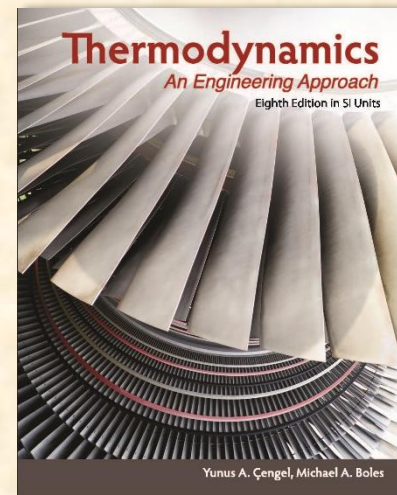


Θερμοδυναμική για Μηχανικούς  
8<sup>η</sup> έκδοση  
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles  
Εκδόσεις Τζιόλα, 2015



## Κεφάλαιο 9

# Κύκλοι ισχύος των αερίων

Επιμέλεια διαφάνειας  
**Mehmet Kanoglu**

Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης  
**Δημήτρης Τερτίπης**

# Στόχοι

- Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των κύκλων ισχύος αερίων, το εργαζόμενο μέσο των οποίων παραμένει στην αέρια φάση καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου.
- Ανάπτυξη απλοποιητικών παραδοχών που εφαρμόζονται στους κύκλους ισχύος αερίων.
- Επισκόπηση της λειτουργίας των παλινδρομικών μηχανών.
- Ανάλυση ανοιχτών και κλειστών κύκλων ισχύος αερίων.
- Επίλυση προβλημάτων που αφορούν στους κύκλους Otto, Diesel, Stirling κι Ericsson.
- Επίλυση προβλημάτων που αφορούν στον κύκλο Brayton, στον κύκλο Brayton με αναγέννηση και στον κύκλο Brayton με ενδιάμεση ψύξη, αναθέρμανση κι αναγέννηση.
- Ανάλυση κύκλων αεριοπρώθησης
- Ανάλυση των κύκλων ισχύος αερίων βάσει του Δεύτερου Νόμου.

# Βασικές θεωρήσεις κατά την ανάλυση κύκλων ισχύος

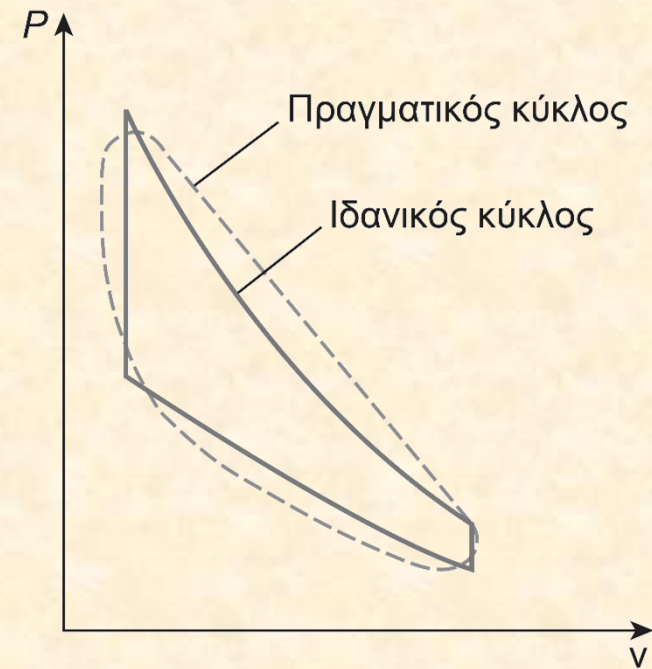
Οι περισσότερες εργοπαραγωγές μηχανές λειτουργούν σε κύκλο.

**Ιδανικός κύκλος:** είναι ένας κύκλος που προσεγγίζει τον πραγματικό κύκλο, αλλά αποτελείται πλήρως από εσωτερικές 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.



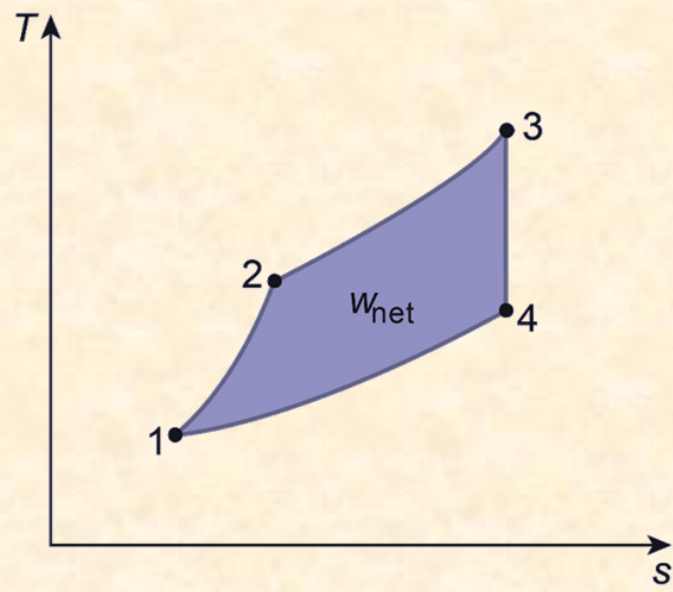
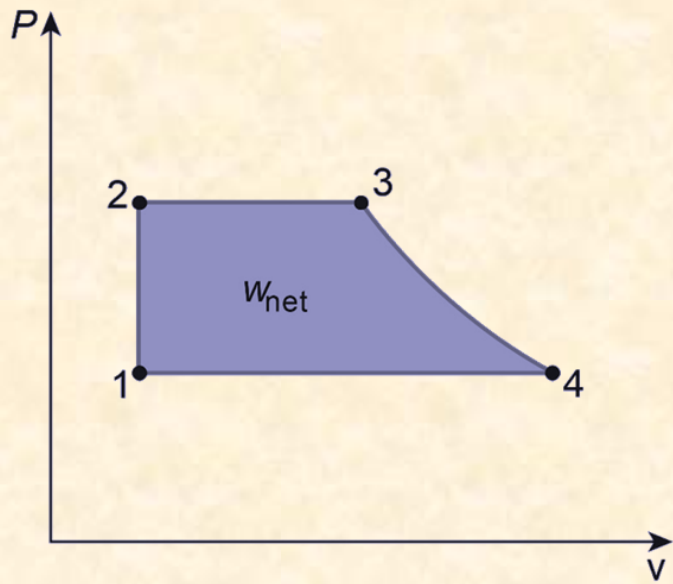
Η μοντελοποίηση είναι ένα ισχυρό εργαλείο στα χέρια των Μηχανικών, παρέχοντας κατανοητή και απλή γνώση με τίμημα μια κάποια μειωμένη ακρίβεια στους υπολογισμούς.

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 εξιανικεύσεων που έχουν θεωρηθεί.





## Εξιδανικεύσεις & απλοποιήσεις κατά την ανάλυση κύκλων ισχύος:

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

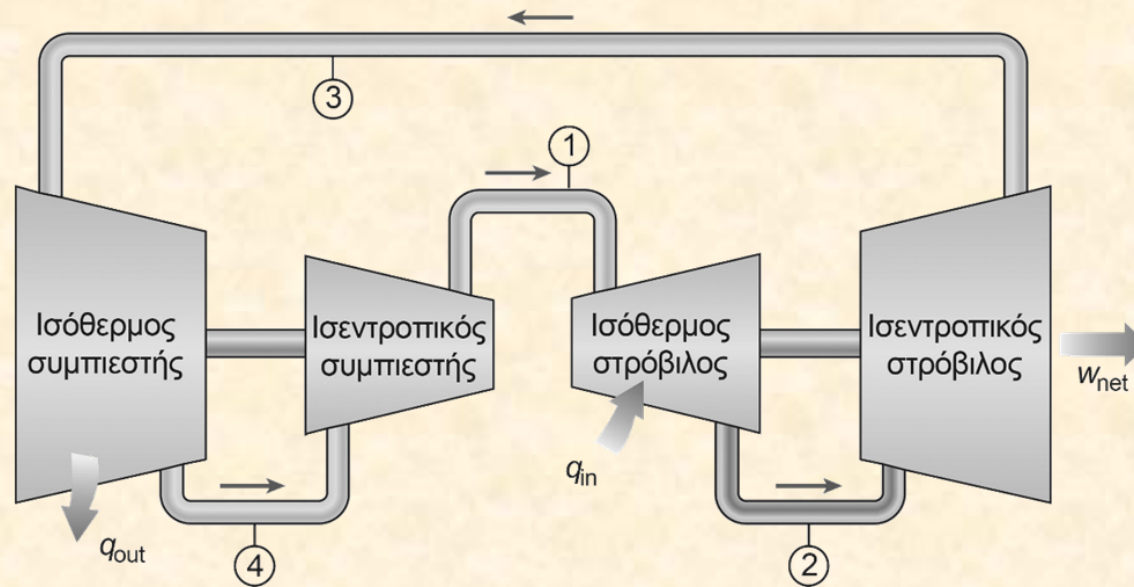
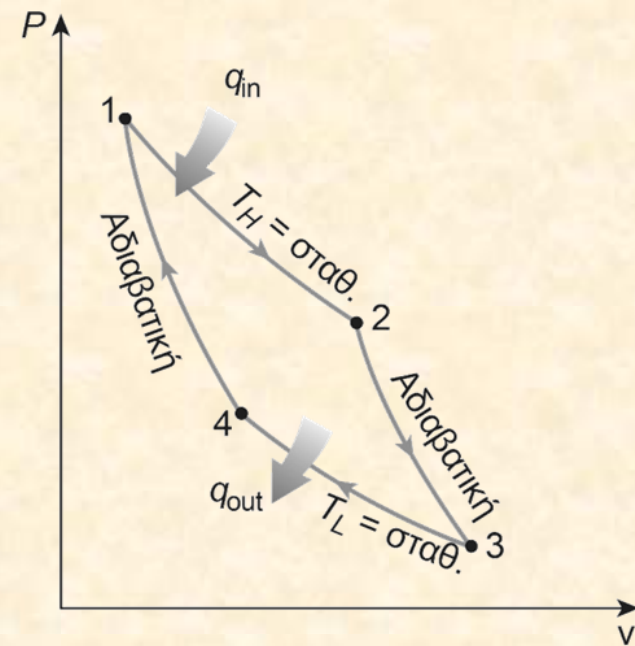
Στο διάγραμμα  $T-s$ , το κλάσμα του εμβαδού του κύκλου προς το εμβαδό της επιφάνειας κάτω από τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις διεργασίες πρόσδοσης θερμότητας, αναπαριστά τη θερμική απόδοση του κύκλου.

Κάθε τροποποίηση του κύκλου που αυξάνει το λόγο αυτών των δύο εμβαδών, αυξάνει επίσης τη θερμική απόδοση του κύκλου.

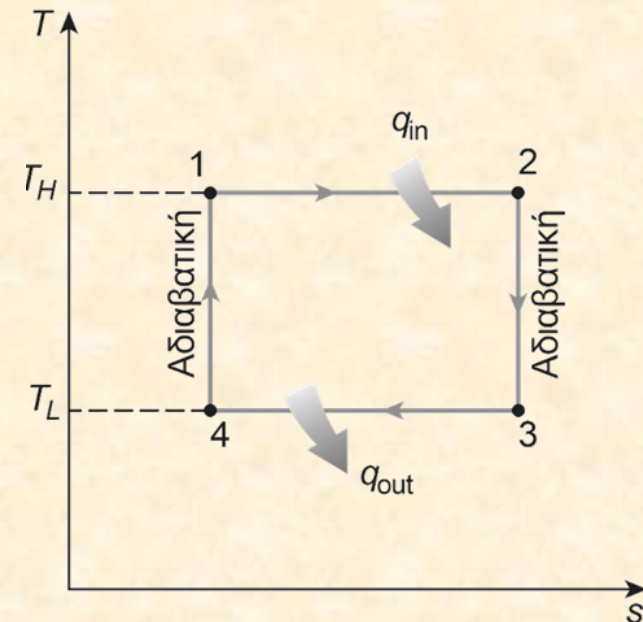
# Ο κύκλος Carnot κι η σημασία του

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

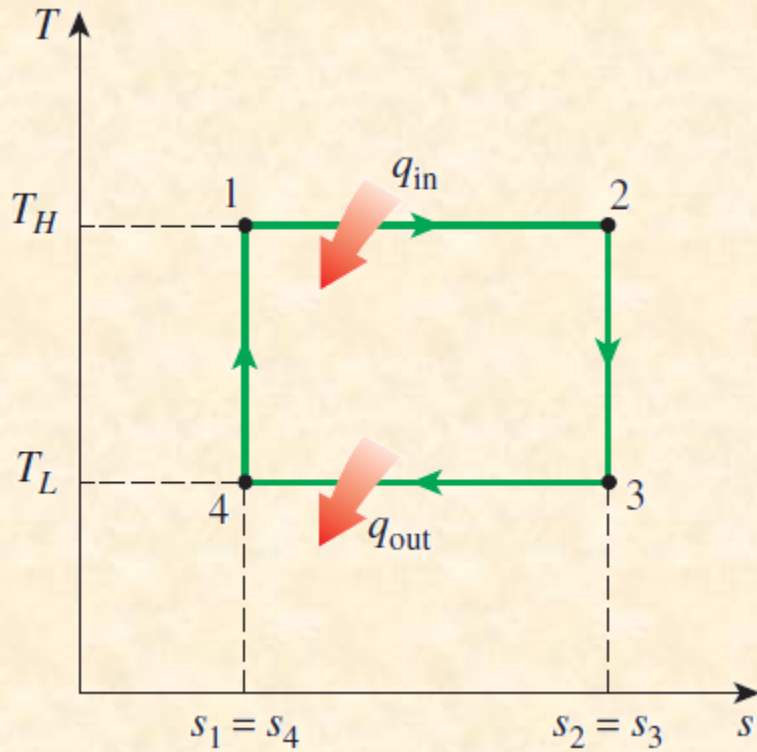
**Σε ιδανικούς και πραγματικούς κύκλους:** η θερμική απόδοση αυξάνεται αυξάνοντας τη μέση θερμοκρασία κατά την οποία προσδίδεται θερμότητα ή μειώνοντας τη μέση θερμοκρασία κατά την οποία απορρίπτεται θερμότητα.



Μηχανή Carnot σταθεροποιημένης ροής



# Απόδειξη του βαθμού απόδοσης του κύκλου Carnot



$$q_{\text{in}} = T_H(s_2 - s_1)$$

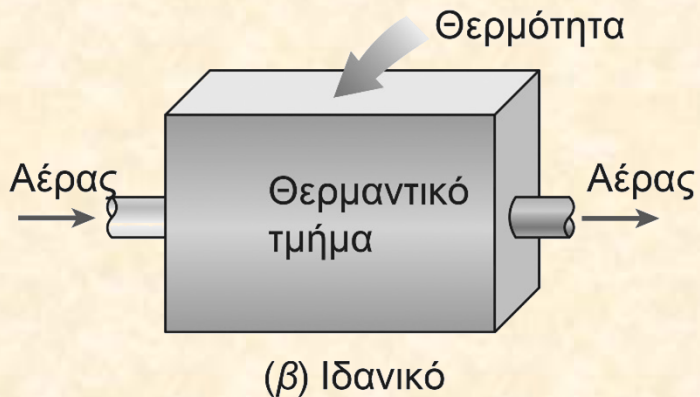
$$q_{\text{out}} = T_L(s_3 - s_4) = T_L(s_2 - s_1)$$

$$s_2 = s_3$$

$$s_4 = s_1$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_{\text{in}}} = 1 - \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{in}}} = 1 - \frac{T_L(s_2 - s_1)}{T_H(s_2 - s_1)} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

# Παραδοχές πρότυπου αέρα



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 τη καύσης αντικαθίσταται από μια διεργασία πρόδοσης 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 ( $25^{\circ}\text{C}$ ).

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

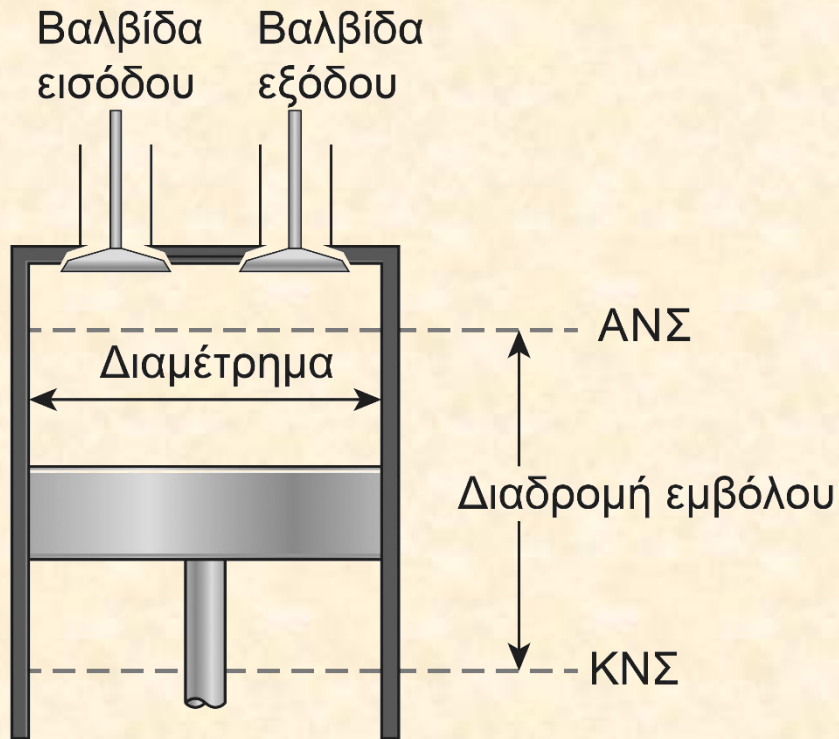


# Επισκόπηση των παλινδρομικών μηχανών

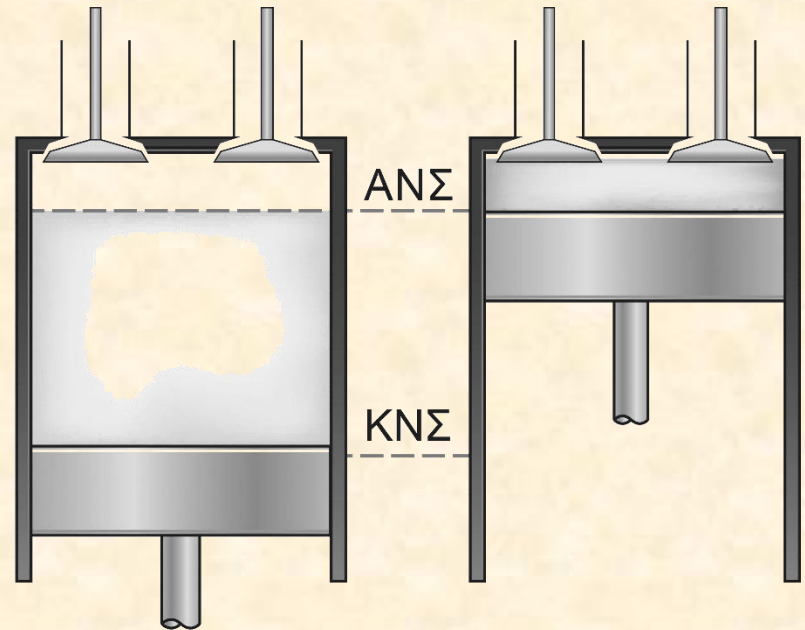
Λόγος συμπίεσης:

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

- Μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα
- Μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση

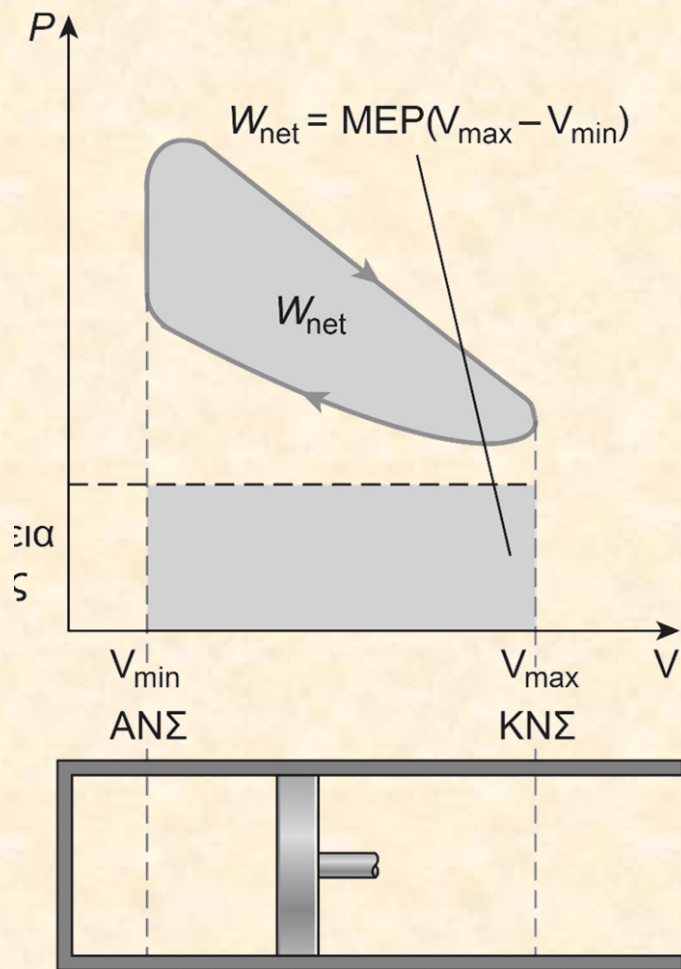


Ονοματολογία των παλινδρομικών μηχανών



Όγκος εμβολιασμού και νεκρός όγκος

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



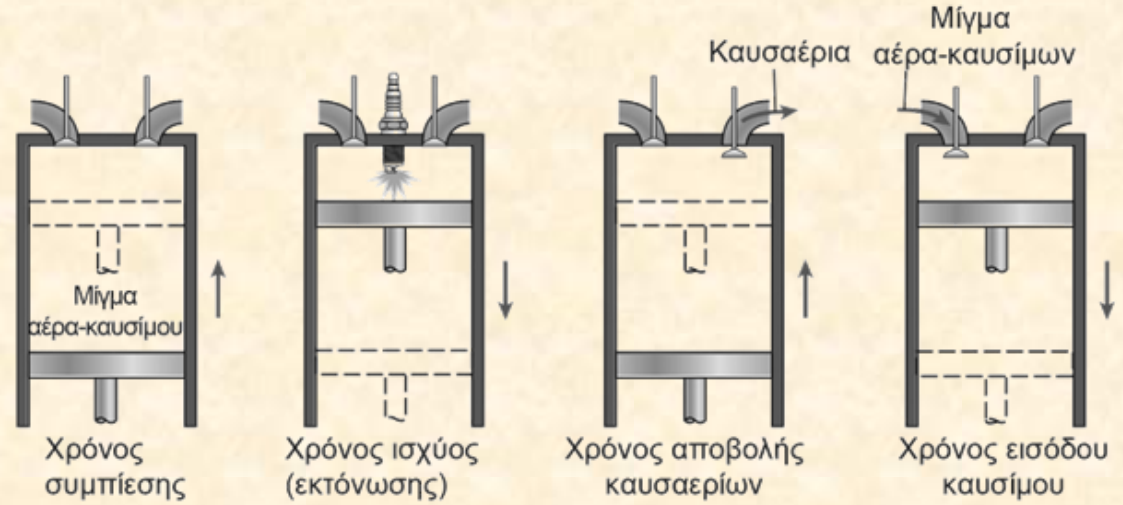
$$\text{MEP} = \frac{W_{\text{net}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} = \frac{w_{\text{net}}}{v_{\text{max}} - v_{\text{min}}}$$

### Μέση ενεργός πίεση

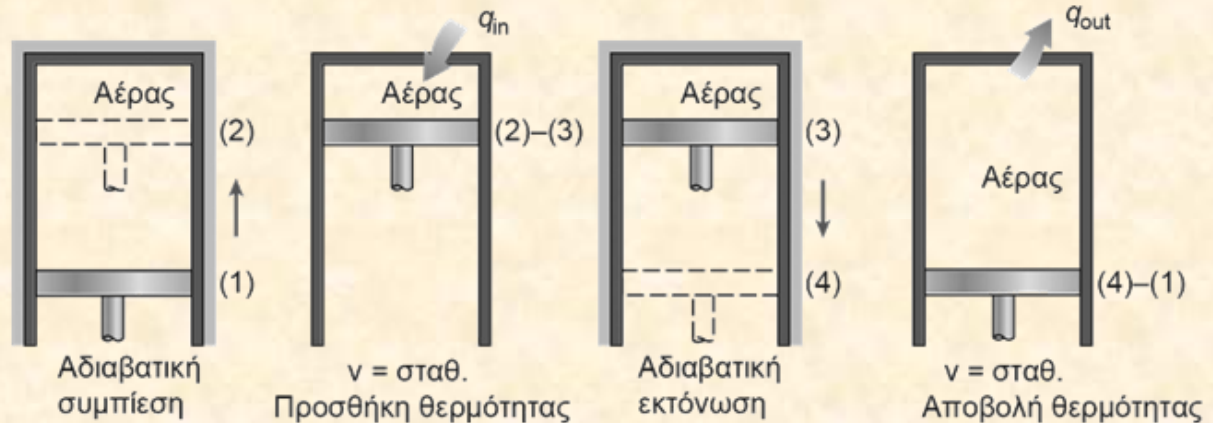
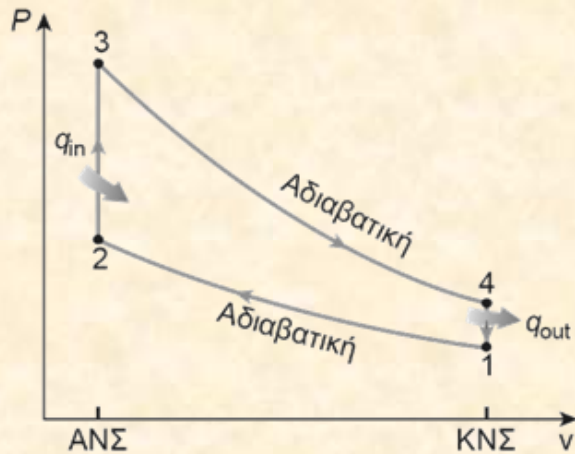
Η μέση ενεργός πίεση μπορεί να θεωρηθεί ως κριτήριο σύγκρισης της απόδοσης παλινδρομικών μηχανών του ίδιου μεγέθους.

Η μηχανή με την υψηλότερη μέση ενεργό πίεση αποδίδει περισσότερο έργο ανά κύκλο, άρα λειτουργεί πιο αποδοτικά.

# Κύκλος Otto: ο ιδανικός κύκλος μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα



(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.

## Τετράχρονη μηχανή

1 κύκλος = 4 διαδρομές = 2 στροφές

## Δίχρονη μηχανή

1 κύκλος = 2 διαδρομές = 1 στροφή

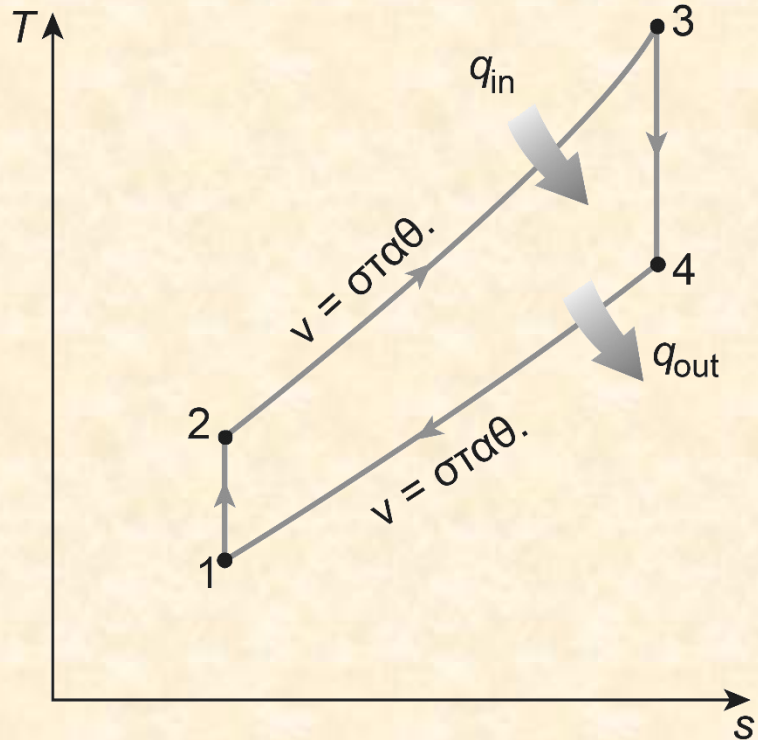
### Κύκλος Otto

1 – 2: Ισεντροπική συμπίεση

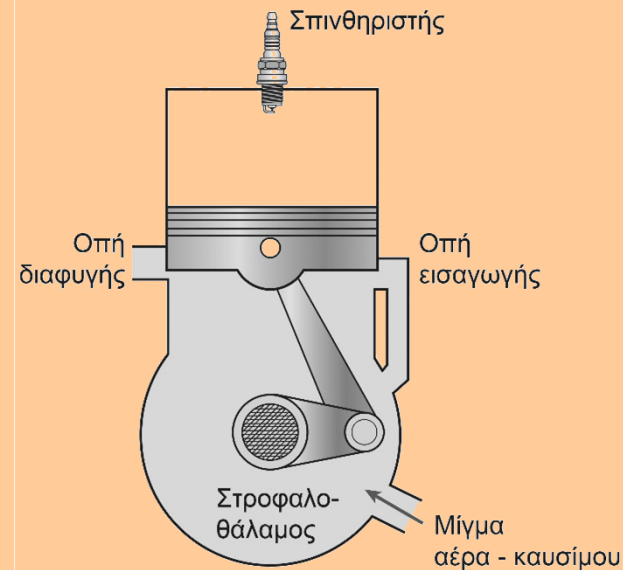
2 – 3: Ισόογκη θέρμανση

3 – 4: Ισεντροπική εκτόνωση

4 – 1: Ισόογκη ψύξη



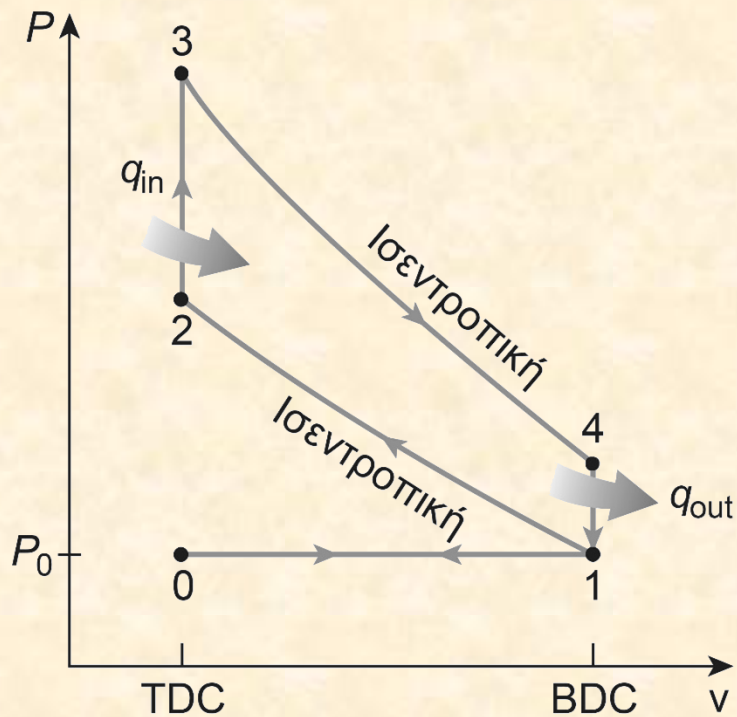
Οι δίχρονες μηχανές είναι γενικά λιγότερο αποδοτικές από τις τετράχρονες, αλλά είναι κατασκευαστικά απλούστερες και παρουσιάζουν υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος.



Σκαρίφημα δίχρονης παλινδρομικής μηχανής



Οι δίχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται συχνά σε δίκυκλα και σε χορτοκοπτικά μηχανήματα.



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

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

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

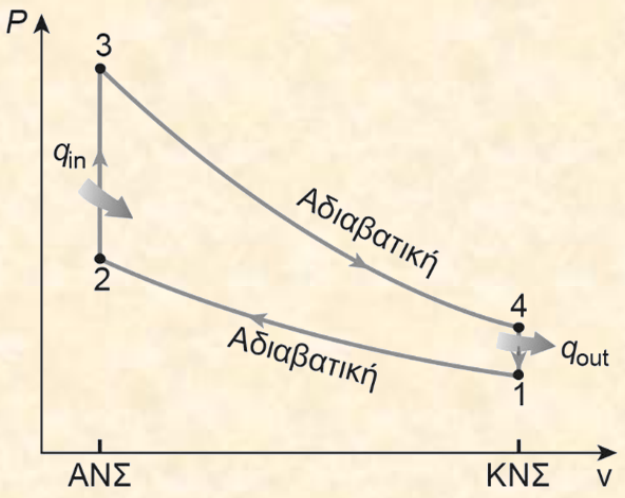
Ο αέρας εισέρχεται στον κύλινδρο μέσω της ανοιχτής βαλβίδας εισαγωγής υπό ατμοσφαιρική πίεση  $P_0$  (διεργασία 0-1), καθώς το έμβολο κινείται από το άνω νεκρό σημείο (TDC) προς το κάτω νεκρό σημείο (BDC).

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.



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

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

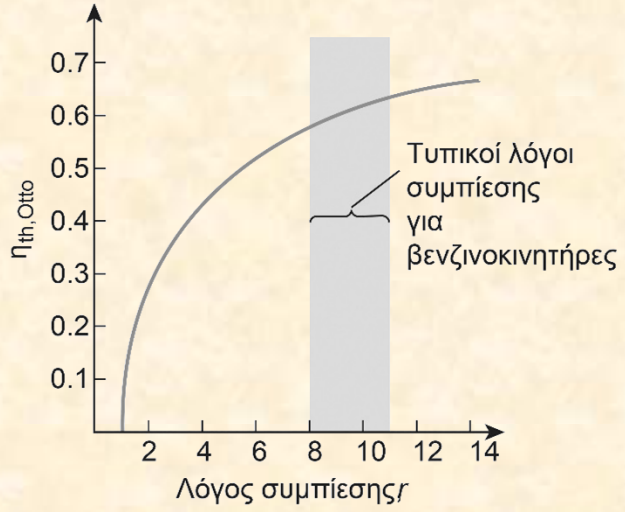
$$q_{out} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$$

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

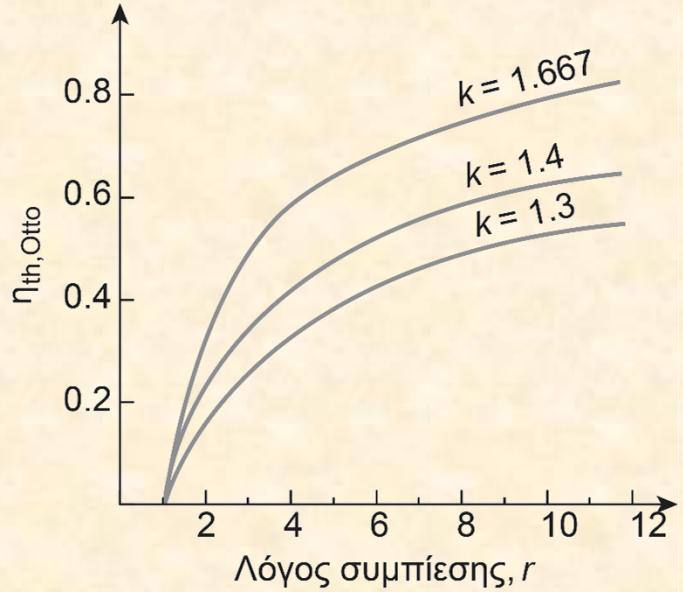
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

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

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



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

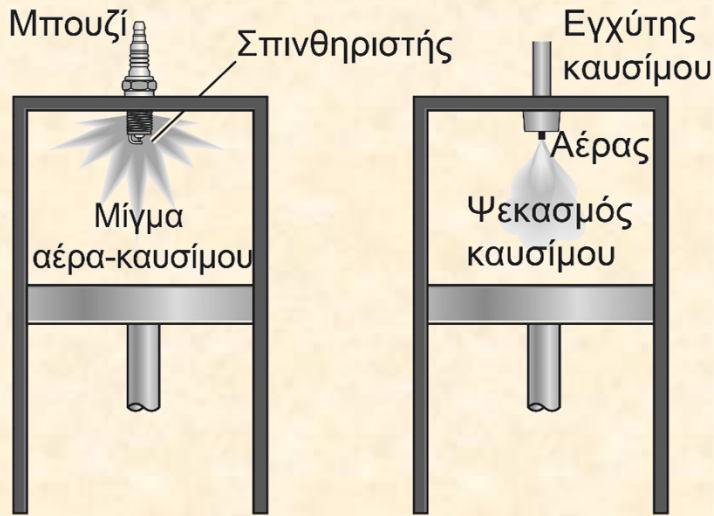


Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Otto αυξάνεται με το λόγο συμπίεσης.

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

# Κύκλος Diesel: ο ιδανικός κύκλος των μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση

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).

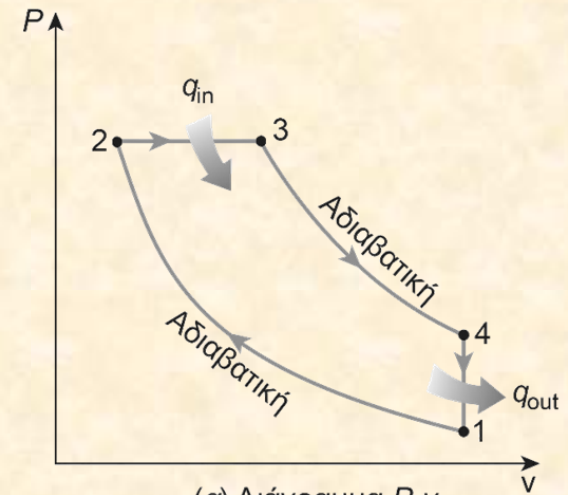


Βενζινοκινητήρας

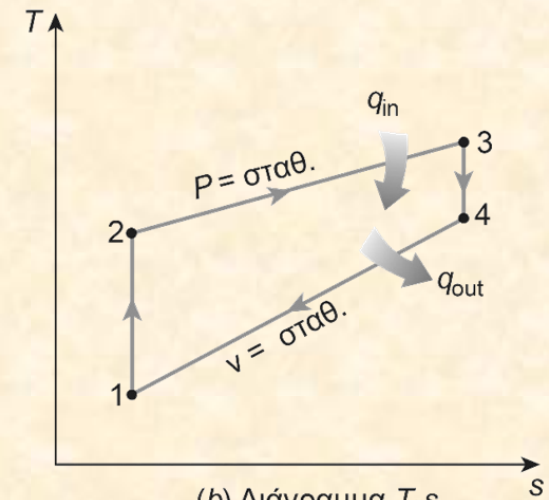
Κινητήρας Diesel

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.



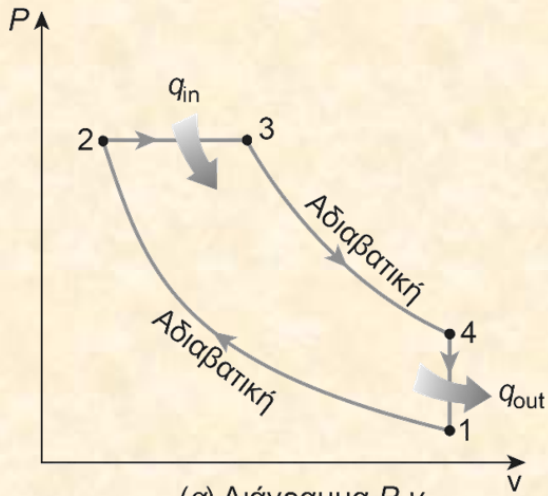
(α) Διάγραμμα P-v



(β) Διάγραμμα T-s

Ιδανικός κύκλος Diesel





(α) Διάγραμμα P-v

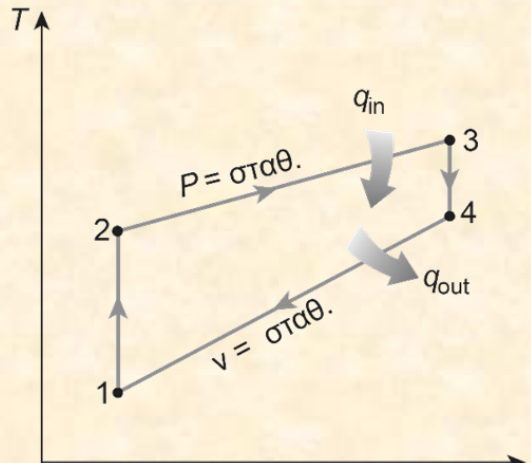
$$q_{in} - w_{b,out} = u_3 - u_2 \rightarrow q_{in} = P_2(v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

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

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

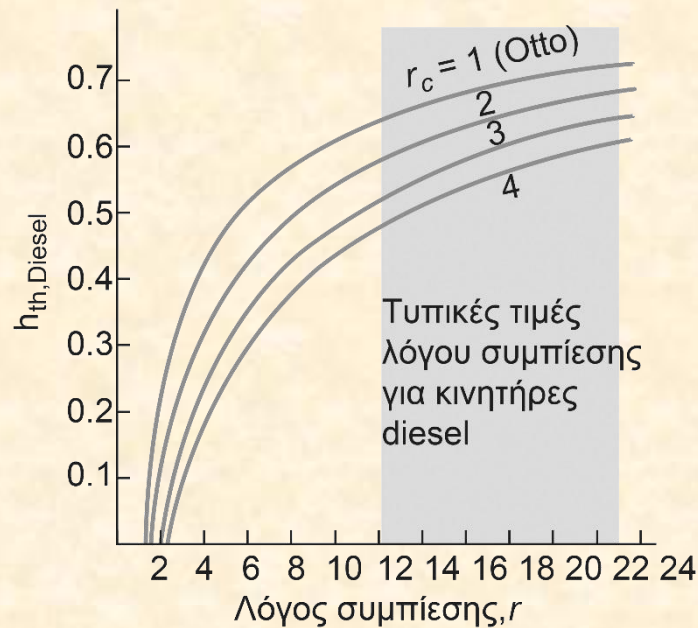
$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} \quad \text{Λόγος αποκοπής}$$

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



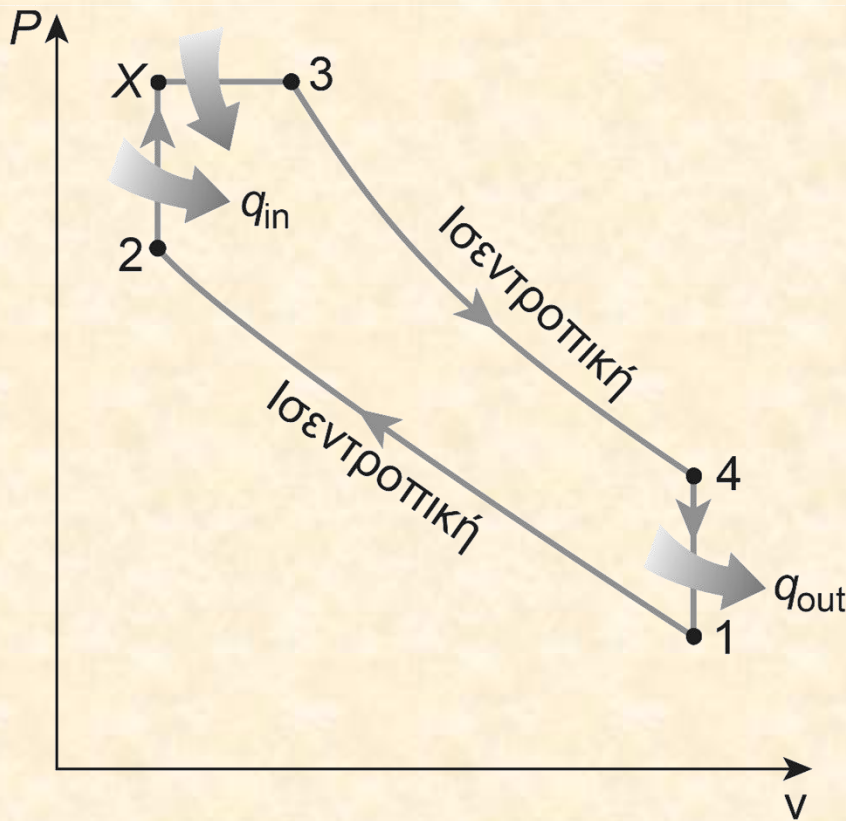
(β) Διάγραμμα T-s

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



Θερμική απόδοση ενός ιδανικού κύκλου Diesel συναρτήσεως των λόγων συμπίεσεως και αποκοπής ( $k=1.4$ ).

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



Διάγραμμα  $P$ - $v$  ιδανικού διπλού κύκλου

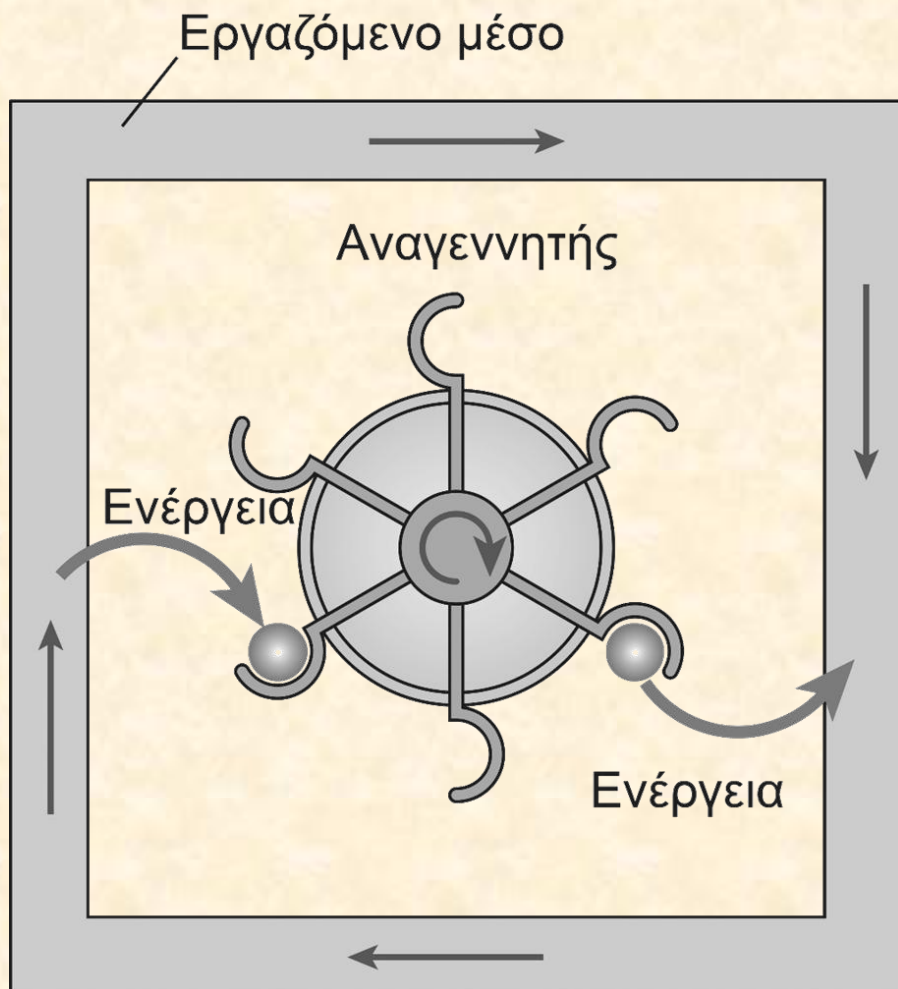
Στους σύγχρονους ταχύστροφους κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση, το καύσιμο εγχύεται στο θάλαμο καύσης πολύ νωρίτερα σε σχέση με τις πρώιμες μηχανές Diesel.

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.

# Κύκλοι Stirling & Ericsson



## Κύκλος Stirling

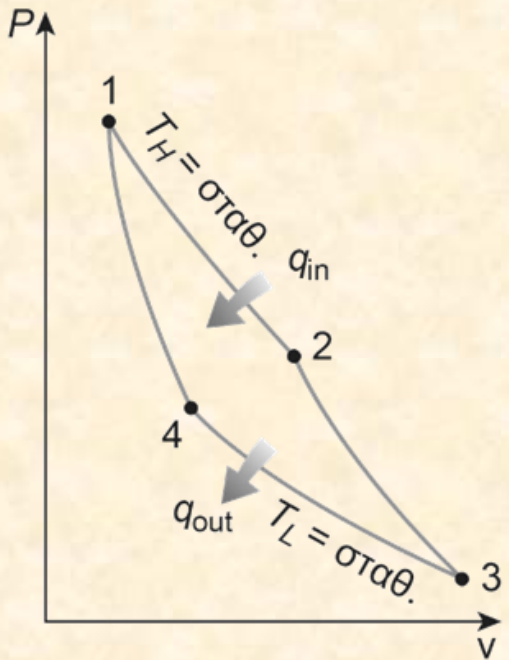
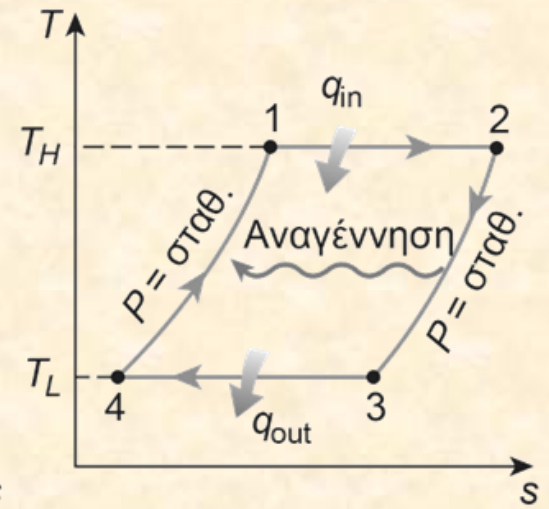
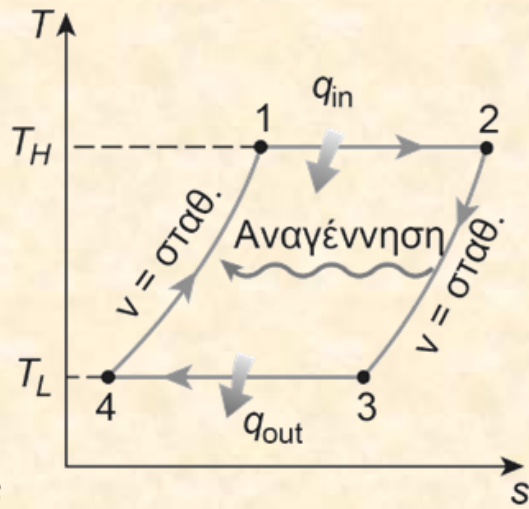
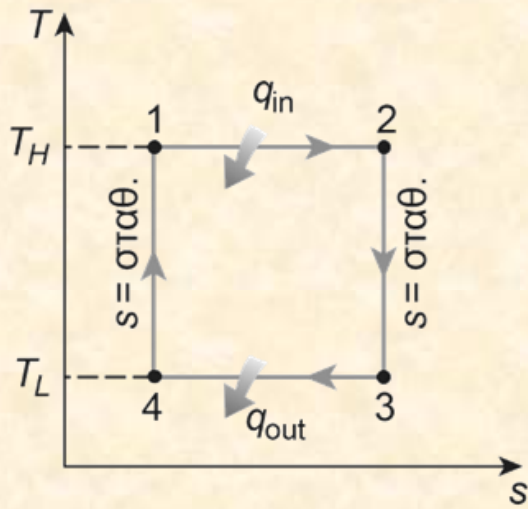
**1-2** *Ισοθερμοκρασιακή* εκτόνωση  
(πρόσδοση θερμότητας από  
εξωτερική πηγή)

**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)

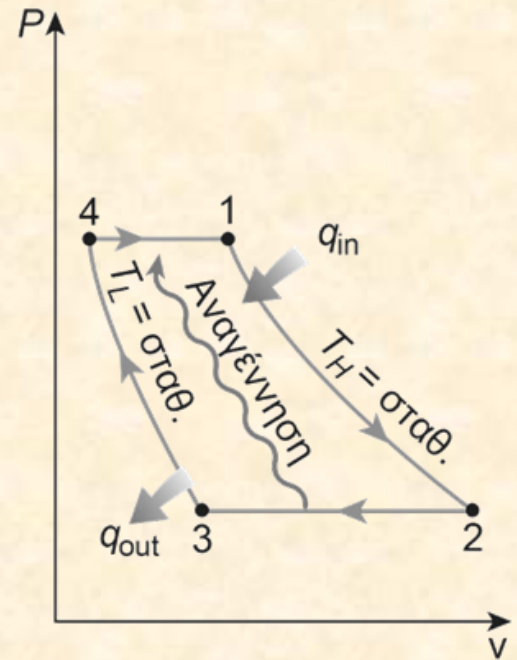
Ο αναγεννητής είναι μια συσκευή, η οποία δανείζεται ενέργεια από το εργαζόμενο μέσο κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας του κύκλου και την επιστρέφει κατά τη διάρκεια μιας άλλης διεργασίας του κύκλου.



(α) Κύκλος Carnot

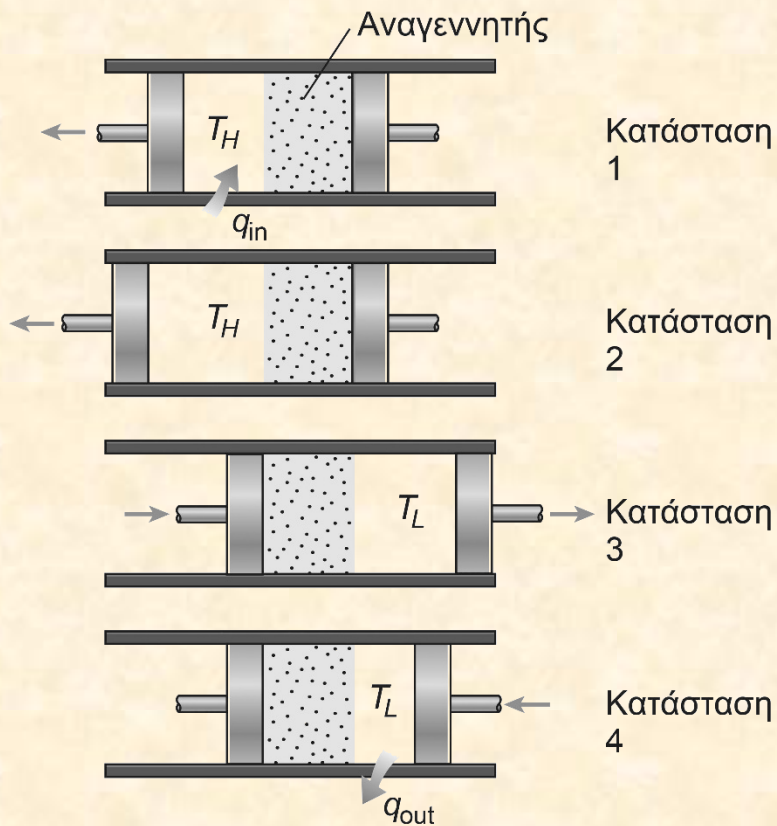


(β) Κύκλος Stirling



(γ) Κύκλος Ericsson

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



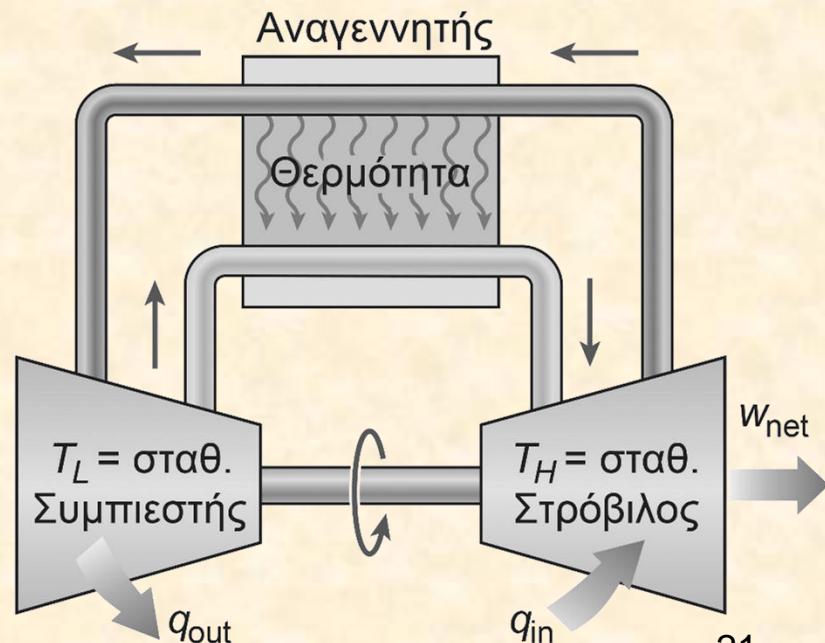
Διεξαγωγή του κύκλου Stirling

Μηχανή Ericsson σταθεροποιημένης ροής

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.



# Κύκλος Brayton: ο ιδανικός κύκλος των αεριοστροβίλων

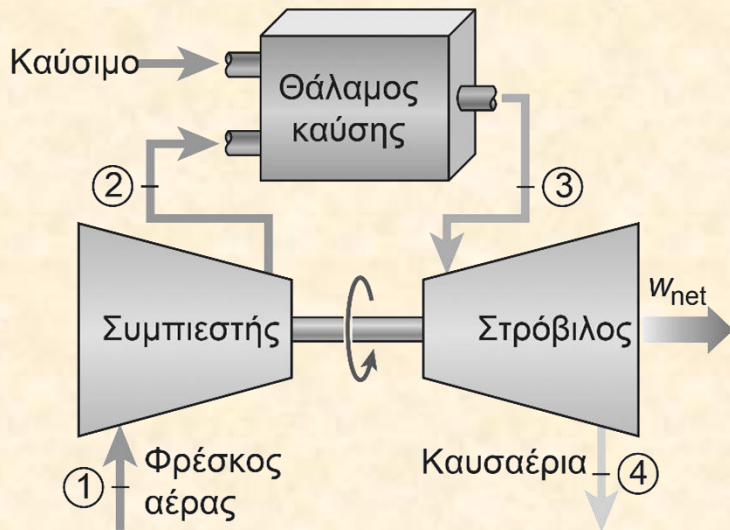
Η διεργασία της καύσης αντικαθίσταται από μια διεργασία ισόθλιπτης θέρμανσης από μια εξωτερική πηγή κι η διεργασία της εξαγωγής των καυσαερίων από μια διεργασία ισόθλιπτης απόρριψης θερμότητας στον αέρα περιβάλλοντος.

1-2 Ισεντροπική συμπίεση (σε έναν συμπιεστή)

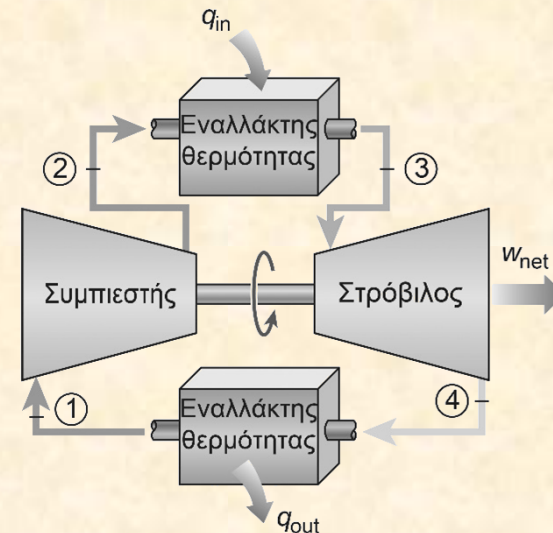
2-3 Ισόθλιπτη θέρμανση

3-4 Ισεντροπική εκτόνωση (σε ένα στρόβιλο)

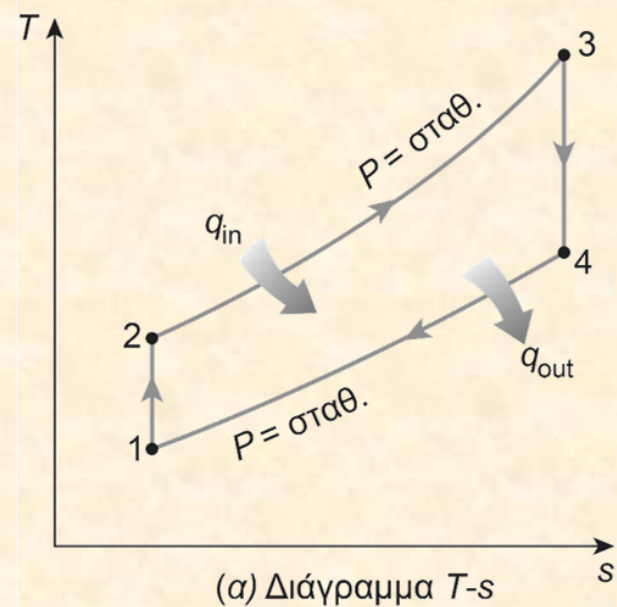
4-1 Ισόθλιπτη ψύξη



Ανοιχτός κύκλος Brayton



Κλειστός κύκλος Brayton



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

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

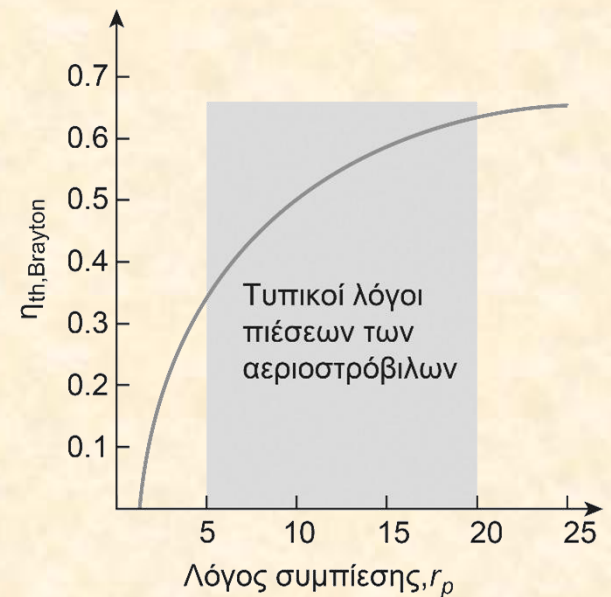
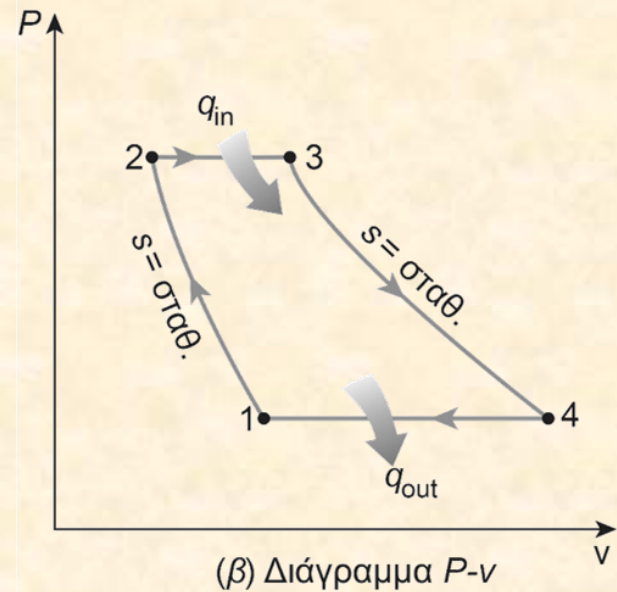
$$q_{out} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$

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

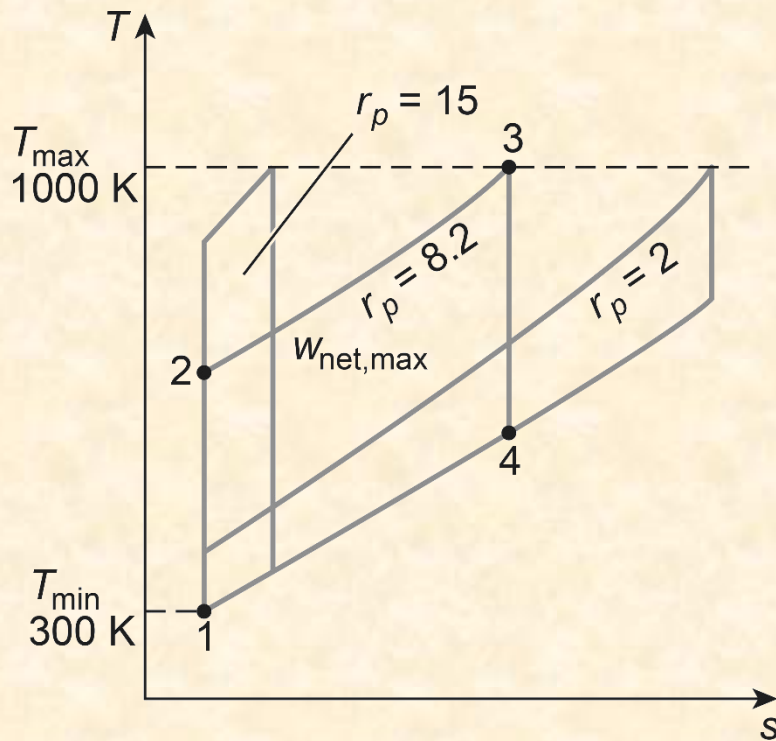
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \text{ Λόγος συμπίεσης}$$

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



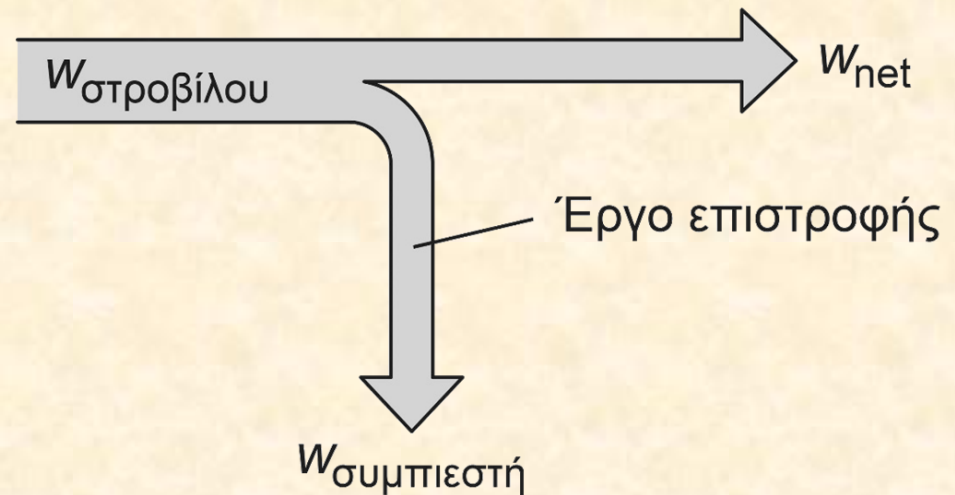
Οι κύριες εφαρμογές των αεριοστροβίλων είναι **η προώθηση αεροσκαφών** και **η ηλεκτροπαραγωγή**.



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 συμπιεστή καλείται λόγος επιστροφής έργου



# Βελτίωση των στροβιλομηχανών

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

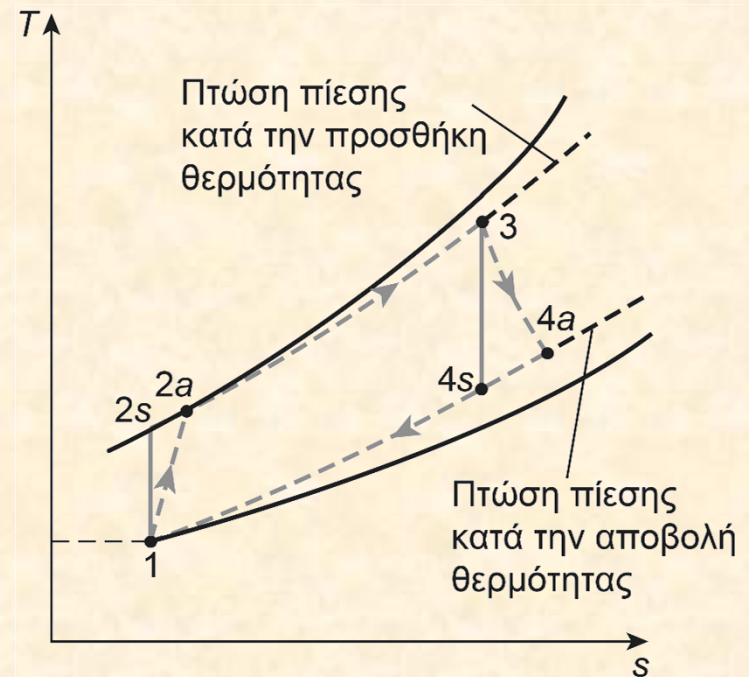
## Απόκλιση των πραγματικών στροβιλομηχανών από τις ιδανικές

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

Ισεντροπικές αποδόσεις συμπιεστή & στροβίλου

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

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



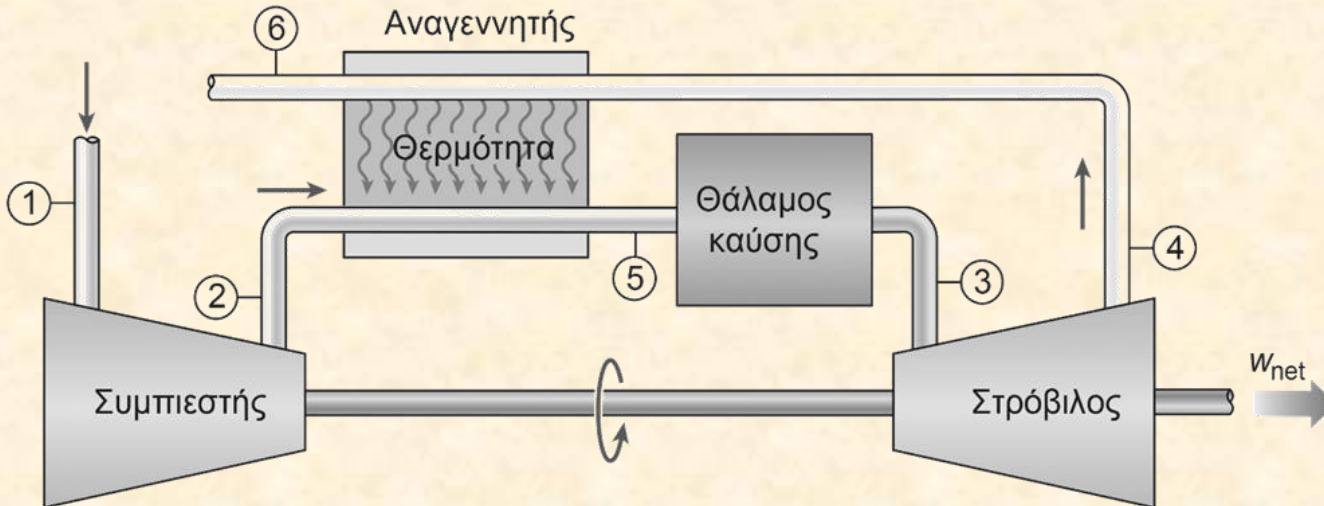
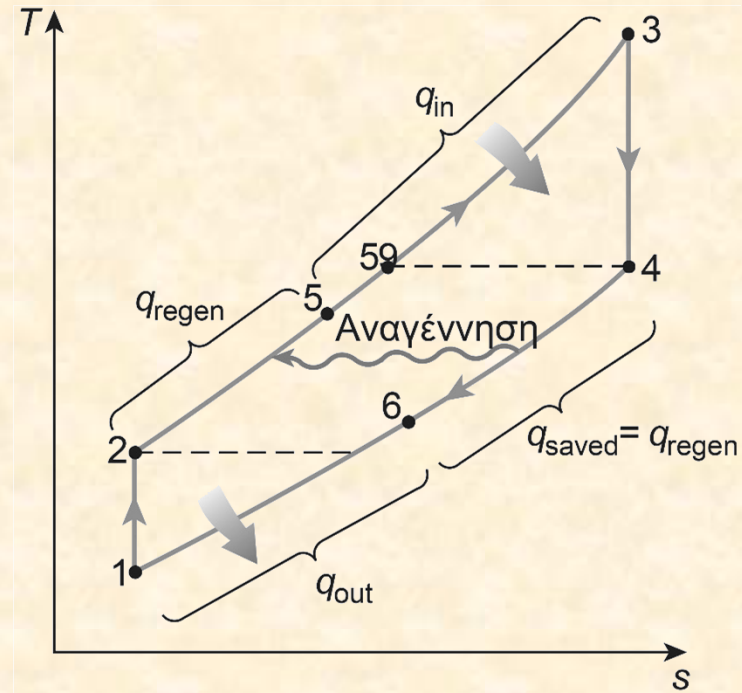
Απόκλιση του πραγματικού κύκλου αεριστροβίλου από τον ιδανικό κύκλο Brayton, συνεπεία αναντιστρεπτοτήτων

# Κύκλος Brayton με αναγέννηση

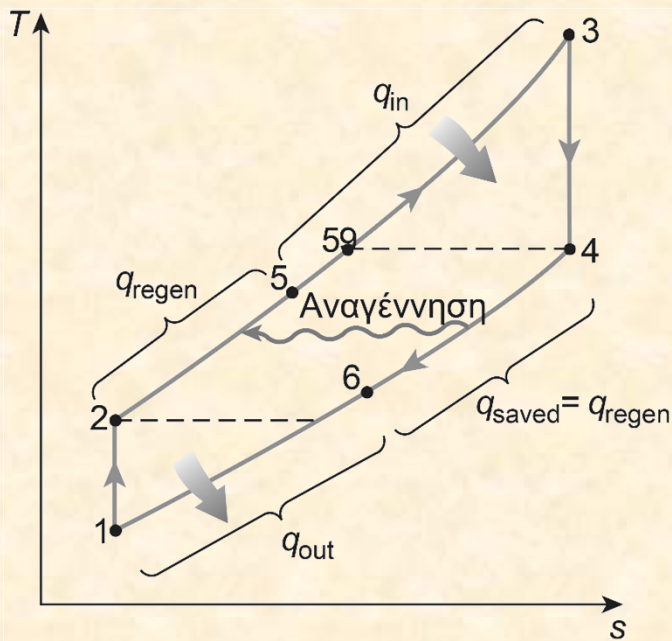
Στις στροβιλομηχανές, η θερμοκρασία των καυσαερίων, όταν αυτά εξέρχονται του στροβίλου, είναι σημαντικά υψηλότερη της θερμοκρασίας του αέρα, όταν αυτός εξέρχεται του συμπιεστή..

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.



Αεριοστρόβιλος με αναγεννητή



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

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

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

$$\epsilon \cong \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \quad \text{Αποτελεσματικότητα αναγεννητή υπό παραδοχές πρότυπου ψυχρού αέρα}$$

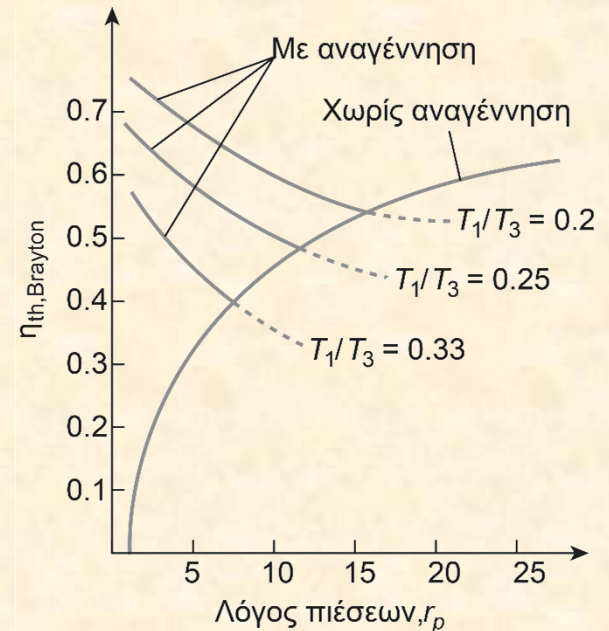
$$\eta_{\text{th,regen}} = 1 - \left( \frac{T_1}{T_3} \right) (r_p)^{(k-1)/k}$$

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.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάκτηση σε υψηλές πιέσεις;

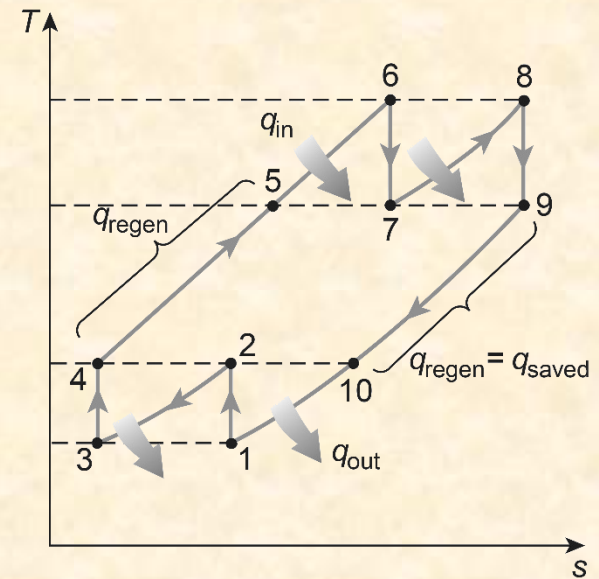
Θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Brayton με και χωρίς αναγέννηση



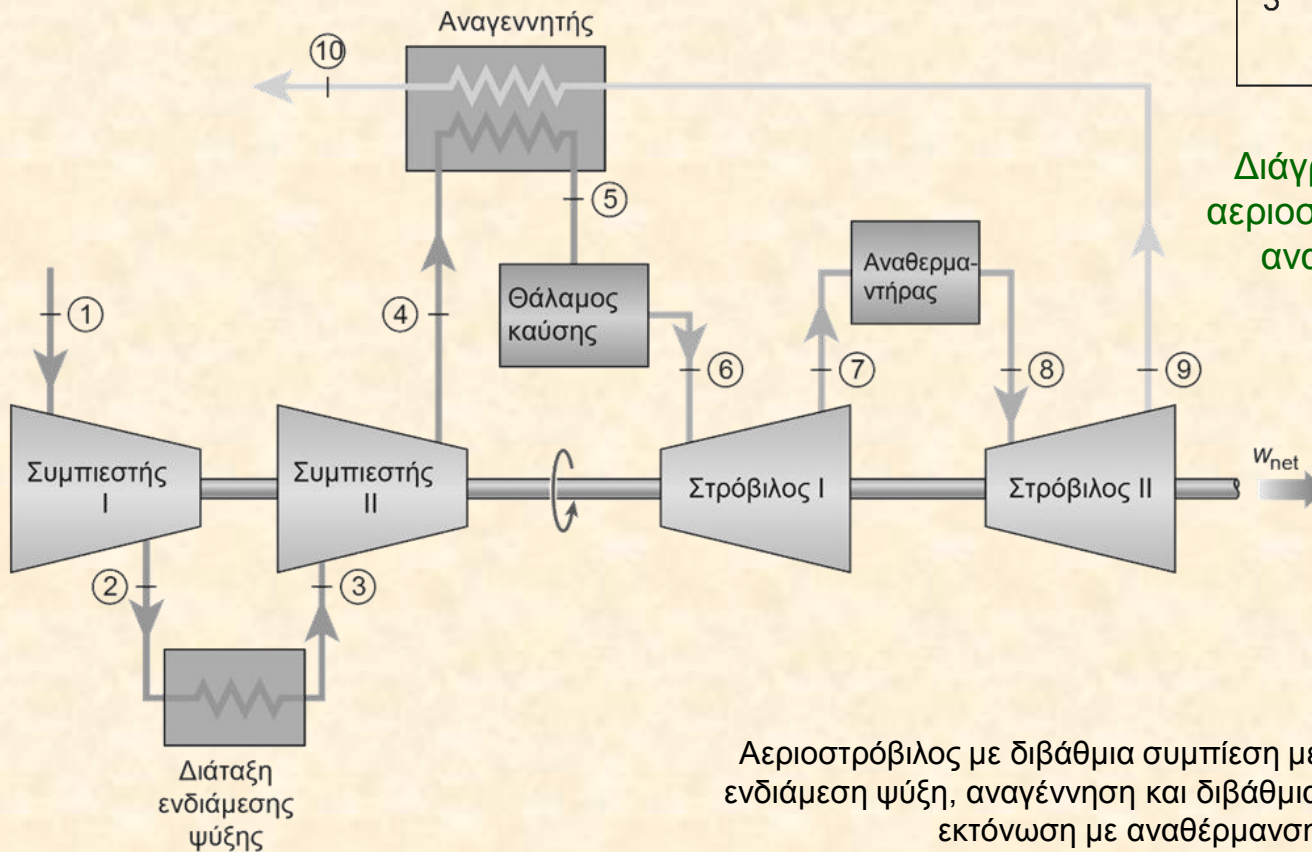
# Κύκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση και αναθέρμανση

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 αεροστροβίλου με ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση & αναθέρμανση.

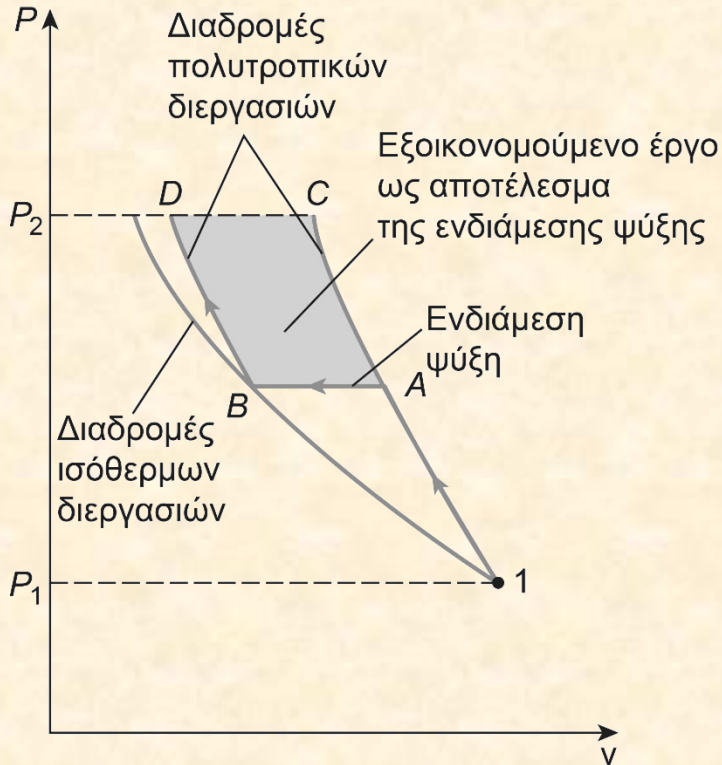


Αεροστροβίλος με διβάθμια συμπίεση με ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση και διβάθμια εκτόνωση με αναθέρμανση

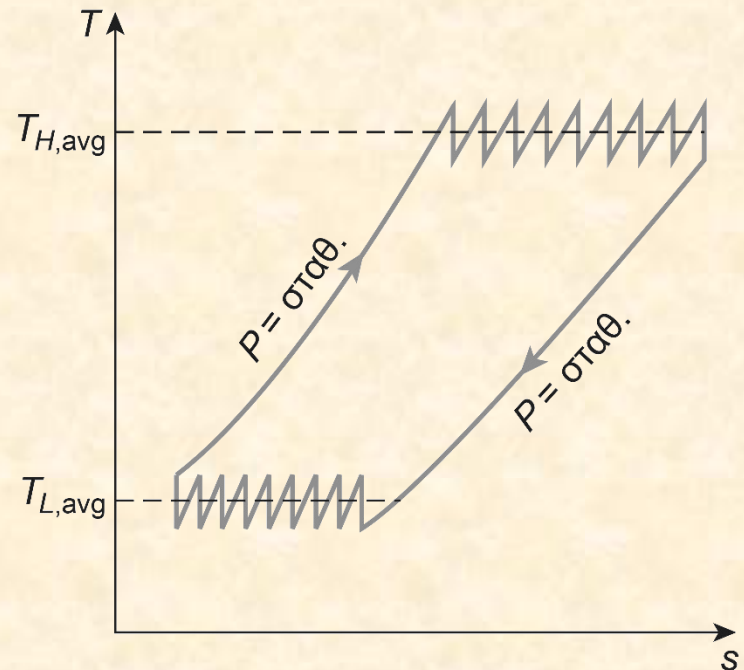
**Πολυβάθμια συμπίεση με ενδιάμεση ψύξη:** Το έργο που απαιτείται για τη συμπίεση ενός αερίου μεταξύ δύο δεδομένων πιέσεων μπορεί να μειωθεί, αν η συμπίεση γίνεται κατά βαθμίδες και με ενδιάμεση ψύξη του αερίου μεταξύ δύο διαδοχικών βαθμίδων. Με τον τρόπο αυτό, ο ειδικός όγκος διατηρείται όσο το δυνατό 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;**



Σύγκριση των έργων εισόδου ενός μονοβάθμιου συμπιεστή (1AC) κι ενός διβάθμιου συμπιεστή με ενδιάμεση ψύξη (1ABD)



Καθώς αυξάνεται το πλήθος των βαθμίδων συμπίεσης & εκτόνωσης, ο κύκλος Brayton προσεγγίζει τον κύκλο Ericsson.

# Ιδανικοί κύκλοι αεριοπρώθησης

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 αεριοπρώθησης**.

Ο ιδανικός κύκλος αεριοπρώθησης 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 αεριοπρώθησης είναι μηδενικό. Τα καυσαέρια εξέρχονται του στρόβιλου 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**).



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

# Ώση

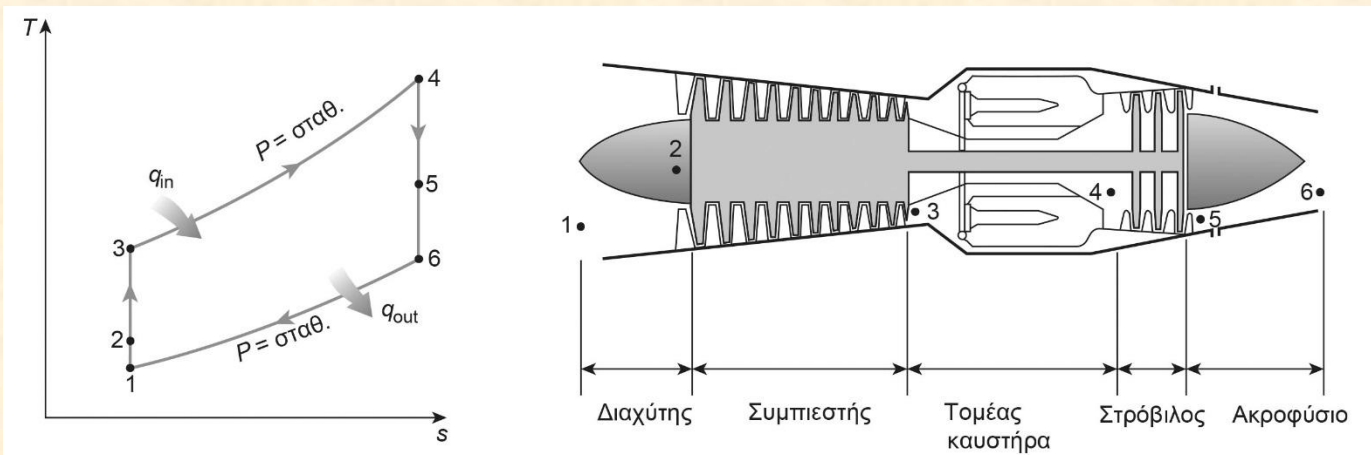
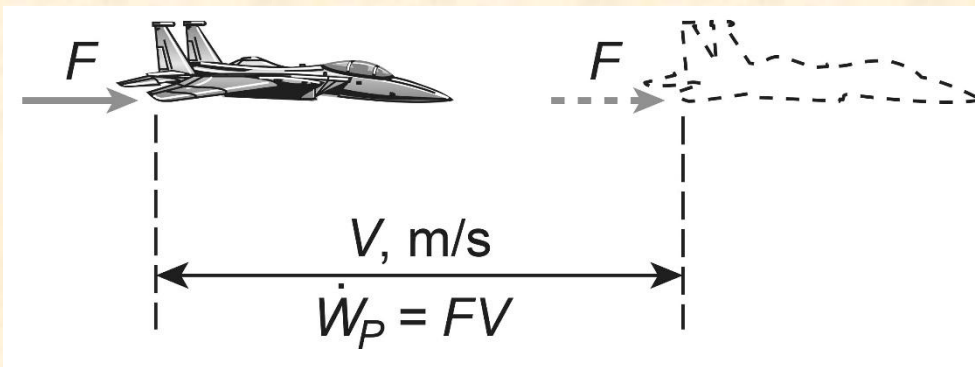
$$F = (\dot{m}V)_{\text{exit}} - (\dot{m}V)_{\text{inlet}} = \dot{m}(V_{\text{exit}} - V_{\text{inlet}}) \quad (\text{N})$$

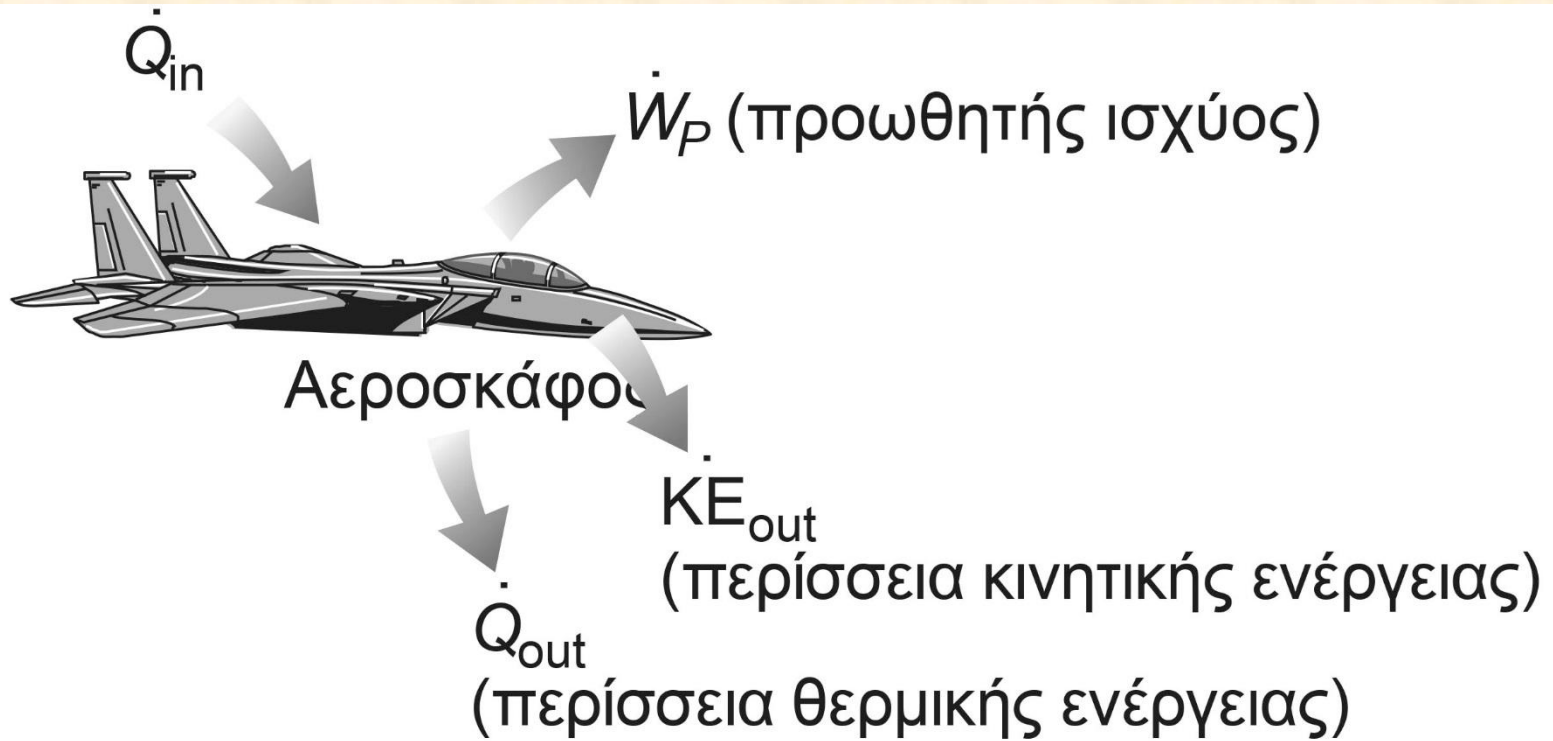
Πρωθητική απόδοση:

# Πρωθητική ισχύς

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

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





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



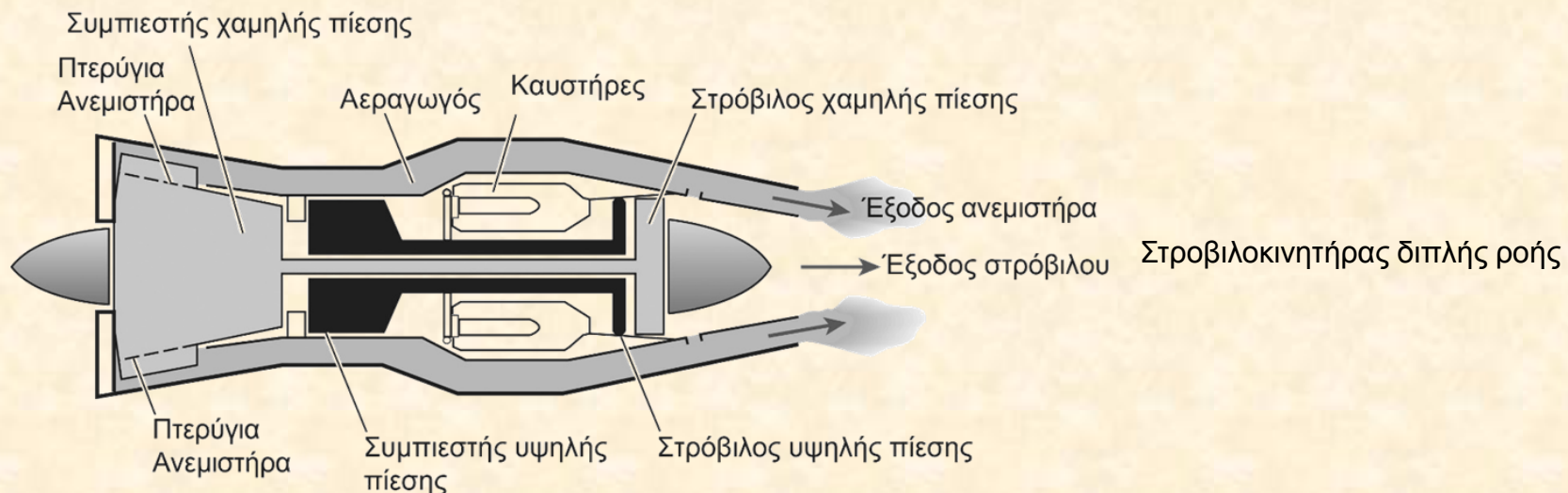
# Τροποποιήσεις των μηχανών Turbojet

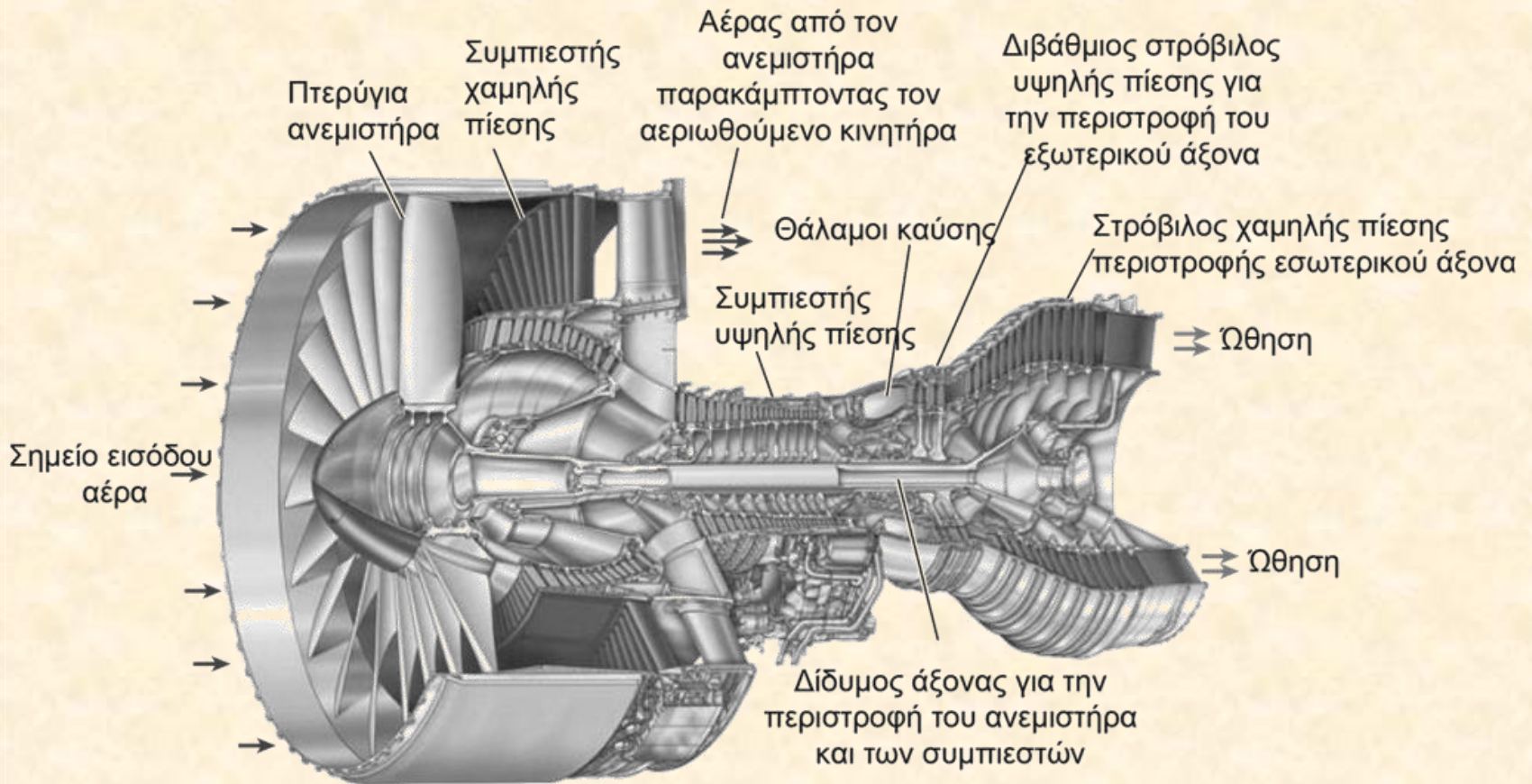
Τα πρώτα αεροσκάφη ήταν όλα ελικοφόρα κι οι έλικες οδηγούνται από κινητήρες όμοιους με τους κινητήρες των αυτοκινήτων.

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**.

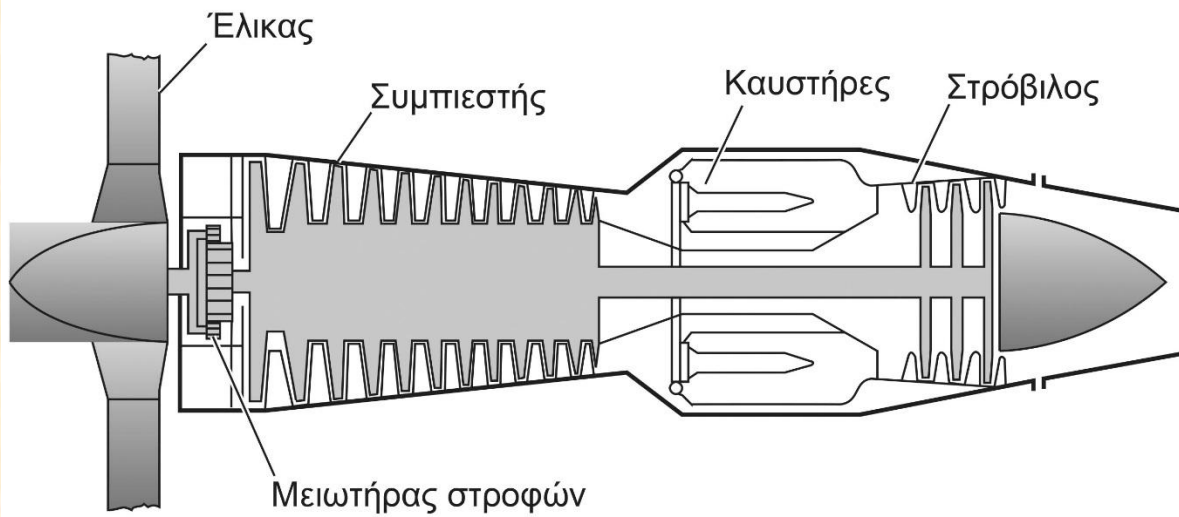
Ο συχνότερα χρησιμοποιούμενος κινητήρας για την προώθηση αεροσκαφών είναι ο **turbofan** (or *fanjet*), όπου ένας μεγάλος ανεμιστήρας, οδηγούμενος από το στρόβιλο, οδηγεί μια σημαντική ποσότητα αέρα μέσω ενός κοιλώματος που περιβάλλει τον κινητήρα.



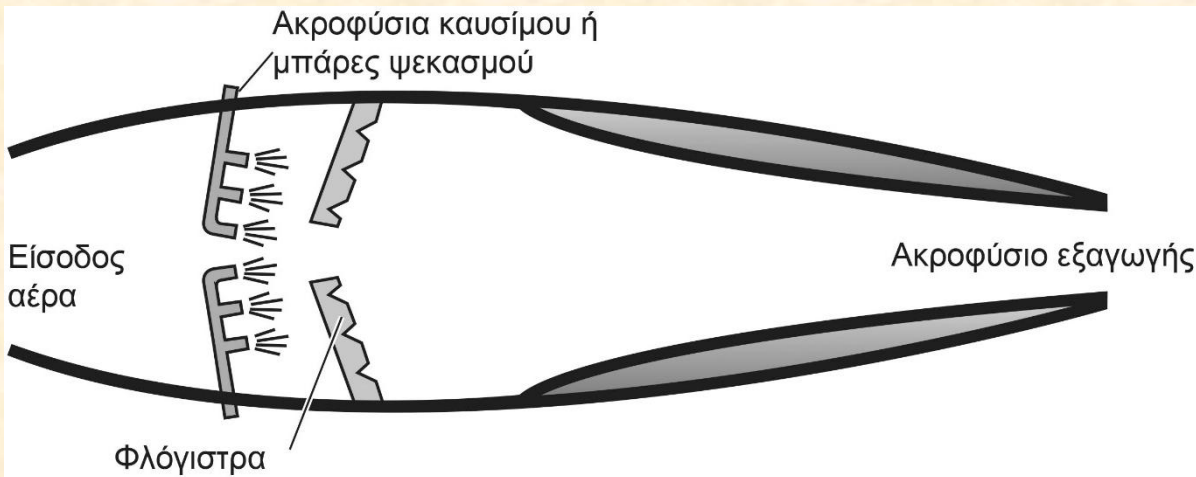


Σύγχρονος αεριωθούμενος κινητήρας, που χρησιμοποιείται για την κίνηση αεροσκαφών Boeing 777. Με μήκος 4,87m, διάμετρο πτερυγίων 2,84m και βάρος 6.800kg, παράγει 30.000kg<sub>f</sub> ώσης.

# Διάφοροι τύποι κινητήρων: Turbofan, Propjet, Ramjet, Sacramjet, Rocket



Turboprop



Κινητήρας Ramjet

# Ανάλυση κύκλων ισχύος βάσει του Δεύτερου Νόμου

$$X_{\text{dest}} = T_0 S_{\text{gen}} = T_0 (\Delta S_{\text{sys}} - S_{\text{in}} + S_{\text{out}})$$
$$= T_0 \left[ (S_2 - S_1)_{\text{sys}} - \frac{Q_{\text{in}}}{T_{b,\text{in}}} + \frac{Q_{\text{out}}}{T_{b,\text{out}}} \right] \quad (\text{kJ}) \quad \text{Καταστροφή εξέργειας σε κλειστό σύστημα}$$

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

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

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

$$x_{\text{dest}} = T_0 \left( \frac{q_{\text{out}}}{T_L} - \frac{q_{\text{in}}}{T_H} \right) \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Σε κύκλο με μόνο 2 θερμοδοχεία}$$

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

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

Ανάλυση των κύκλων αυτών βάσει του Δεύτερου Νόμου αποκαλύπτει που εμφανίζονται οι υψηλές αναντιστρεπτότητες, άρα και που πρέπει να γίνουν οι ανάλογες βελτιώσεις.

# Περίληψη

- Βασική ανάλυση των κύκλων ισχύος αερίου
- Ο κύκλος Carnot κι η σημασία του
- Παραδοχές πρότυπου αέρα
- Επισκόπηση των παλινδρομικών μηχανών
- Κύκλος Otto: ο ιδανικός κύκλος των μηχανών ανάφλεξης με σπινθήρα
- Κύκλος Diesel: ο ιδανικός κύκλος των μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση
- Κύκλοι Stirling και Ericsson
- Κύκλος Brayton: Ο ιδανικός κύκλος των αεριοστροβίλων
- Κύκλος Brayton με αναγέννηση
- Κύκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη, αναγέννηση κι αναθέρμανση
- Ιδανικοί κύκλοι αεριοπροώθησης
- Ανάλυση των κύκλων ισχύος αερίου βάσει του Δευτέρου Νόμου