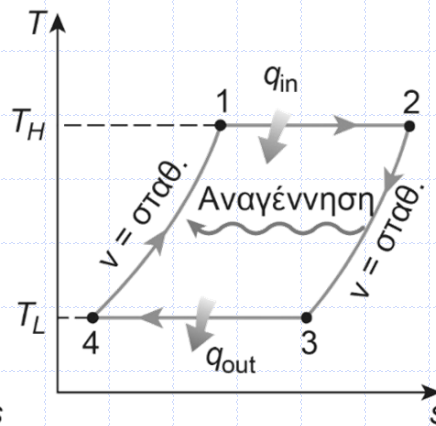
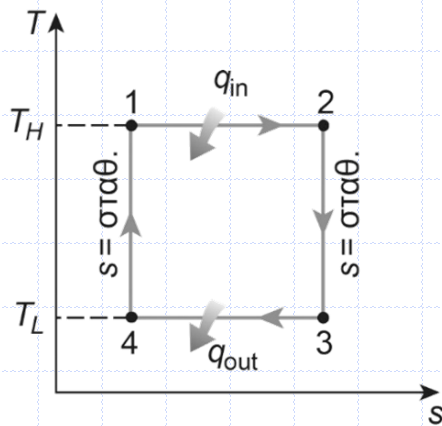
3-4 Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση
(απόρριψη θερμότητας)

4-1 Ισόογκη αναγέννηση
(εσωτερική μετάδοση θερμότητας
από τον αναγεννητή προς το
εργαζόμενο μέσο)

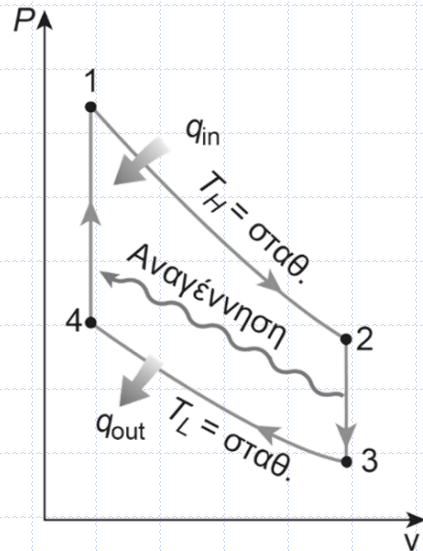
Ο αναγεννητής είναι μια συσκευή, η οποία δανείζεται ενέργεια από το εργαζόμενο μέσο κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας του κύκλου και την επιστρέφει κατά τη διάρκεια μιας άλλης διεργασίας του κύκλου.



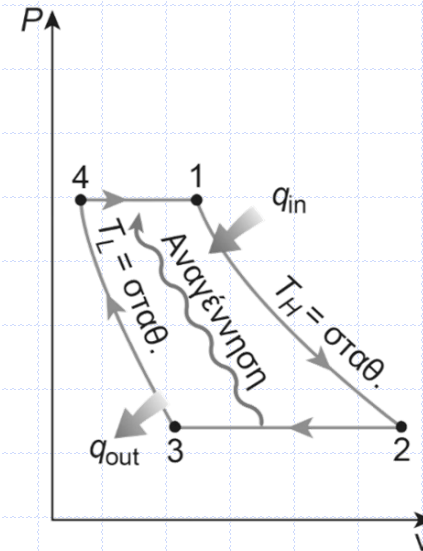
Κύκλοι Stirling-Ericsson...



(α) Κύκλος Carnot



(β) Κύκλος Stirling



(γ) Κύκλος Ericsson



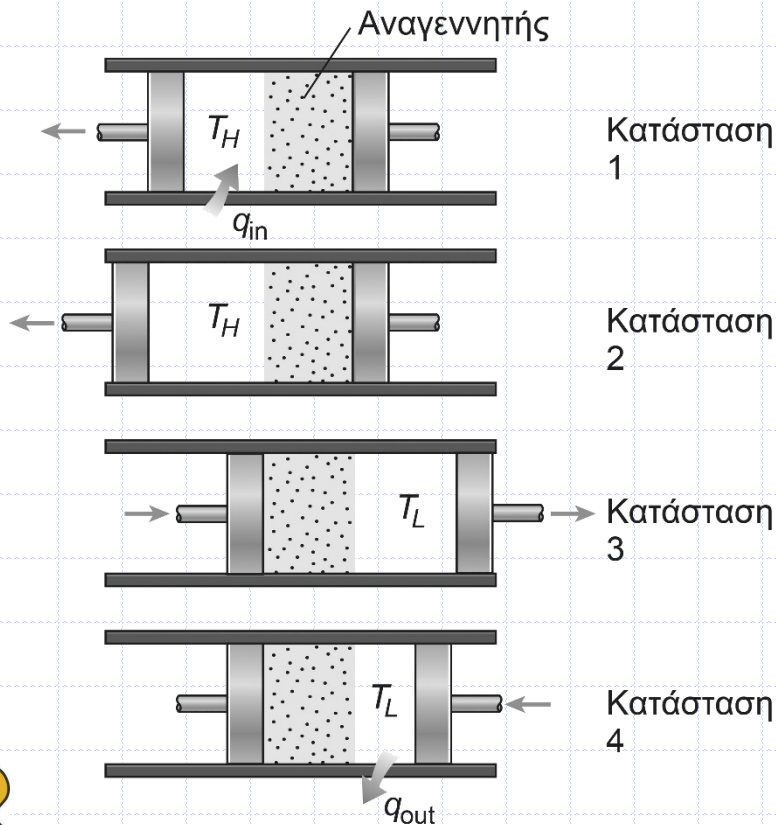
Κύκλοι Stirling-Ericsson...

Οι κύκλοι Stirling & Ericsson μας δίνουν μια πληροφορία: H αναγέννηση αυξάνει την απόδοση

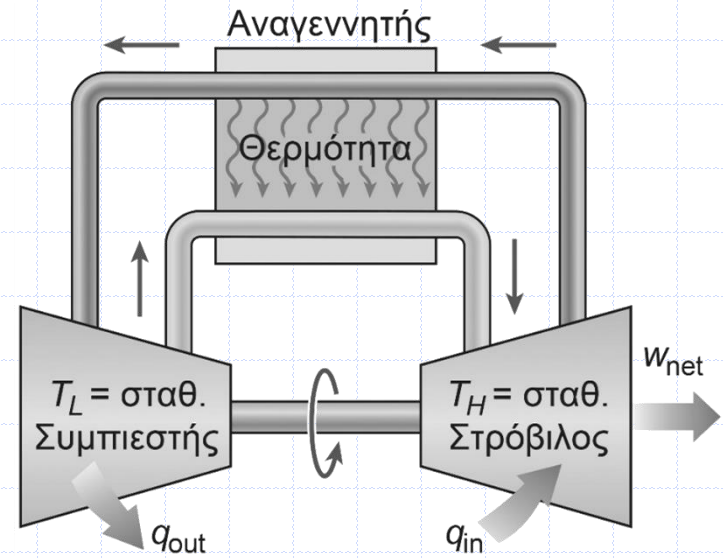
Οι κύκλοι Stirling κι Ericsson είναι πλήρως αντιστρεπτοί, όπως κι ο κύκλος Carnot, επομένως:

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

Ο κύκλος Ericsson είναι παρεμφερής του κύκλου Stirling, με τη μόνη διαφορά ότι οι δύο ισόογκες διεργασίες έχουν αντικατασταθεί από δύο ισόθλιπτες



Διεξαγωγή του κύκλου Stirling



Μηχανή Ericsson σταθεροποιημένης ροής



Ανάλυση κύκλων ισχύος με το 2^ο Θερμοδυναμικό Αξίωμα...

$$X_{\text{dest}} = T_0 S_{\text{gen}} = T_0 (\Delta S_{\text{sys}} - S_{\text{in}} + S_{\text{out}})$$

Καταστροφή εξέργειας σε κλειστό σύστημα

$$= T_0 \left[(S_2 - S_1)_{\text{sys}} - \frac{Q_{\text{in}}}{T_{b,\text{in}}} + \frac{Q_{\text{out}}}{T_{b,\text{out}}} \right] \quad (\text{kJ})$$

$$\dot{X}_{\text{dest}} = T_0 \dot{S}_{\text{gen}} = T_0 (\dot{S}_{\text{out}} - \dot{S}_{\text{in}}) = T_0 \left(\sum_{\text{out}} \dot{m} s - \sum_{\text{in}} \dot{m} s - \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{T_{b,\text{in}}} + \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{T_{b,\text{out}}} \right) \quad (\text{kW})$$

Υπό σταθεροποιημένη ροή

$$X_{\text{dest}} = T_0 S_{\text{gen}} = T_0 \left(s_e - s_i - \frac{q_{\text{in}}}{T_{b,\text{in}}} + \frac{q_{\text{out}}}{T_{b,\text{out}}} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

Σταθεροποιημένη ροή, ένα ρεύμα

$$x_{\text{dest}} = T_0 \left(\sum \frac{q_{\text{out}}}{T_{b,\text{out}}} - \sum \frac{q_{\text{in}}}{T_{b,\text{in}}} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

Καταστροφή εξέργειας σε ένα κύκλο

$$x_{\text{dest}} = T_0 \left(\frac{q_{\text{out}}}{T_L} - \frac{q_{\text{in}}}{T_H} \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

Σε κύκλο με μόνο 2 θερμοδοχεία

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

Εξέργεια κλειστού συστήματος

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

Εξέργεια ροής



Θερμοδυναμική Ι

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

