



ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Ι

4^ο Εξάμηνο

ΜΑΘΗΜΑ 1^ο

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΚΟΡΩΝΑΚΗ ΕΙΡΗΝΗ

ΛΕΚΤΟΡΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ

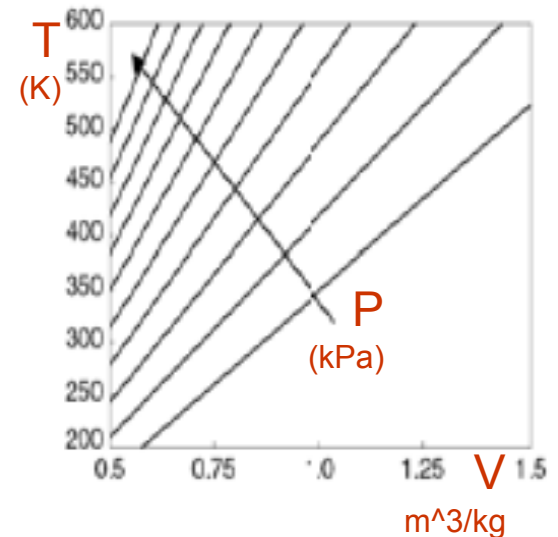
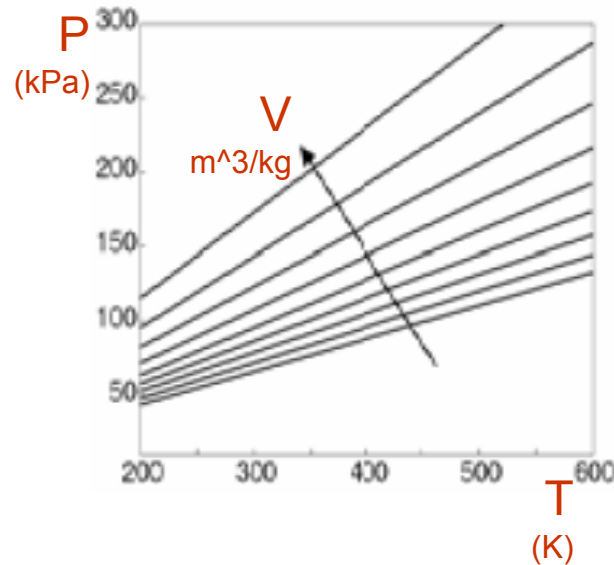
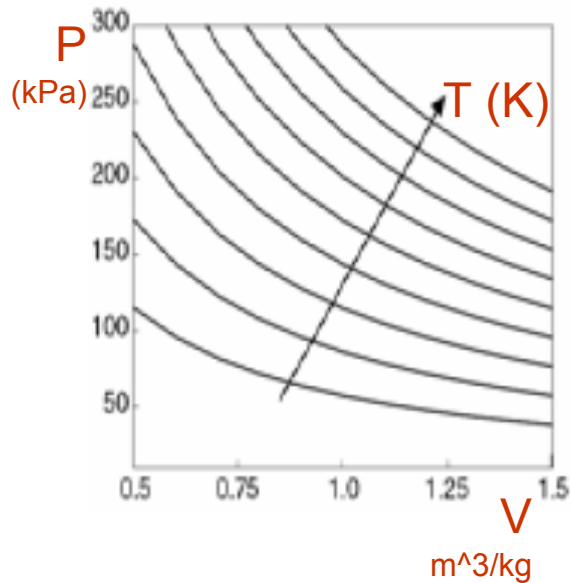
ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

Για θερμοδυναμικές μεταβολές μας ενδιαφέρει πως αλλάζει η κατάσταση του ρευστού (και όχι μόνο οι τελικές καταστάσεις).

Για τον λόγο αυτό αναπαριστούμε την μεταβολή σε διαγράμματα.

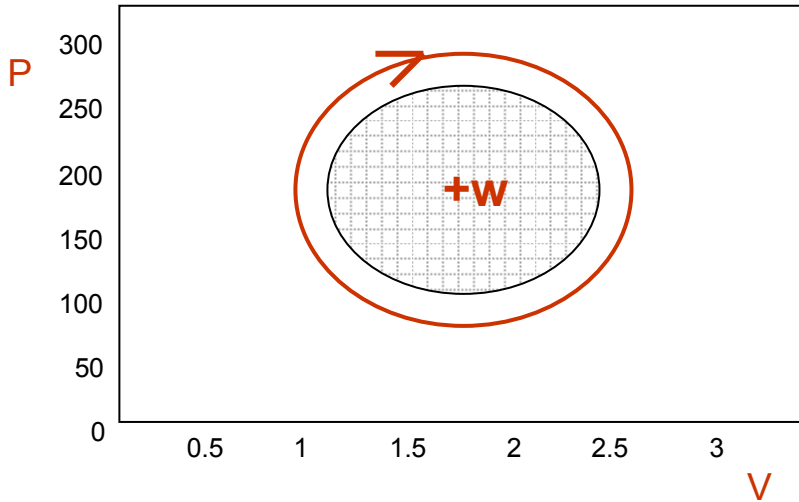


Διαφορά αδιαβατικής και ισεντροπικής μεταβολής.

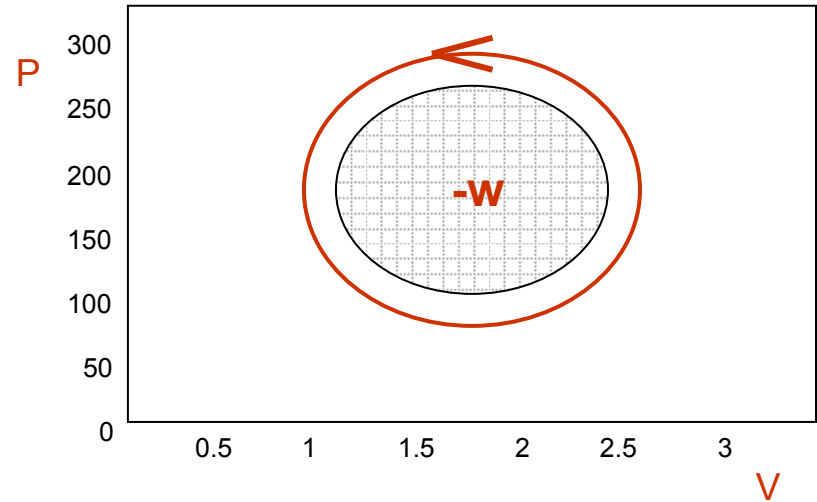
- Αδιαβατική σημαίνει ότι δεν συναλλάσει θερμότητα με το περιβάλλον.
- Ισεντροπική σημαίνει ότι δεν συναλλάσει θερμότητα με το περιβάλλον και επιπλέον είναι και αντιστρεπτή (δεν υπάρχουν εσωτερικές απώλειες).

Για αυτό την λέμε και “αδιαβατική πλήρως αντιστρεπτή”

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ P-V

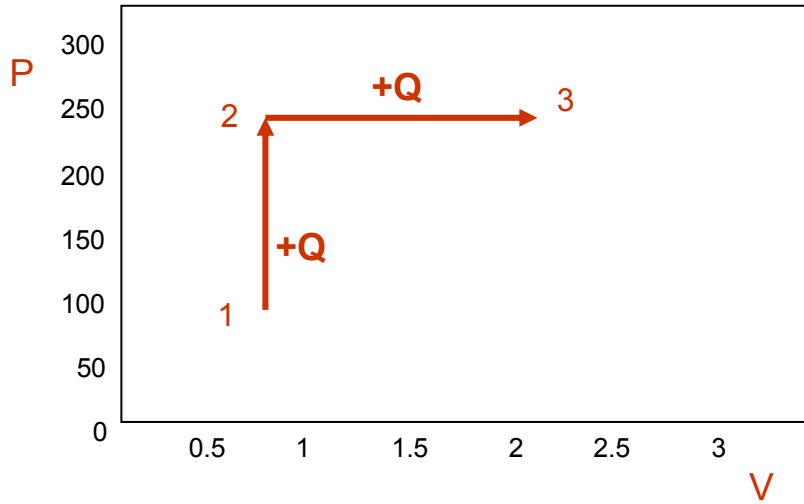


**ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΝΕΙ ΕΡΓΟ ΣΤΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
(ΠΑΙΡΝΟΥΜΕ ΕΡΓΟ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ)**

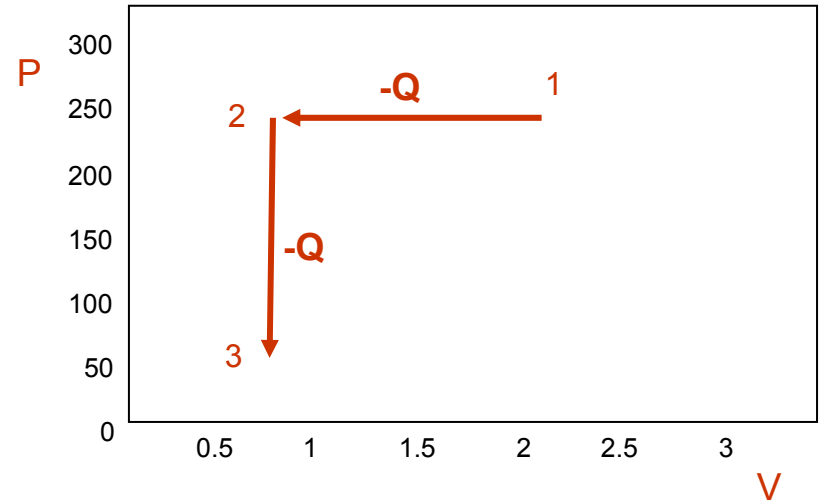


**ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΙΡΝΕΙ ΕΡΓΟ ΑΠΟ
ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
(ΔΙΝΟΥΜΕ ΕΡΓΟ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ)**

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ P-V

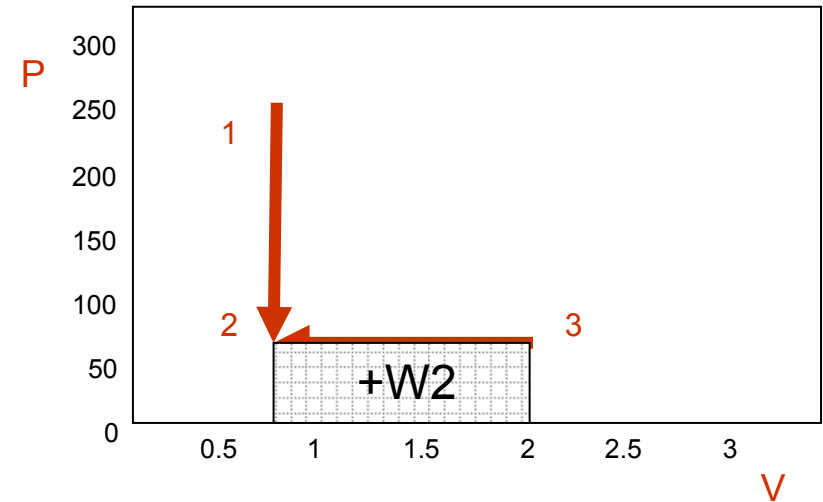
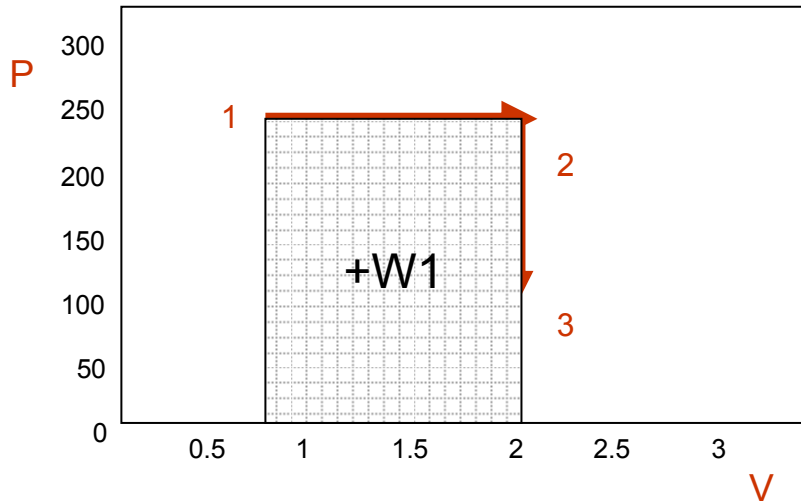


ΔΙΝΟΥΜΕ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ



ΠΑΙΡΝΟΥΜΕ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

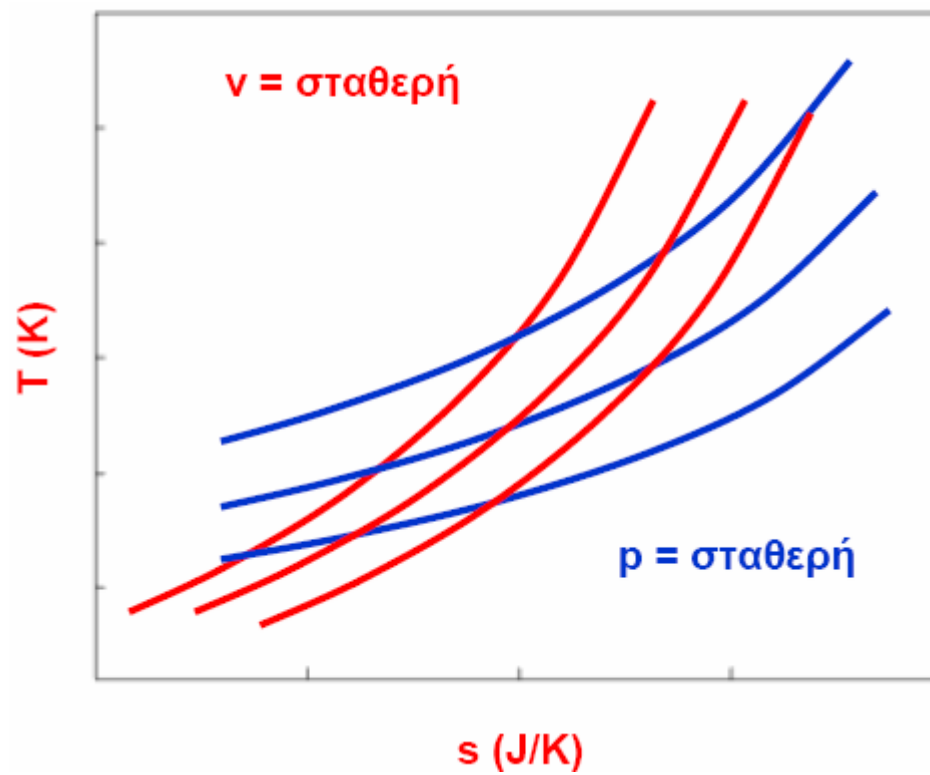
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ P-V



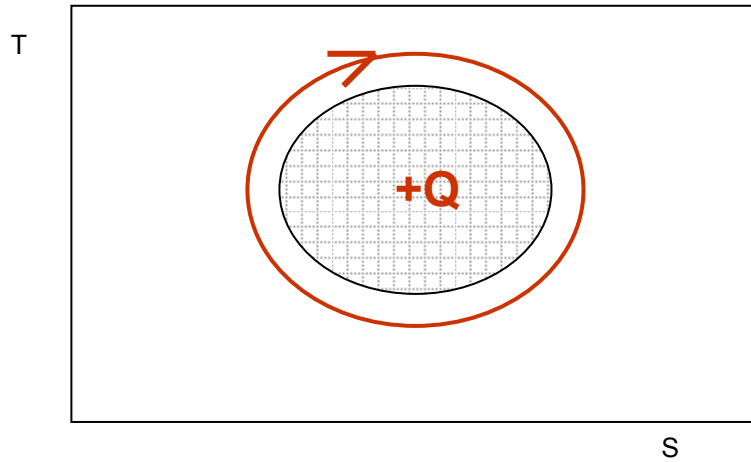
$$W1 > W2$$

ΤΟ ΕΡΓΟ (ΚΑΙ Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ) ΠΟΥ ΣΥΝΑΛΛΑΣΕΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΙΝΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΚΑΙ ΟΧΙ ΜΟΝΟ ΤΩΝ ΤΕΛΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ (ΓΙΑ ΜΗ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ).

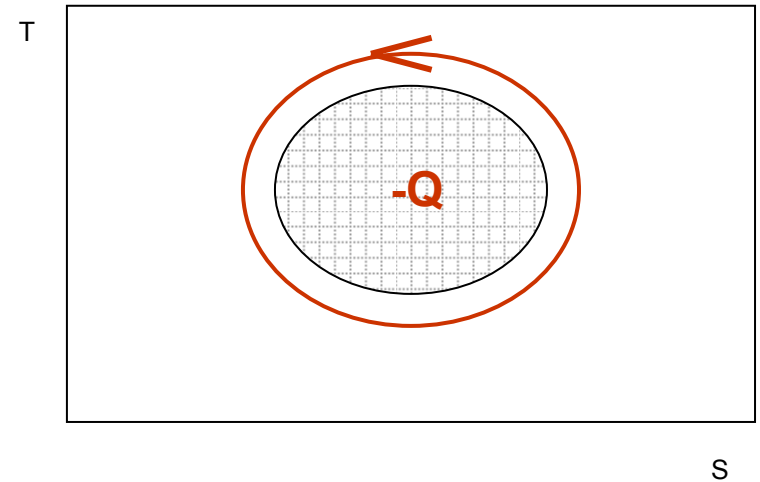
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ T-S



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ T-S



**ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΙΡΝΕΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ
ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
(ΔΙΝΟΥΜΕ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΣΤΟ
ΣΥΣΤΗΜΑ)**



**ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΝΕΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΣΤΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
(ΠΑΙΡΝΟΥΜΕ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΠΟ ΤΟ
ΣΥΣΤΗΜΑ)**

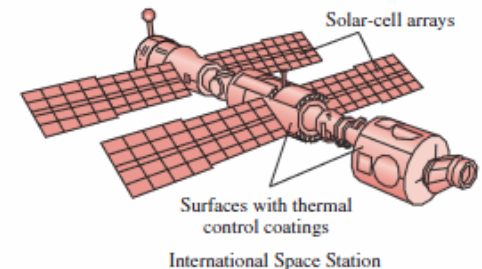
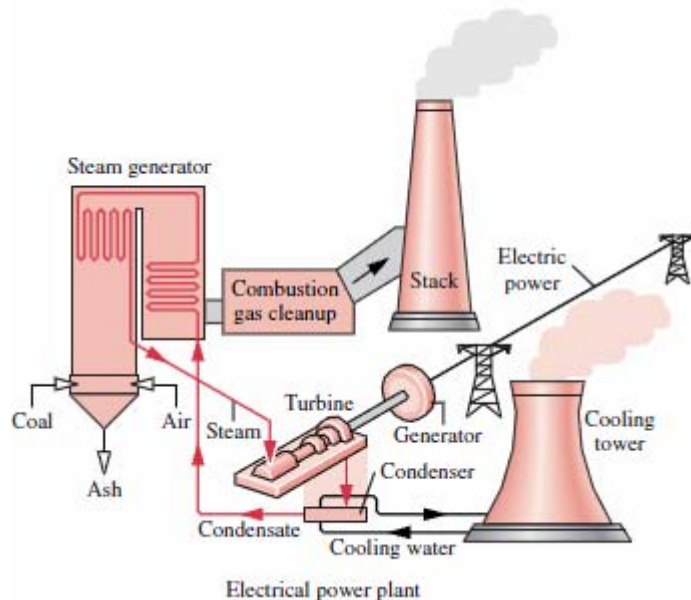
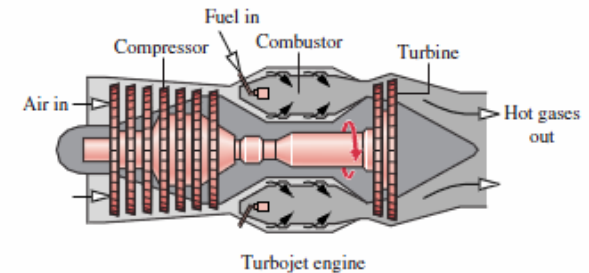
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Θερμικές μηχανές ή θερμοκινητήρες:

ονομάζονται οι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την **θερμότητα που παράγεται από την χημική ενέργεια της καύσης**, σε μηχανικό έργο.

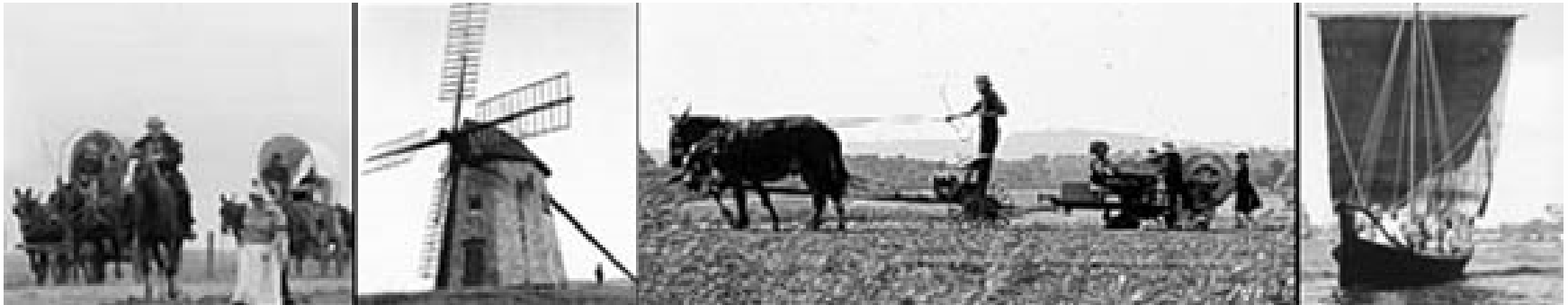
Ανάλογα με τον τρόπο πραγματοποίησης της καύσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- στις μηχανές εσωτερικής καύσεως (Μ.Ε.Κ.) και
- στις μηχανές εξωτερικής καύσεως ή ατμομηχανές.



ΠΩΣ ΕΧΟΥΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΙ ΟΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

- Πριν τις θερμικές μηχανές οι κυριότερες πηγές ισχύος για τη μεταφορά, τις αγροτικές εργασίες και τη βιομηχανία ήταν ο άνθρωπος.



Παλαιότερα:

Θερμικές μηχανές → θερμοδυναμικούς κύκλους ατμού
μετατροπή θερμικής ενέργειας από την καύση του ξύλου και του
κάρβουνου → σε έργο για να τροφοδοτήσουν τρένα, καράβια,
εργοστάσια και να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.



20ος αιώνας:

αύξηση των εφαρμογών των θερμικών μηχανών

για να μετατρέψουν τη θερμική ενέργεια από την καύση αερίου ή υγρού
καυσίμου σε έργο. Αυτές οι θερμικές μηχανές έχουν μεγαλύτερη ισχύ
από τις θερμικές μηχανές που χρησιμοποιούν κύκλους ατμού.

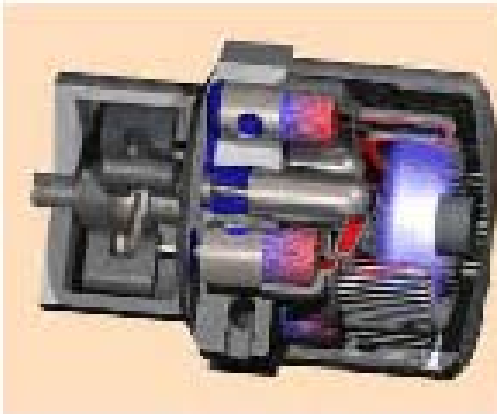


Στον 21ο αιώνα παρά το γεγονός ότι δεν ξέρουμε πως θα εξελιχθεί το μέλλον των θερμικών μηχανών μπορούμε να δούμε ποιες βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο:

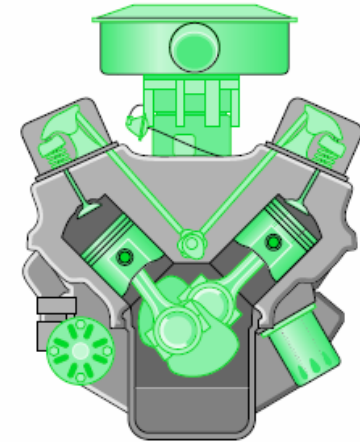
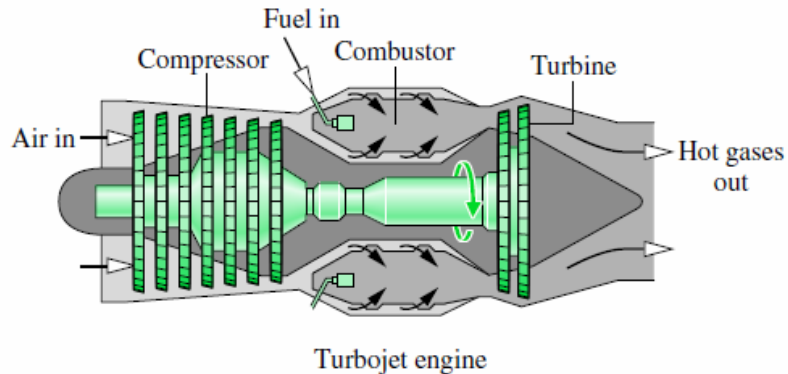
Νέοι τύποι θερμικών μηχανών: Όπως μηχανές Stirling οι οποίες χρησιμοποιούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως βιομάζα, απορριπτόμενη θερμότητα, ηλιακή ενέργεια.

Νέες ενεργειακές πηγές: Οι περισσότερες θερμικές μηχανές χρησιμοποιούν σήμερα την καύση των ορυκτών καυσίμων . Ωστόσο, οι θερμικές μηχανές μπορούν θεωρητικά να λειτουργήσουν με οποιαδήποτε πηγή θερμικής ενέργειας

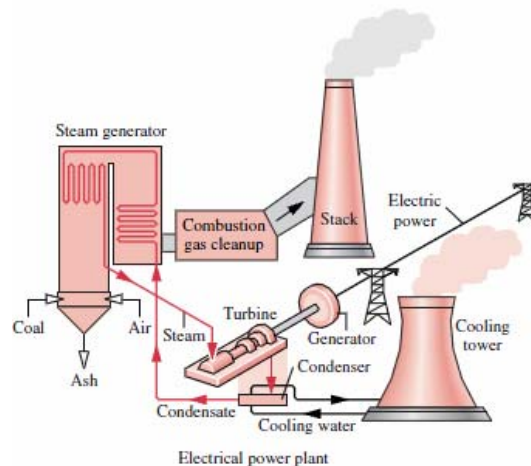
Νέες εφαρμογές: Η πλειονότητα των αεριοστροβίλων είναι σχετικά μεγάλοι και με αποκλειστική χρήση σε αεροσκάφη ή σε κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο οι μικροί αεριοστρόβιλοι αναπτύσσονται για διασκορπισμένη ηλεκτρική παραγωγή και είναι σχετικά μικροί για να τοποθετηθούν σε σπίτια



Εσωτερικής καύσεως ονομάζονται οι μηχανές που ως εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιούν τον αέρα και κατά κάποιο τρόπο το ίδιο το καύσιμο, δηλαδή καυσάερια π.χ εμβολοφόρος κινητήρας αυτοκινήτου, αεροστρόβιλος αεροπλάνου.



Εξωτερικής καύσεως ονομάζονται οι μηχανές όπου η καύση δεν λαμβάνει μέρος στο χώρο παραγωγής έργου αλλά έξω από αυτόν και στις οποίες το μέσο παραγωγής έργου δεν είναι το καυσάεριο αλλά κάποιο άλλο στοιχείο όπως π.χ. νερό. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι ατμοστρόβιλοι, οι ατμομηχανές.



Ανάλογα με τον τρόπο μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο οι θερμικές μηχανές διακρίνονται σε:

- εμβολοφόρες ή παλινδρομικές

(ισχύουν τόσο για τις μηχανές εσωτερικής καύσεως όσο και για τις εξωτερικής καύσεως)

- περιστροφικές ή στροβίλους

Στις μηχανές εσωτερικής καύσεως ονομάζονται ατμοστρόβιλοι

Στις μηχανές εξωτερικής καύσεως ονομάζονται αεριοστρόβιλοι).

ΒΑΣΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

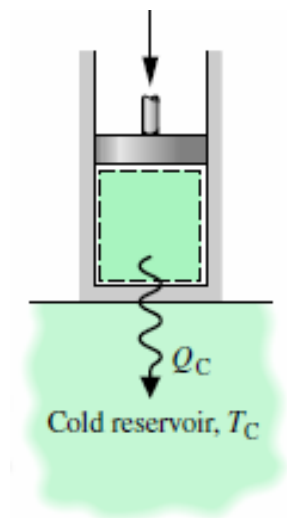
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ



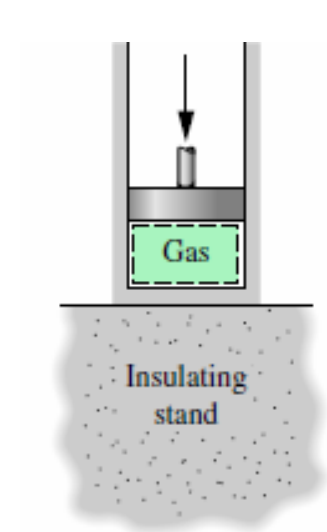
ΚΥΚΛΟΣ CARNOT ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ

Ο αντιστρεπτός κύκλος
με τη μεγαλύτερη απόδοση

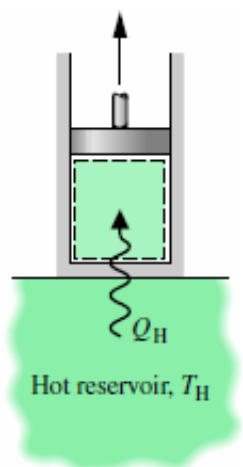
1-2: Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση



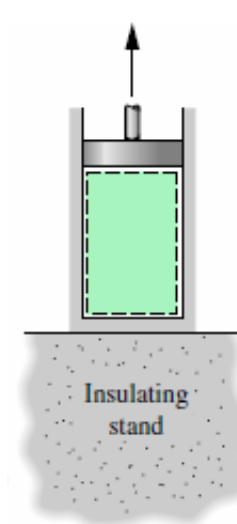
2-3: Ισεντροπική συμπίεση

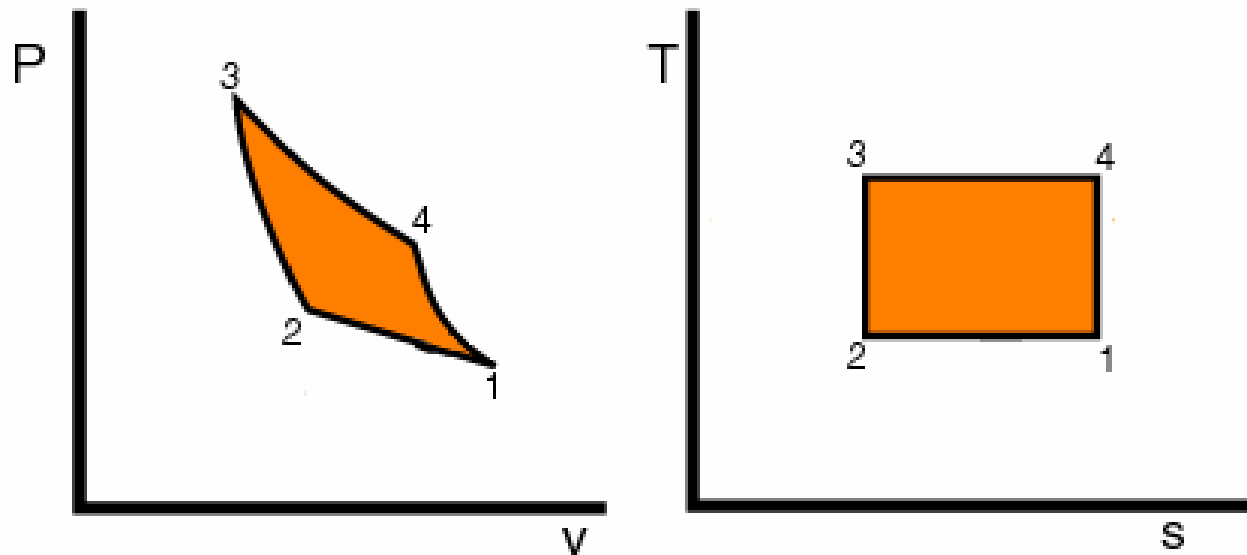


3-4: Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση



4-1: Ισεντροπική εκτόνωση





$$\sum_{\text{CYCLE}} \Delta S = 0$$

$$\sum_{\text{CYCLE}} \Delta S = \Delta S_{3-4} + \Delta S_{1-2} = \frac{q_{\text{HOT,IN}}}{T_{\text{HOT}}} - \frac{q_{\text{COLD,OUT}}}{T_{\text{COLD}}} = 0$$

$$\frac{T_{\text{COLD}}}{T_{\text{HOT}}} = \frac{q_{\text{COLD,OUT}}}{q_{\text{HOT,IN}}}$$

$$\eta_{\text{CARNOT}} = 1 - \frac{Q_{\text{COLD,OUT}}}{Q_{\text{HOT,IN}}} = 1 - \frac{q_{\text{COLD,OUT}}}{q_{\text{HOT,IN}}} = 1 - \frac{T_{\text{COLD}}}{T_{\text{HOT}}}$$

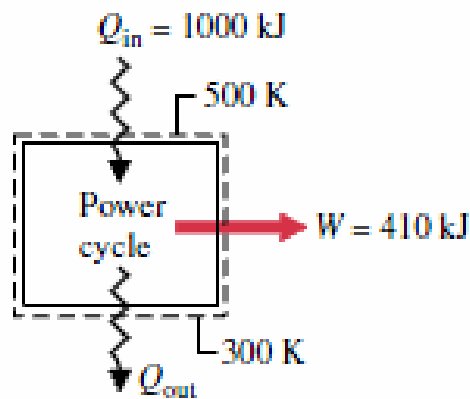
ΝαδειχθείότιηθερμικήαπόδοσηενόςκύκλουCarnotείναισυνάρτησημόνοτωνθερμοκρασιών T_L , T_H

Παράδειγμα αξιολόγησης κύκλου ισχύος

Ένας εφευρέτης ισχυρίζεται ότι κατασκεύασε μία μονάδα ισχύος η οποία δίνει καθαρό έργο 410 kJ όταν η ενέργεια που καταναλώνει είναι 1000 kJ.

Το σύστημα παίρνει θερμότητα από τα καυσαέρια στους 500 K.

Εάν η θερμότητα εξόδου είναι 300K να αξιολογήσετε αυτό το σύστημα.



Θερμική απόδοση του κύκλου
βάσει των στοιχείων που δίνονται:

$$\eta = \frac{410 \text{ kJ}}{1000 \text{ kJ}} = 0.41 \text{ (41\%)}$$

Η μέγιστη θερμική απόδοση οποιουδήποτε κύκλου που λειτουργεί μεταξύ των θερμοκρασιών $T_H = 500 \text{ K}$ και $T_C = 300 \text{ K}$ είναι:

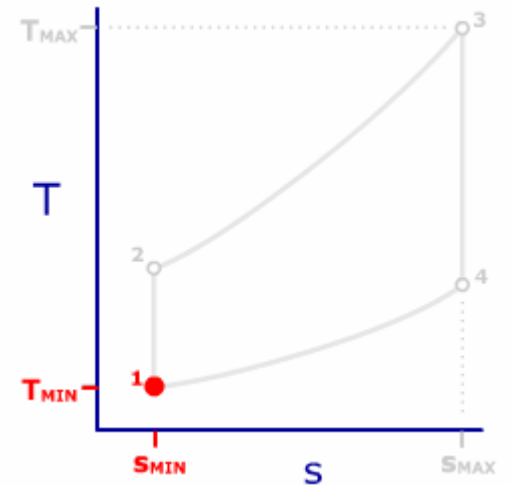
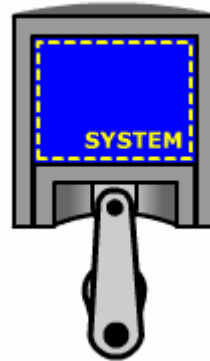
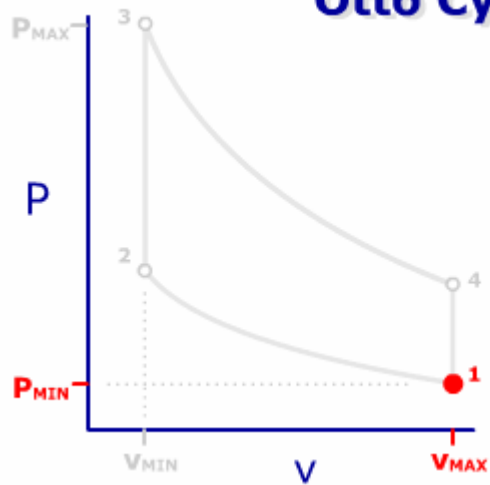
$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{500 \text{ K}} = 0.40$$

ΕΠΟΜΕΝΩΣ → **ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ Ο ΙΣΧΥΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ!**

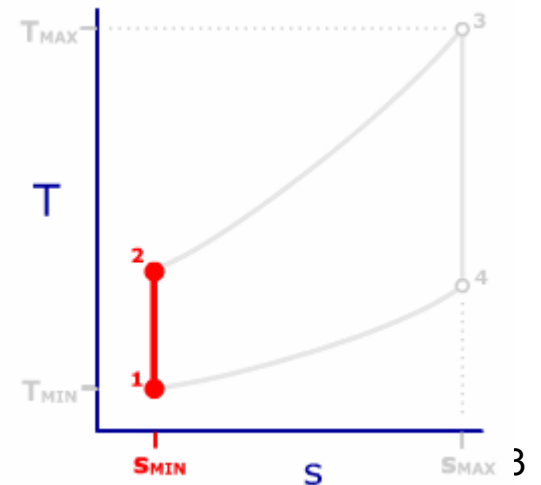
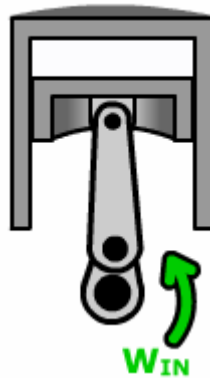
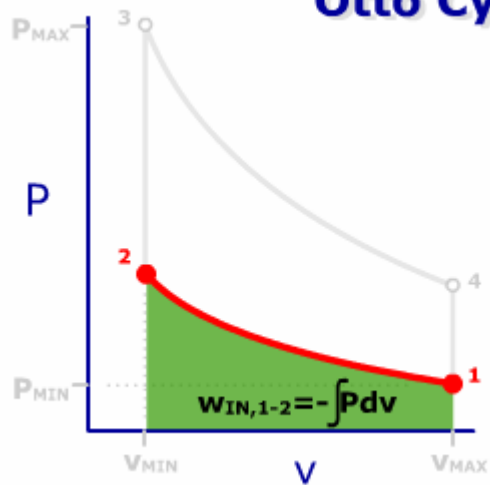
ΚΥΚΛΟΣ ΟΤΤΟ

1-2: Ισεντροπική συμπίεση

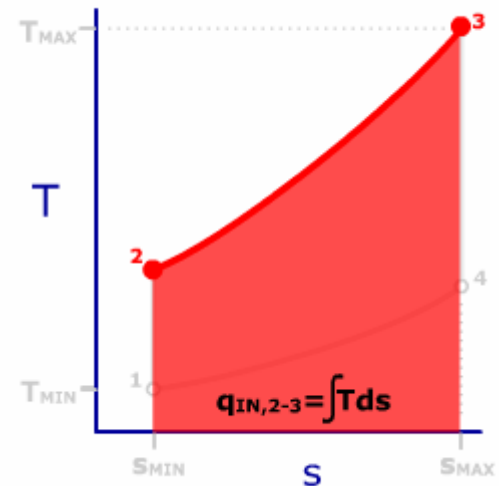
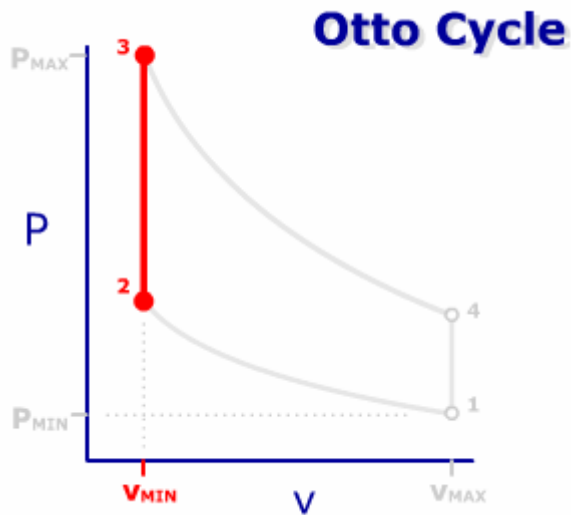
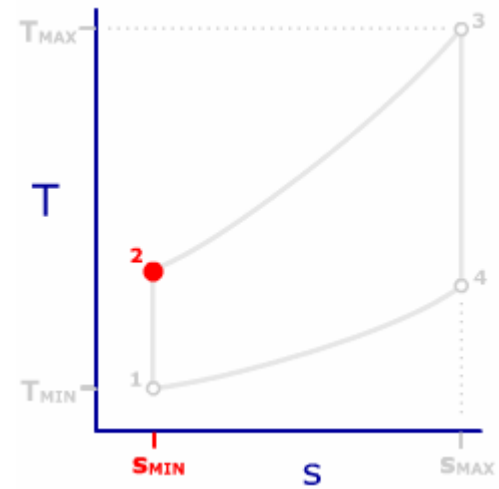
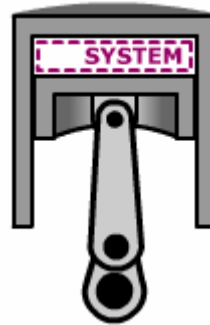
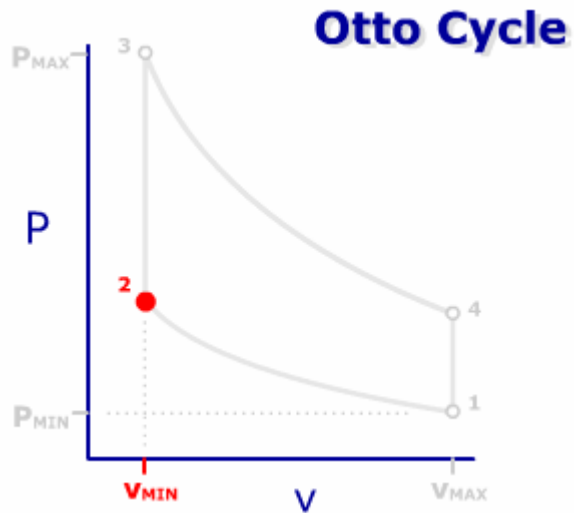
Otto Cycle



Otto Cycle

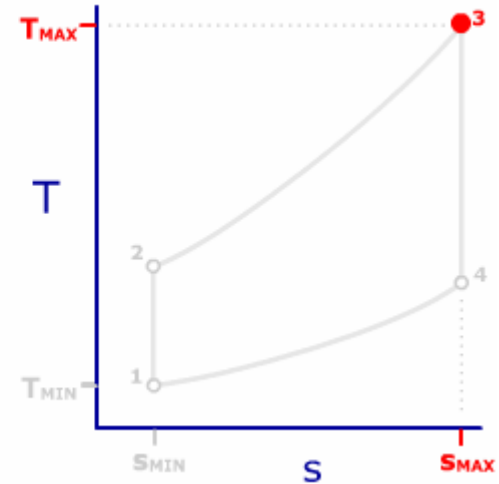
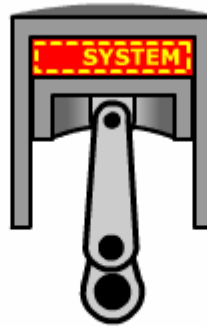
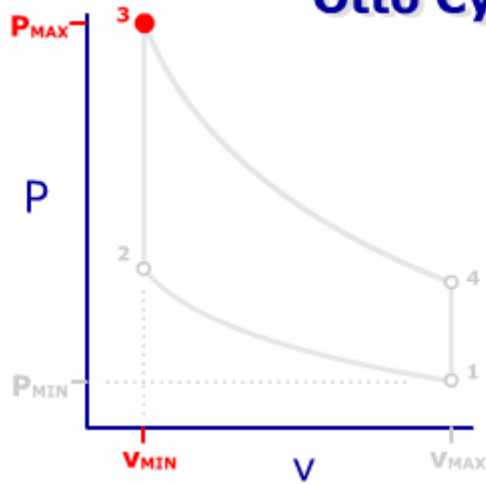


2-3: Ισόχωρη προσθήκη θερμότητας

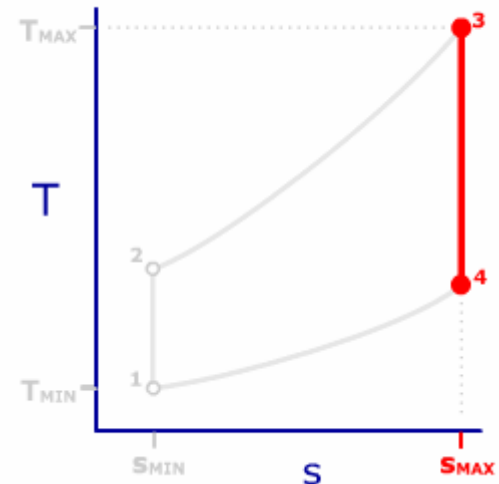
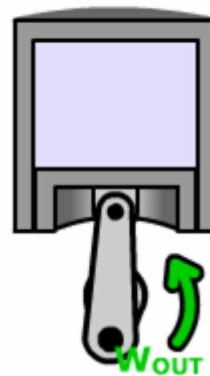
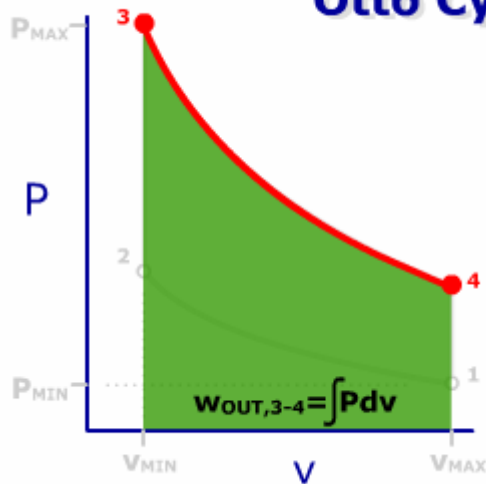


3-4: Ισεντροπική εκτόνωση

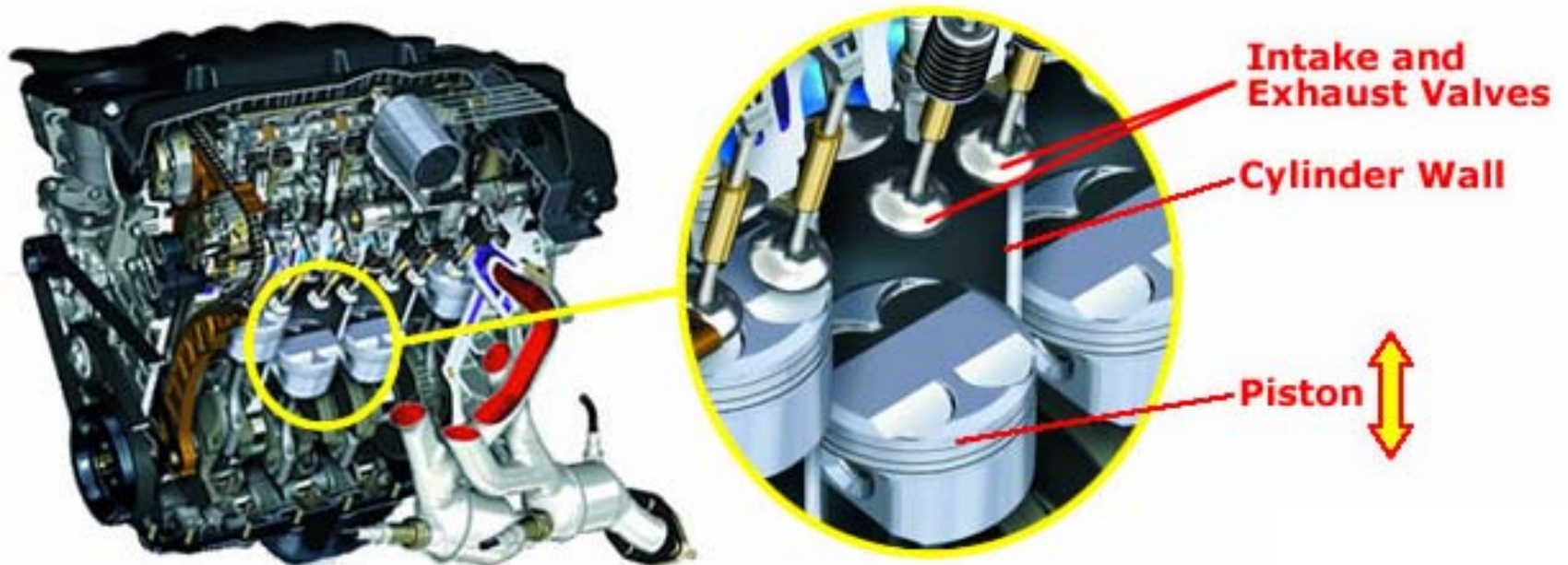
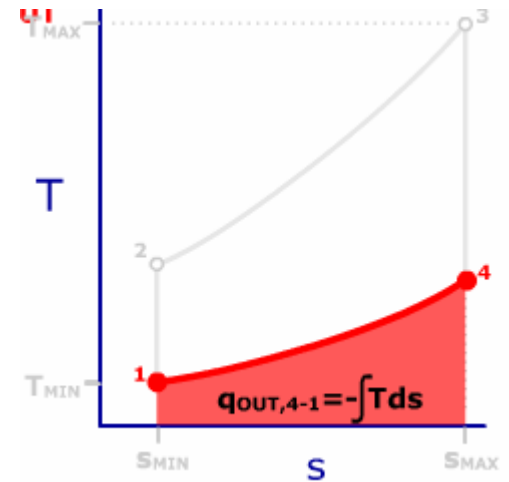
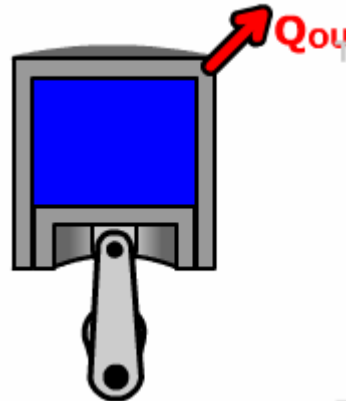
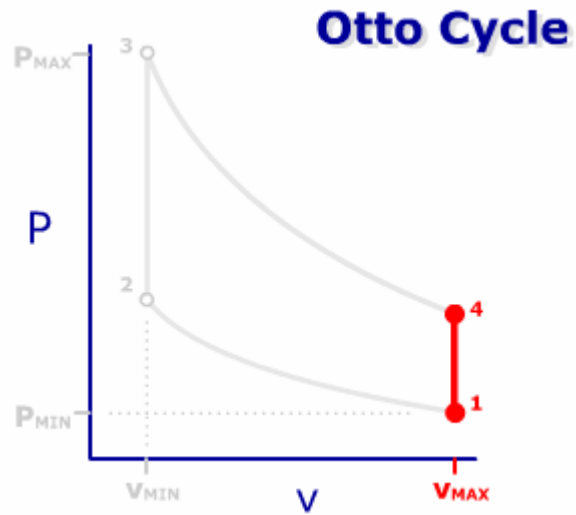
Otto Cycle



Otto Cycle

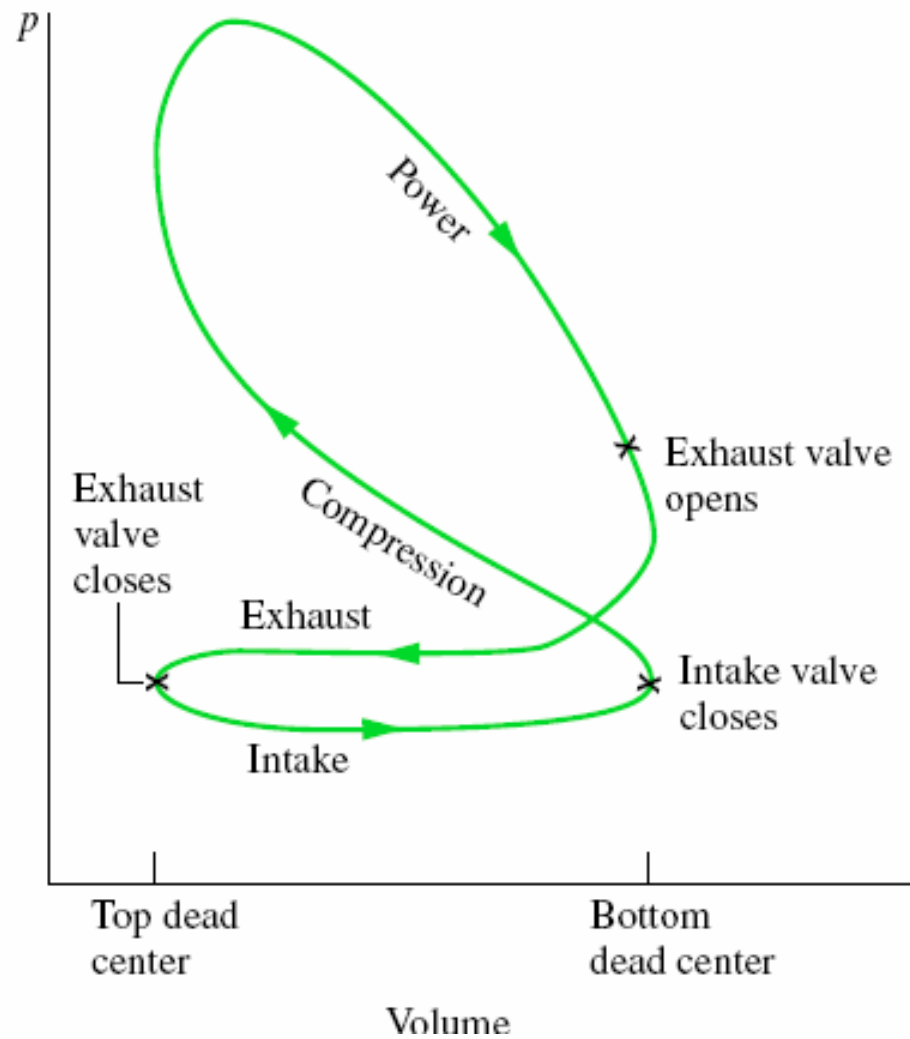


4-1: Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

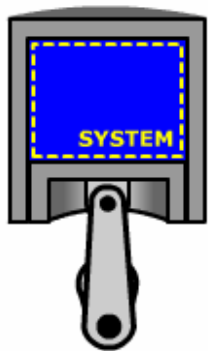


Cutaway view of 4-Cylinder Gasoline Engine (Image Courtesy BMW)

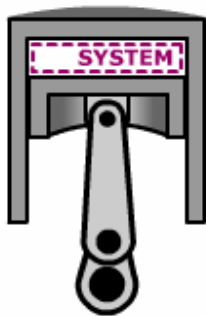
4-ΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΟΤΤΟ



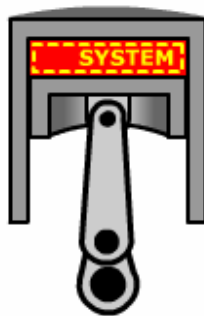
1



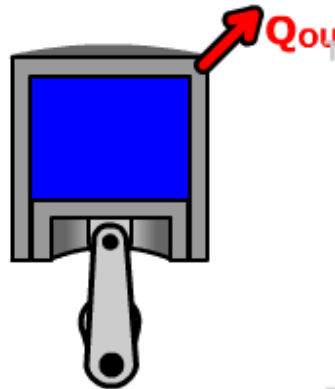
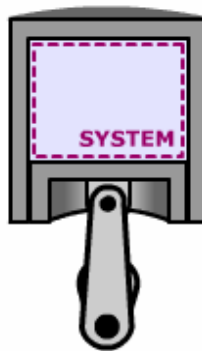
2



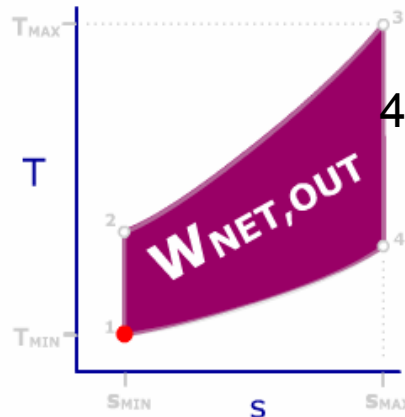
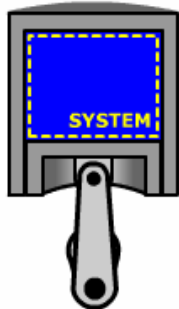
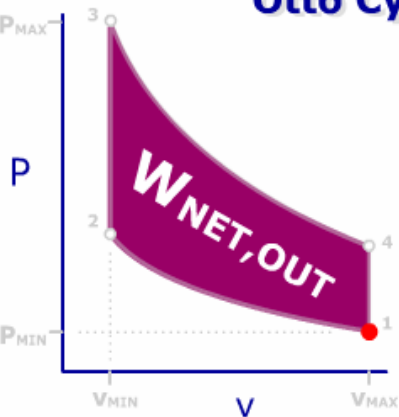
3



4



Otto Cycle



1. Με τη βαλβίδα εισαγωγής ανοικτή, το έμβολο εισάγει φρέσκο μείγμα μέσα στον κύλινδρο
2. Και με τις δύο βαλβίδες κλειστές το έμβολο εκτελεί συμπίεση αυξάνοντας τη θερμοκρασία αλλά και την πίεση. Απαιτεί εισαγωγή έργου.
Αρχίζει η διεργασία συμπίεσης καταλήγοντας σε μείγμα υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Η καύση στον ΟΤΤΟ γίνεται στο τέλος της συμπίεσης.
3. Παράγεται έργο αφού το μείγμα εκτονώνεται και έτσι επιστρέφει στο κάτω νεκρό σημείο.
4. Τα καυσαέρια απορρίπτονται από τον κύλινδρο μέσω της βαλβίδας εξαγωγής.

Θεωρητική ανάλυση κύκλου ΟΤΤΟ

Παραγόμενα έργα και θερμότητες:

$$\frac{W_{12}}{m} = u_2 - u_1, \quad \frac{W_{34}}{m} = u_3 - u_4$$
$$\frac{Q_{23}}{m} = u_3 - u_2, \quad \frac{Q_{41}}{m} = u_4 - u_1$$

Έργο κύκλου:

$$\frac{W_{\text{cycle}}}{m} = \frac{W_{34}}{m} - \frac{W_{12}}{m} = (u_3 - u_4) - (u_2 - u_1)$$

ή

$$\frac{W_{\text{cycle}}}{m} = \frac{Q_{23}}{m} - \frac{Q_{41}}{m} = (u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)$$

Θεωρητικός βαθμός απόδοσης κύκλου: $\eta = \frac{(u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)}{u_3 - u_2} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2}$

Μέση πίεση κύκλου = $\frac{\text{Καθαρό έργο}}{\text{Όγκος Εμβολισμού}}$

Θεωρητική ανάλυση κύκλου ΟΤΤΟ

Λόγος συμπίεσης:

Από τις ισεντροπικές μεταβολές:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = r^{k-1} \quad (\text{constant } k)$$
$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = \frac{1}{r^{k-1}} \quad (\text{constant } k)$$
$$k = c_p/c_v.$$

Για σταθερό C_v :

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

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

Ισχύει όμως:

$$, T_4/T_1 = T_3/T_2,$$

Επομένως

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Θεωρητικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

Μέση αποτελεσματική πίεση (Mean Effective Pressure-MEP)

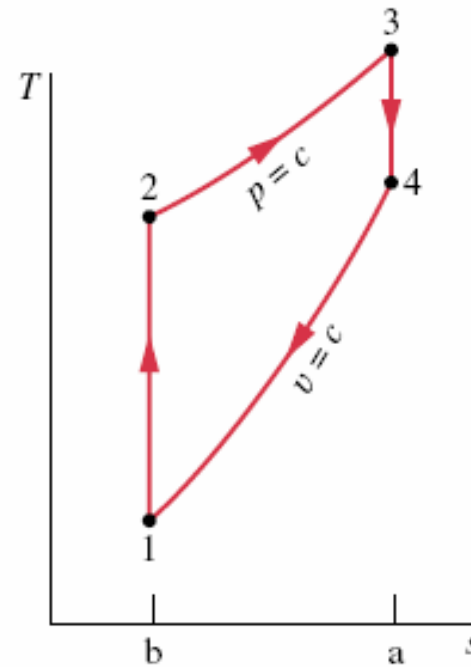
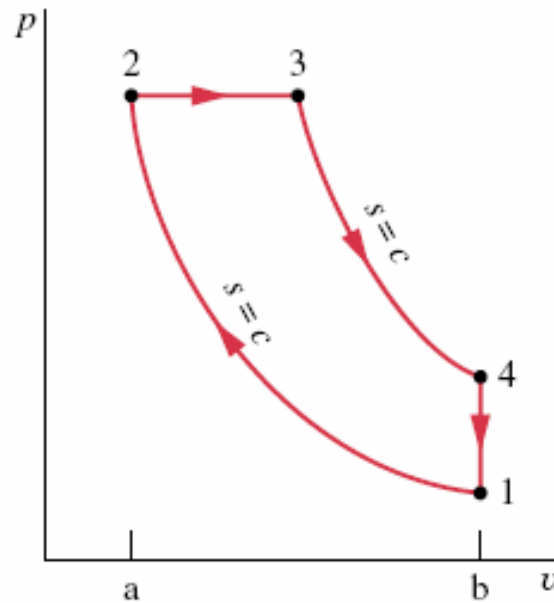
$$MEP = \frac{W_{net}}{V_{max} - V_{min}} \quad (kPa)$$

$$W_{net} = MEP \times \text{Εμβαδόν επιφάνειας εμβόλου} \times \text{Διαδρομή Εμβόλου}$$

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΟΤΤΟ

KYKΛΟΣ DIESEL

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ DIESEL



1-2: Ισεντροπική συμπίεση

2-3: Ισόθλιπτη προσθήκη θερμότητας

3-4: Ισεντροπική εκτόνωση

4-1: Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

Προσθήκη θερμότητας υπό σταθ. Πίεση P:

$$\frac{W_{23}}{m} = \int_2^3 p \, dv = p_2(v_3 - v_2)$$

Με ενεργειακό ισολογισμό στο κλειστό σύστημα έχουμε:

$$\begin{aligned}\frac{Q_{23}}{m} &= (u_3 - u_2) + p(v_3 - v_2) = (u_3 + pv_3) - (u_2 + pv_2) \\ &= h_3 - h_2\end{aligned}$$

Η θερμότητα απορρίπτεται στη διεργασία 4-1:

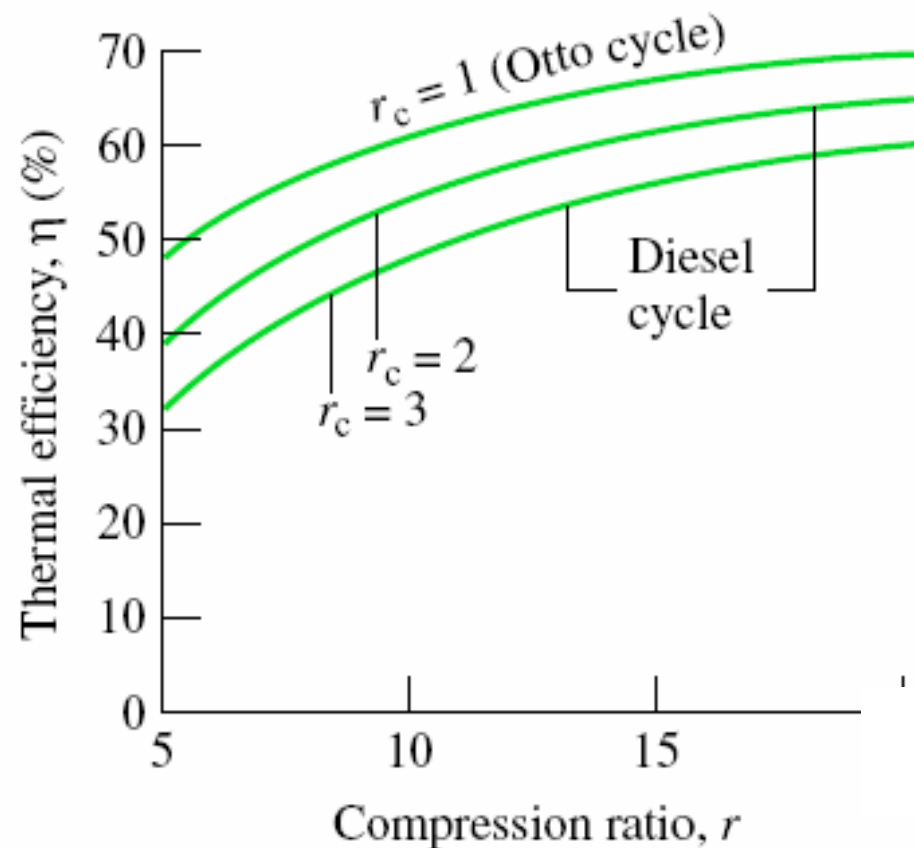
$$\frac{Q_{41}}{m} = u_4 - u_1$$

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι ο λόγος του καθαρού έργου προς τη προσδιδόμενη θερμότητα

$$\eta = \frac{W_{\text{cycle}}/m}{Q_{23}/m} = 1 - \frac{Q_{41}/m}{Q_{23}/m} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2}$$

Όπως και στον κύκλο Otto η θερμική απόδοση του κύκλου Diesel αυξάνεται με την αύξηση του λόγου συμπίεσης.

Λόγος συμπίεσης – Λόγος αποκοπής στον κύκλο Diesel



$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}}$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}c_v(T_4 - T_1) \quad \dot{Q}_{in} = \dot{m}c_p(T_3 - T_2)$$

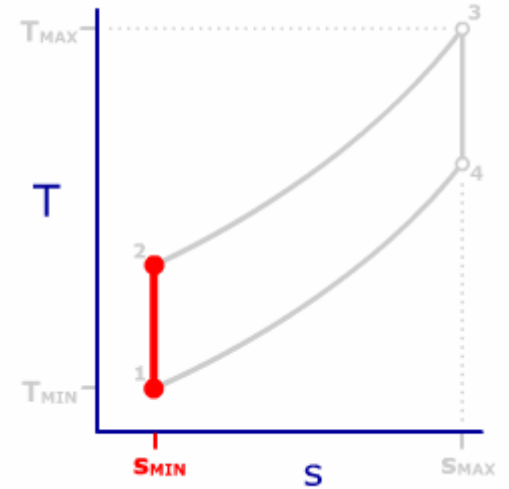
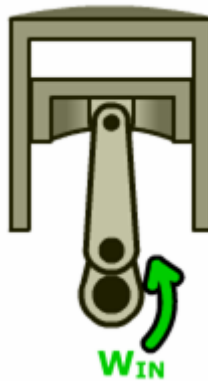
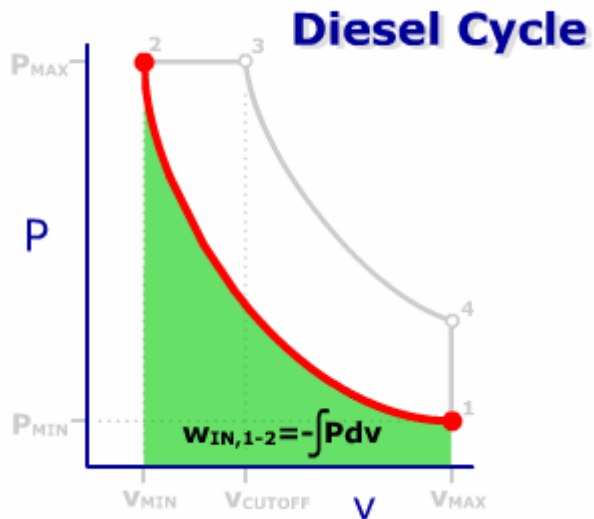
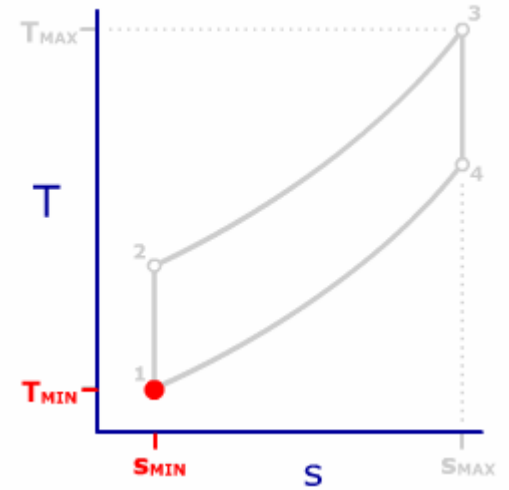
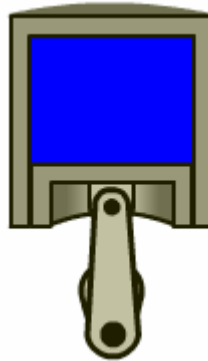
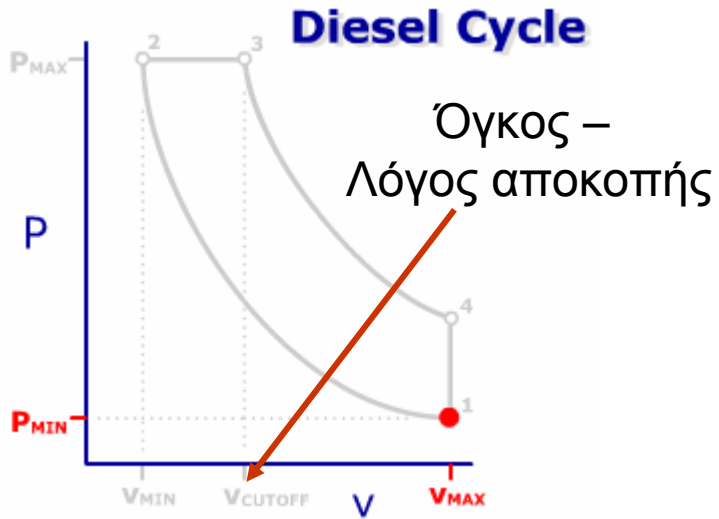
$$\eta = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{kT_2} \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)}$$

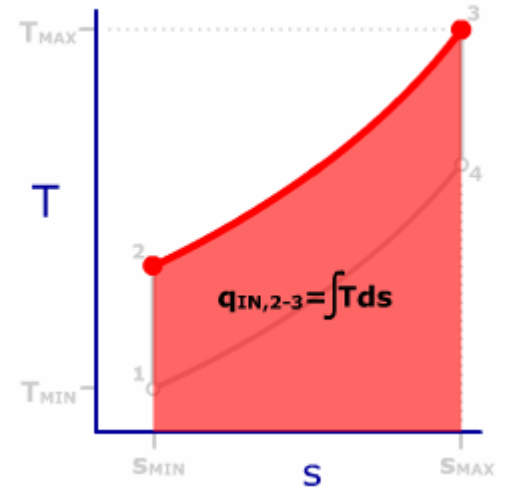
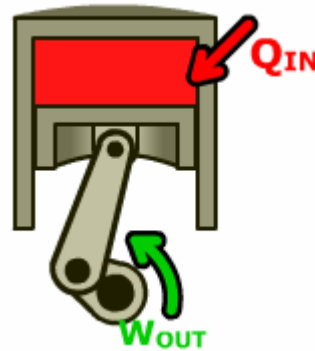
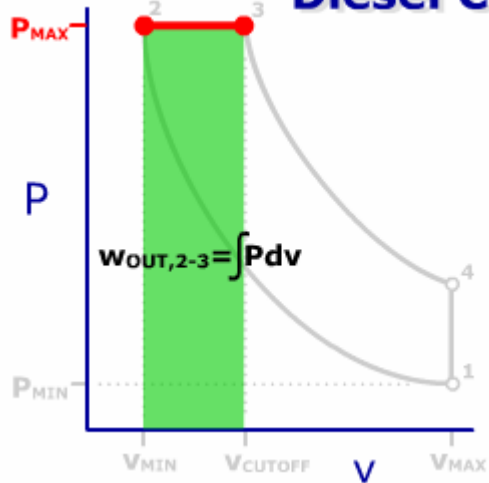
Απόδειξη βαθμού απόδοσης Diesel

1-2: Ισεντροπική συμπίεση



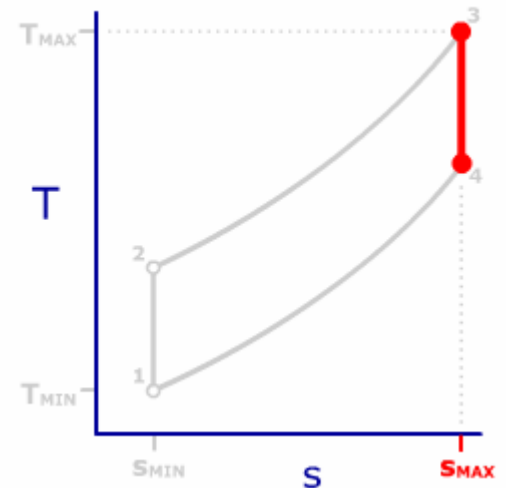
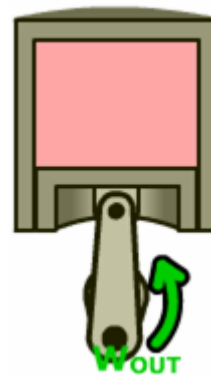
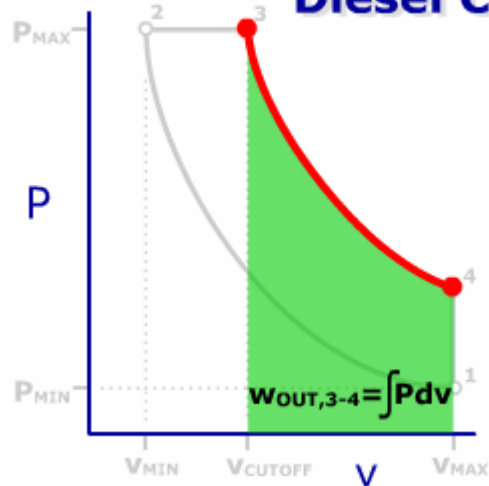
2-3: Ισόθλιπτη προσθήκη θερμότητας

Diesel Cycle



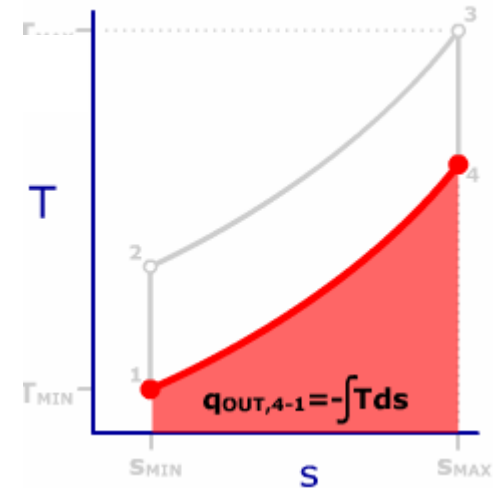
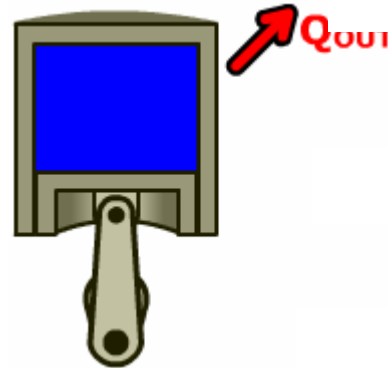
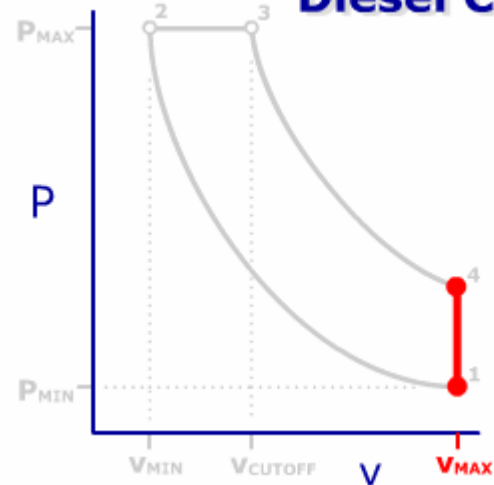
3-4: Ισεντροπική εκτόνωση

Diesel Cycle



4-1: Ισόχωρη απόρριψη θερμότητας

Diesel Cycle

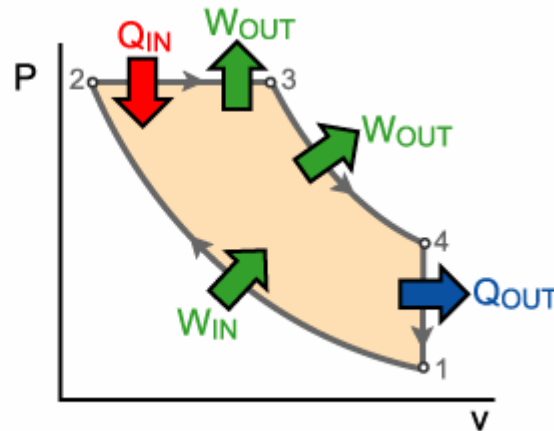
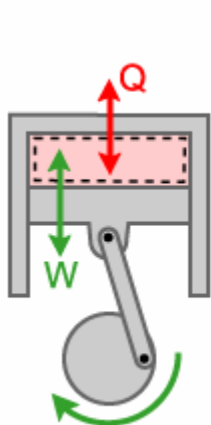


Λόγος συμπίεσης

$$r_V = V_{MAX}/V_{MIN} = v_1/v_2$$

Λόγος αποκοπής

$$r_{CUTOFF} = v_3/v_2$$

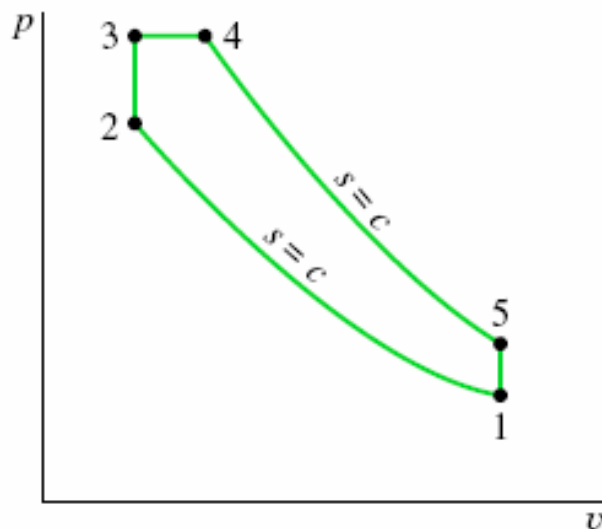


$$\eta_{DIESEL,IAS} = \frac{(w_{OUT} - w_{IN})}{q_{IN}} = 1 - \frac{1}{k} \left(\frac{1}{r_V} \right)^{k-1} \left[\frac{r_{CUTOFF}^k - 1}{r_{CUTOFF} - 1} \right]$$

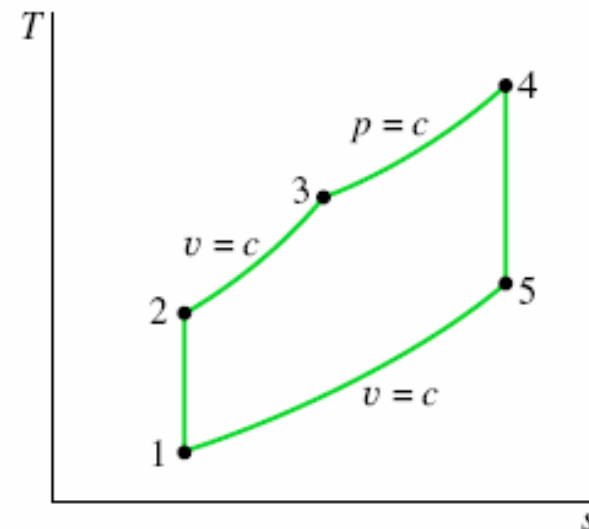
Diesel Cycle

ΑΣΚΗΣΕΙΣ DIESEL

ΚΥΚΛΟΣ DUAL



$$\dot{Q}_{\text{out}} = \dot{m}c_v(T_5 - T_1)$$



$$\dot{Q}_{\text{in}} = \dot{m}c_v(T_3 - T_2) + \dot{m}c_p(T_4 - T_3)$$

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

$$r_p = P_3/P_2,$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{r_p r_c^k - 1}{k r_p (r_c - 1) + r_p - 1}$$

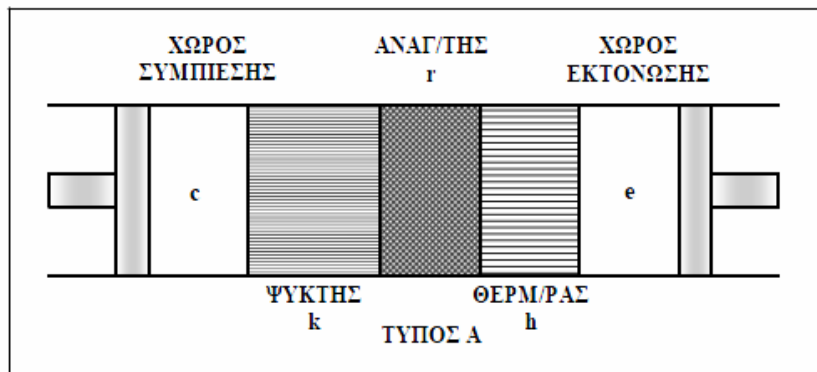
$r_p=1 \rightarrow$ Diesel

$r_c=1 \rightarrow$ Otto

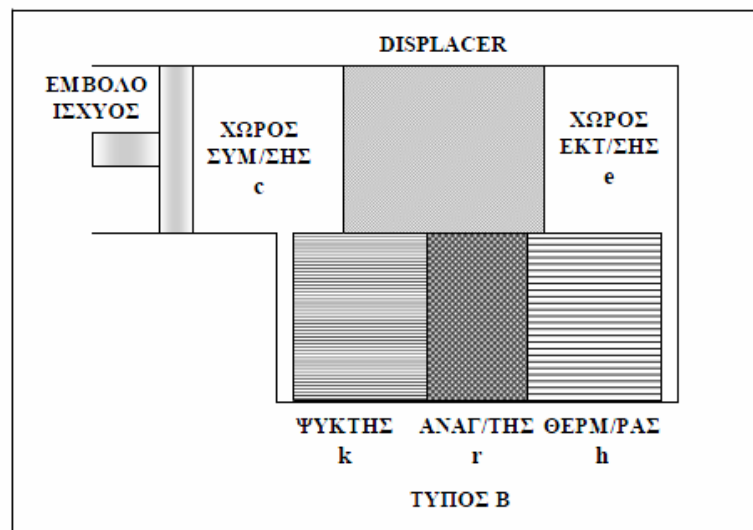
$r_p>1$ Απόδοση μικρότερη Otto
μεγαλύτερη Diesel

KYKΛΟΣ STIRLING

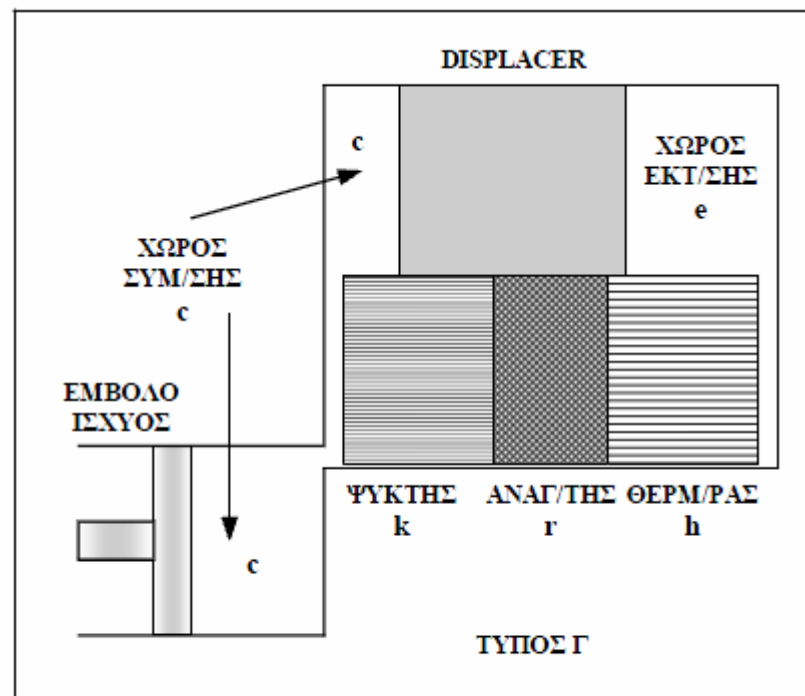
ΤΥΠΟΛΟΓΙΕΣ-ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ



Διαμόρφωση Α.

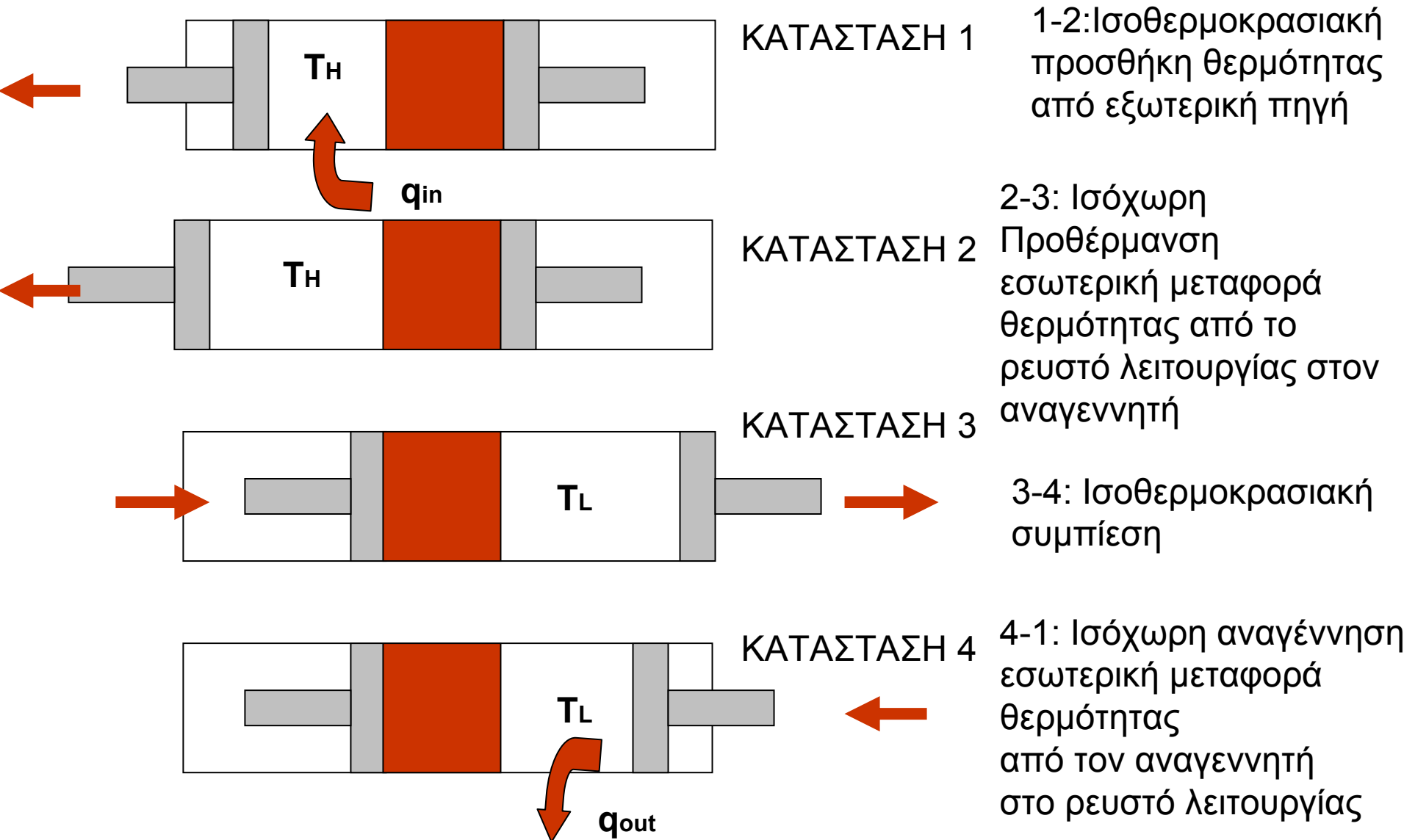


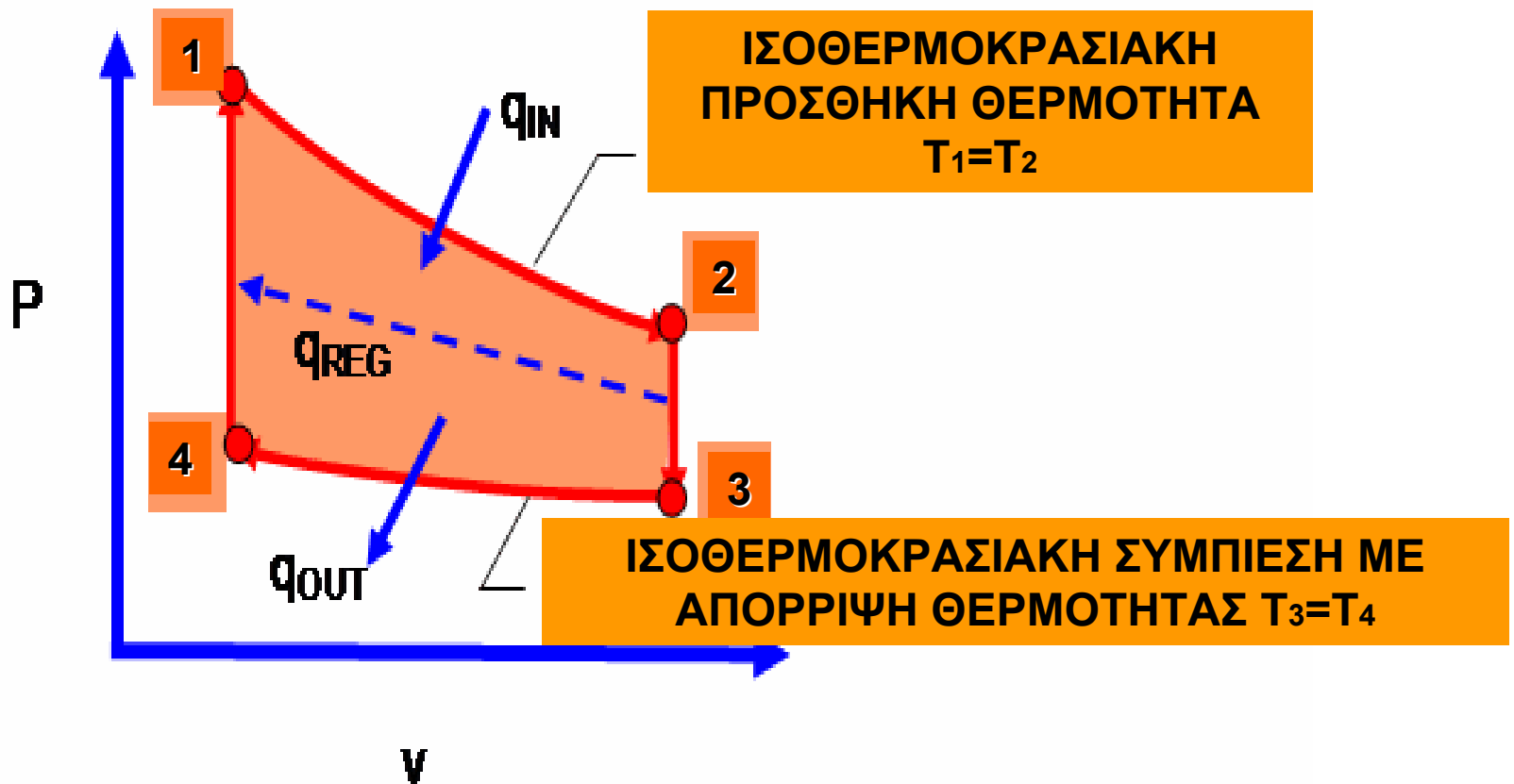
. Διαμόρφωση Β.



Διαμόρφωση Γ.

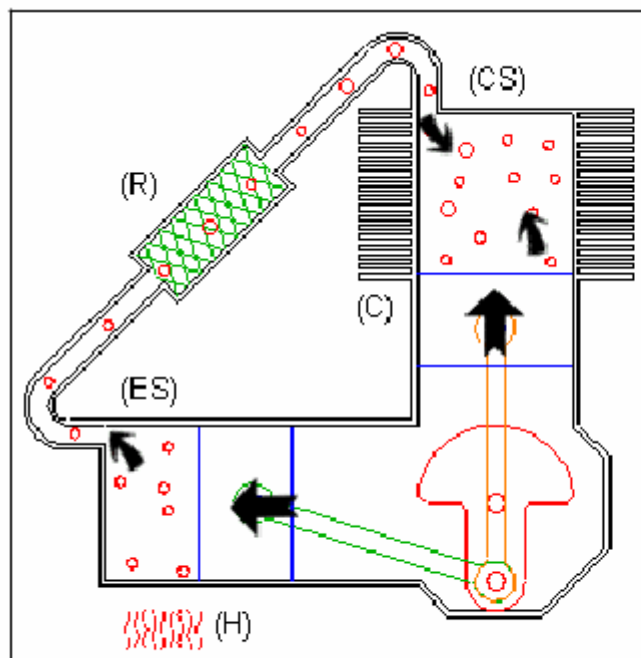
ΜΟΝΟΚΥΛΙΝΔΡΗ ΜΗΧΑΝΗ STIRLING ΤΥΠΟΥ Α



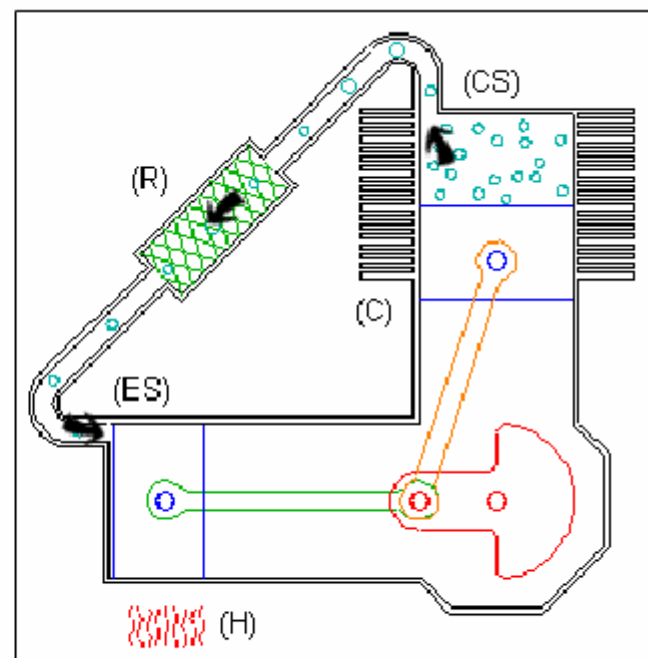


ΔΙΚΥΛΙΝΔΡΗ ΜΗΧΑΝΗ STIRLING ΤΥΠΟΥ Α

ΙΣΟΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ 1-2



Αρχή φάσης 1-2

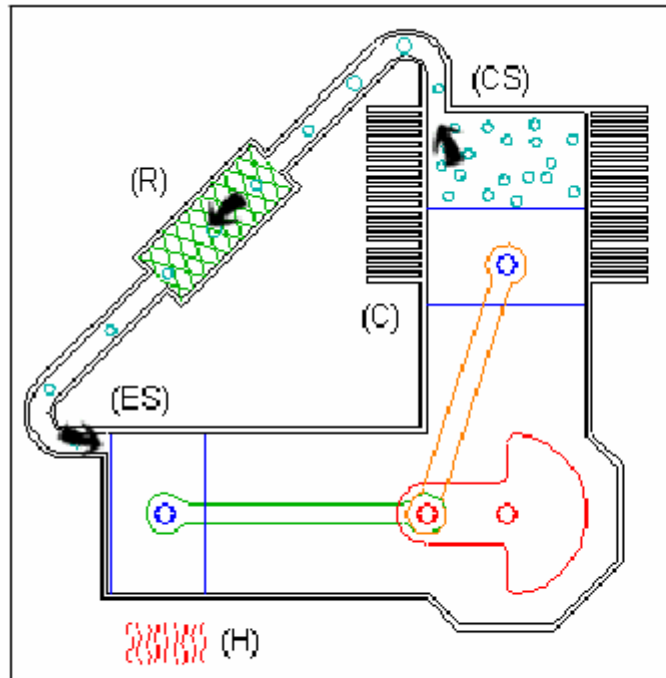


Τέλος φάσης 1-2

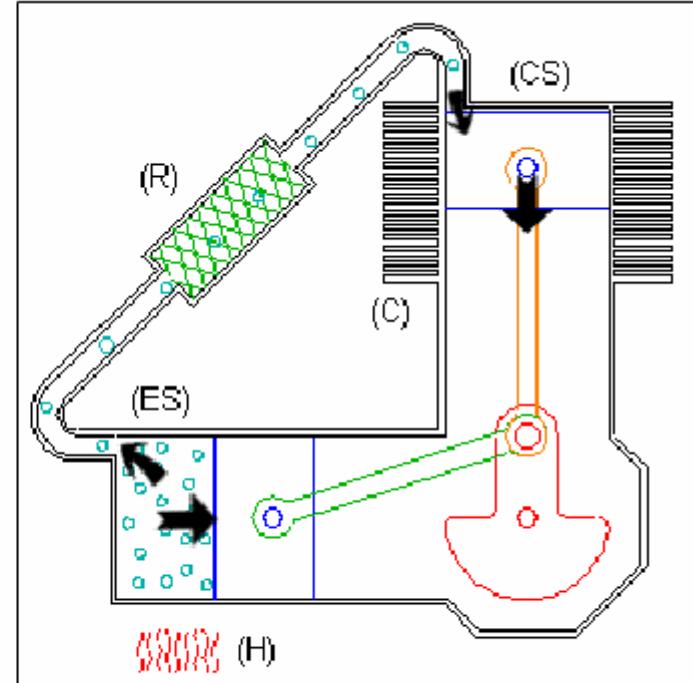
Το αέριο ψύχεται και συστέλλεται,
μαζεύοντας και τα δύο έμβολα
προς το εσωτερικό των κυλίνδρων τους

Στην αρχή της φάσης ο στρόφαλος
βρίσκεται στις 180ο ενώ στο τέλος στις 270ο

ΙΣΟΟΓΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ 2-3



Αρχή φάσης 2-3

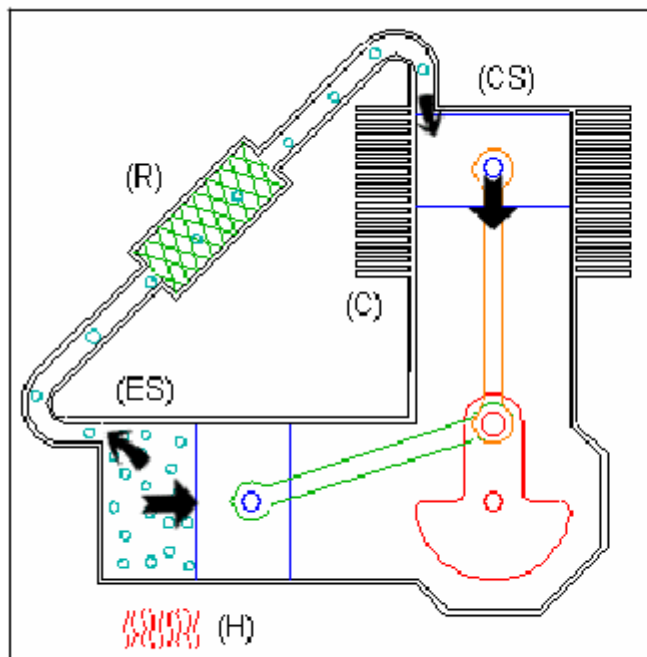


Τέλος φάσης 2-3

Το αέριο που έχει ήδη συσταλθεί βρίσκεται κυρίως στον κρύο κύλινδρο. Ο στρόφαλος στρέφεται ακόμη κατά 90ο **αναγκάζοντας το αέριο να επιστρέψει στον θερμό κύλινδρο** και να συμπληρωθεί ο κύκλος. Καθώς μεταφέρεται κρύος όγκος αερίου από τον κρύο στο θερμό κύλινδρο, ο αναγεννητής αποδίδει θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο, προθερμαίνοντάς το.

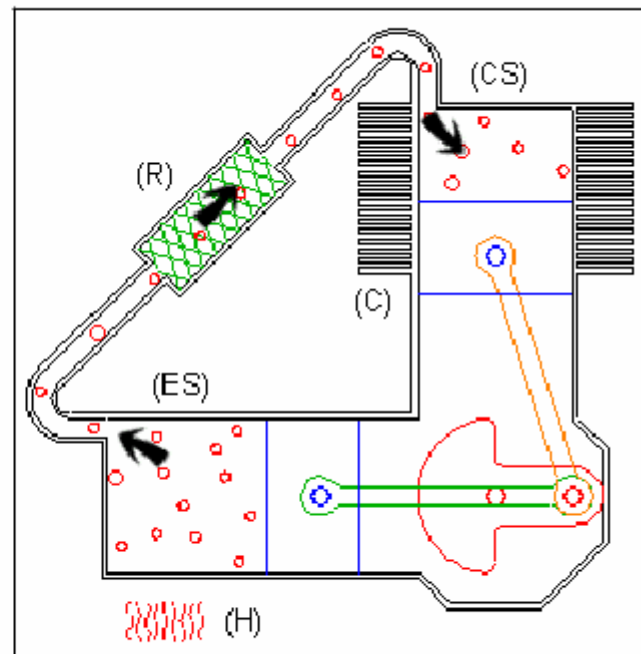
Στην αρχή της φάσης ο στρόφαλος βρίσκεται στις 270ο ενώ στο τέλος στις 360ο.⁴⁷

ΙΣΟΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΕΚΤΟΝΩΣΗ 3-4



Αρχή φάσης 3-4

Το αέριο θερμαίνεται και
εκτονώνεται
οδηγώντας
και τα δύο έμβολα προς
τα μέσα

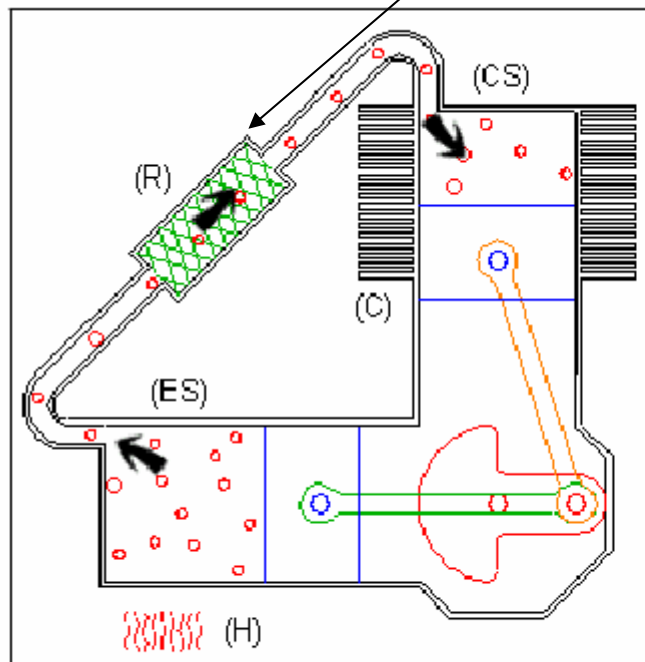


Τέλος φάσης 3-4

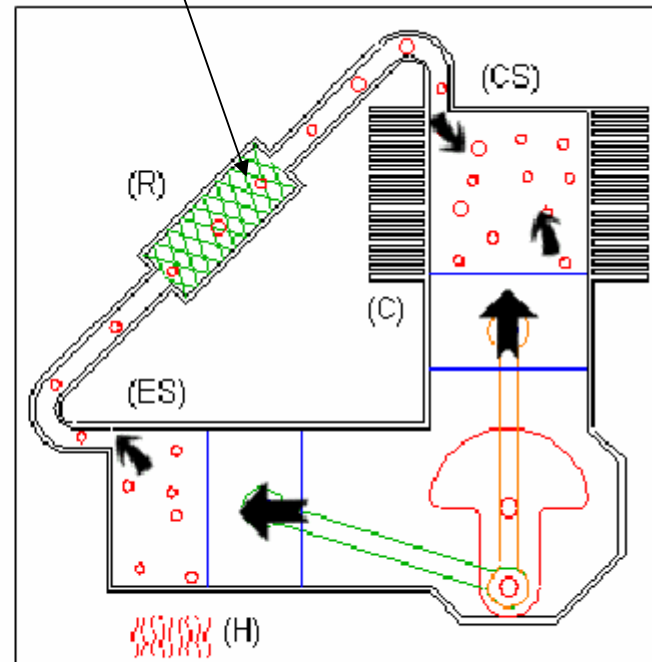
**Στο τέλος της
φάσης ο στρόφαλος βρίσκεται
στις 90ο**

ΙΣΟΟΓΚΗ ΨΥΞΗ 4-1

αποθηκεύεται ποσό
θερμότητας στη μήτρα
του αναγεννητή



Αρχή φάσης 4-1



Τέλος φάσης 4-1

Ο όγκος στο
θερμό κύλινδρο
είναι μέγιστος

Στην αρχή της φάσης ο στρόφαλος
βρίσκεται στις 90ο
ενώ στο τέλος στις 180ο

ΣΤΕΡΙΑ

Η Γερμανική εταιρία SOLO κατασκευάζει σύγχρονες ηλεκτρογεννήτριες που παράγουν ηλεκτρική ισχύ 2-9 kW από 8-24 kW θερμική ισχύ



Σχ. 1-12. Philips 102C. Ηλεκτρική γεννήτρια 200W στα 220V και 50Hz (1948-1951).

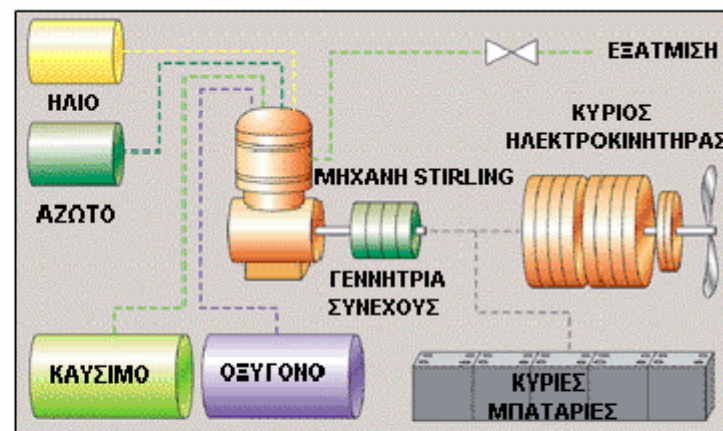


Σχ. 1-13. Ενεργειακό Ηλιακό σύστημα της Σουηδικής εταιρίας Kockums.

ΘΑΛΑΣΣΑ



Σύγχρονο Σουηδικό υποβρύχιο κινούμενο με μηχανή Stirling.

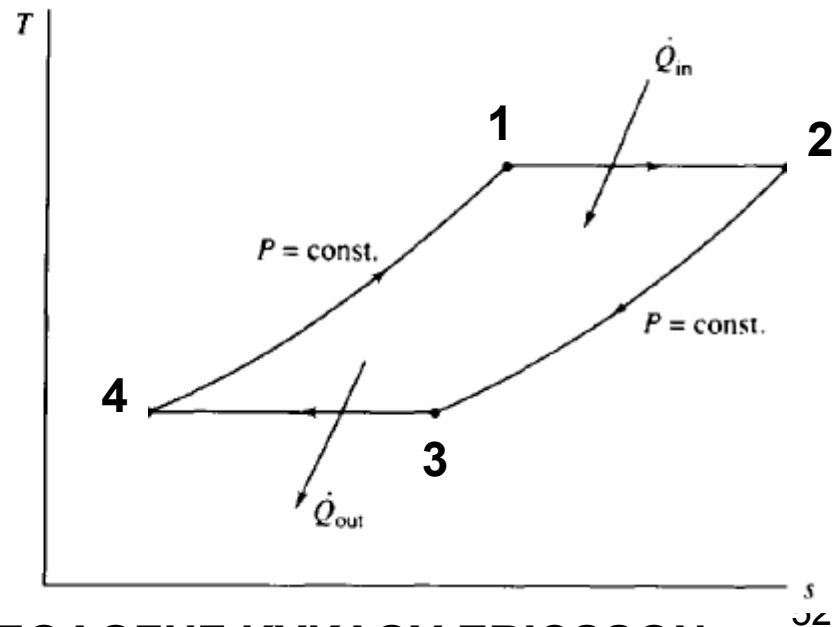
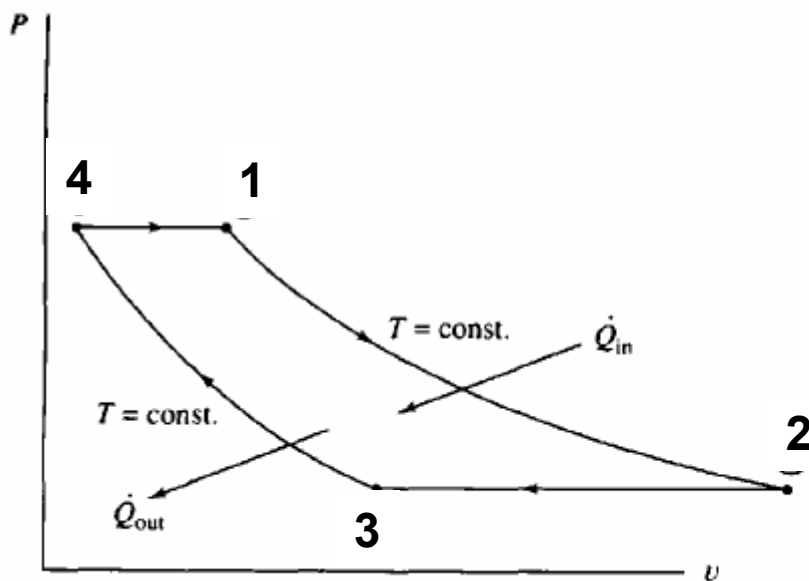
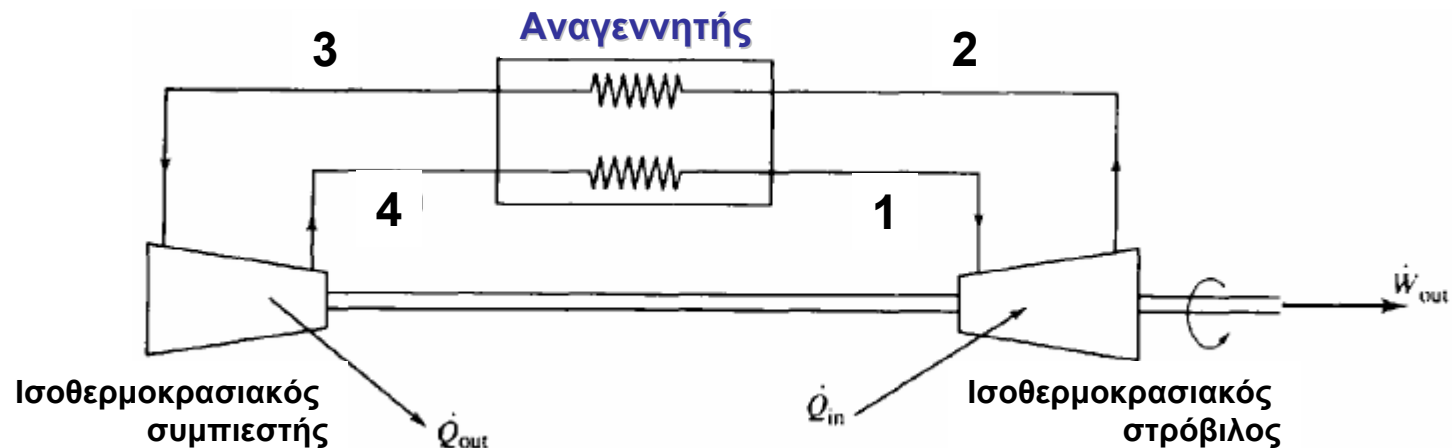


Η αρχή του συστήματος Stirling AIP της Kockums.

KYKΛΟΣ ERICSSON

STIRLING+ERICSSON:

Περιλαμβάνουν ένα ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΗ δηλαδή ένα εναλλάκτη που χρησιμοποιεί απορριπτόμενη θερμότητα



ΑΠΟΔΕΙΞΗ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ERICSSON

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

STIRLING -ERICSSON

Αέρας ακολουθεί τον κύκλο ERICSSON με λόγο συμπίεσης 10. Για χαμηλή πίεση 200 kPa, χαμηλή θερμοκρασία 100 oC και υψηλή θερμοκρασία 600 oC υπολογίστε το έργο εξόδου και το έργο εισόδου.

$$w_{\text{out}} = w_{1-2} + w_{2-3} + w_{3-4} + w_{4-1} = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} + P_2(v_3 - v_2) + RT_3 \ln \frac{v_4}{v_3} + P_1(v_1 - v_4)$$

Πρέπει να υπολογιστούν P_2 , v_1 , v_2 , and v_4 . We know

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{(0.287)(373)}{200} = 0.5353 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Για διεργασία σταθερής πίεσης $4 \rightarrow 1$,

$$\frac{T_4}{v_4} = \frac{T_1}{v_1} \quad \frac{873}{v_4} = \frac{373}{0.5353} \quad v_4 = 1.253 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Από τον ορισμό του λόγου συμπίεσης $v_4/v_2 = 10$, giving $v_2 = 0.1253 \text{ m}^3/\text{kg}$.

$$P_3 = P_2 = \frac{RT_2}{v_2} = \frac{(0.287)(373)}{0.1253} = 854.4 \text{ kPa}$$

Η τελική απαραίτητη ιδιότητα είναι: $v_3 = RT_3/P_3 = (0.287)(873)/854.4 = 0.2932 \text{ m}^3/\text{kg}$.

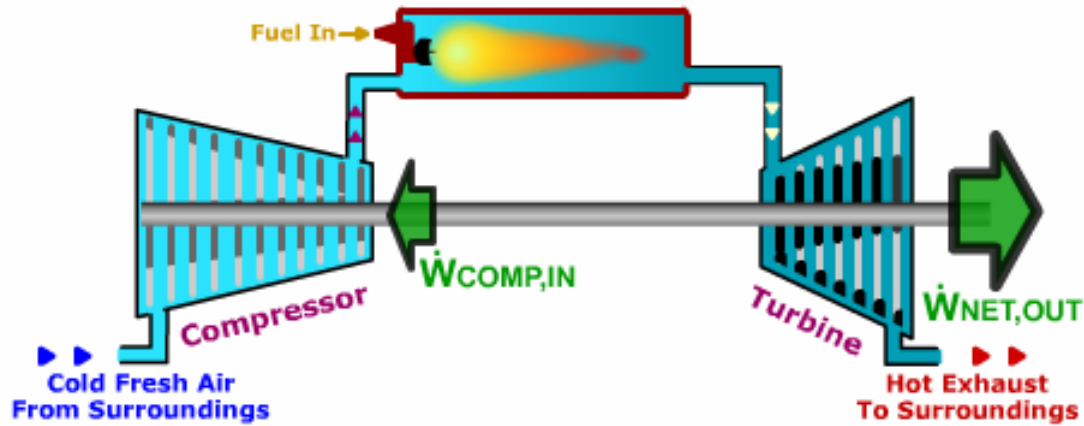
$$\begin{aligned} w_{\text{out}} &= (0.287)(373) \ln \frac{0.1253}{0.5353} + (854.4)(0.2932 - 0.1253) \\ &\quad + 0.287 \times 873 \ln \frac{1.253}{0.2932} + (200)(0.5353 - 1.253) = 208 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{373}{873} = 0.573 \quad q_{\text{in}} = \frac{w_{\text{out}}}{\eta} = \frac{208}{0.573} = 364 \text{ kJ/kg}$$

ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON

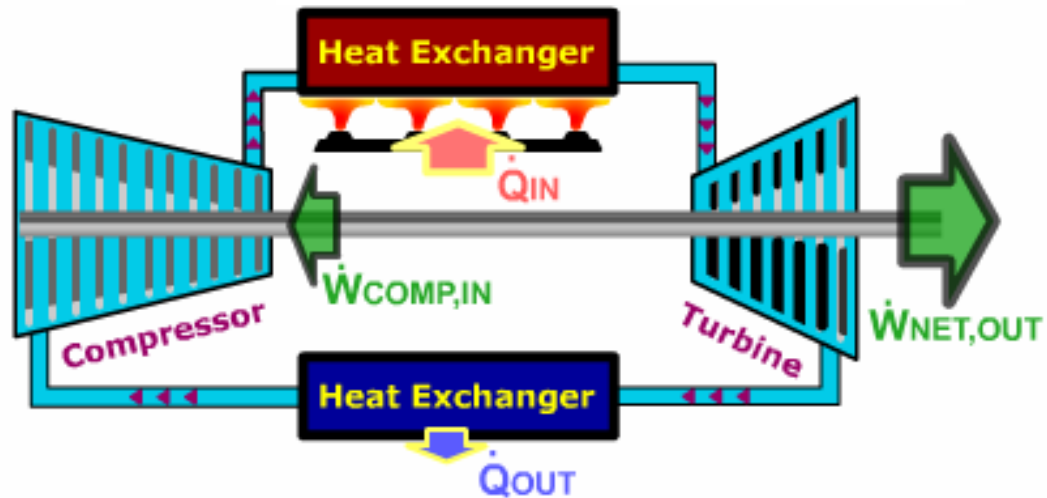
ΑΝΟΙΚΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

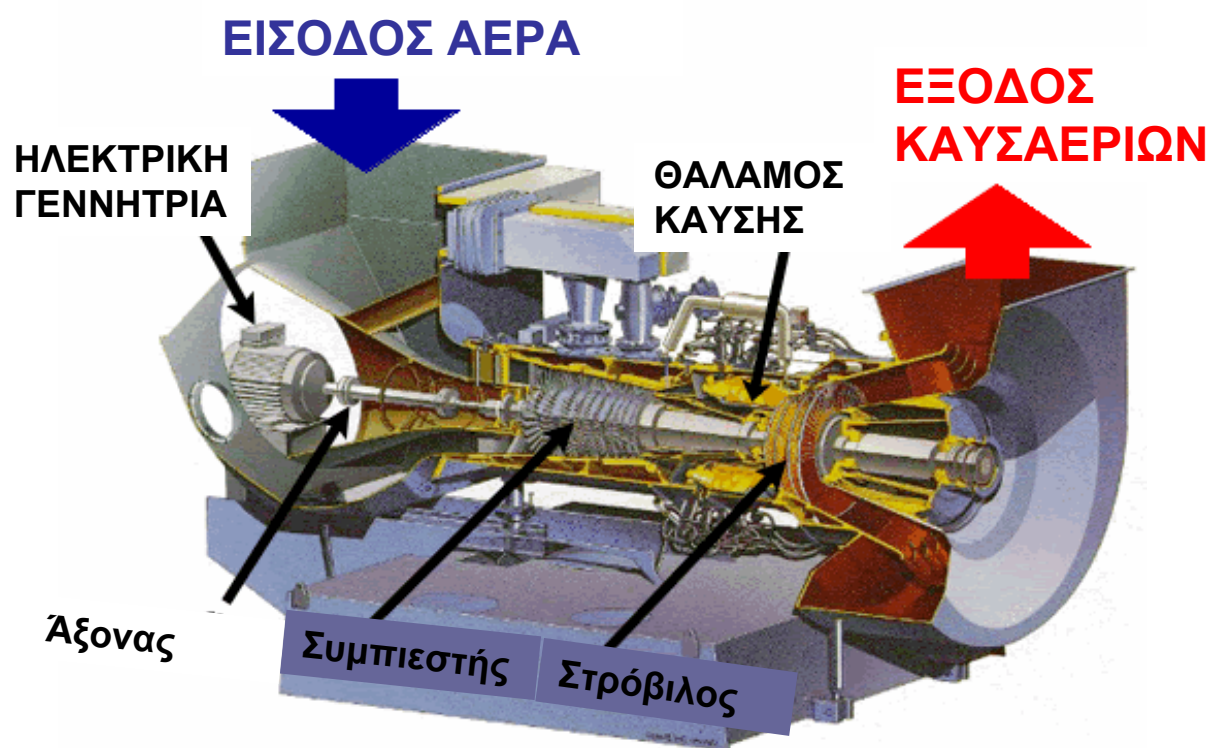
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΚΑΥΣΗ



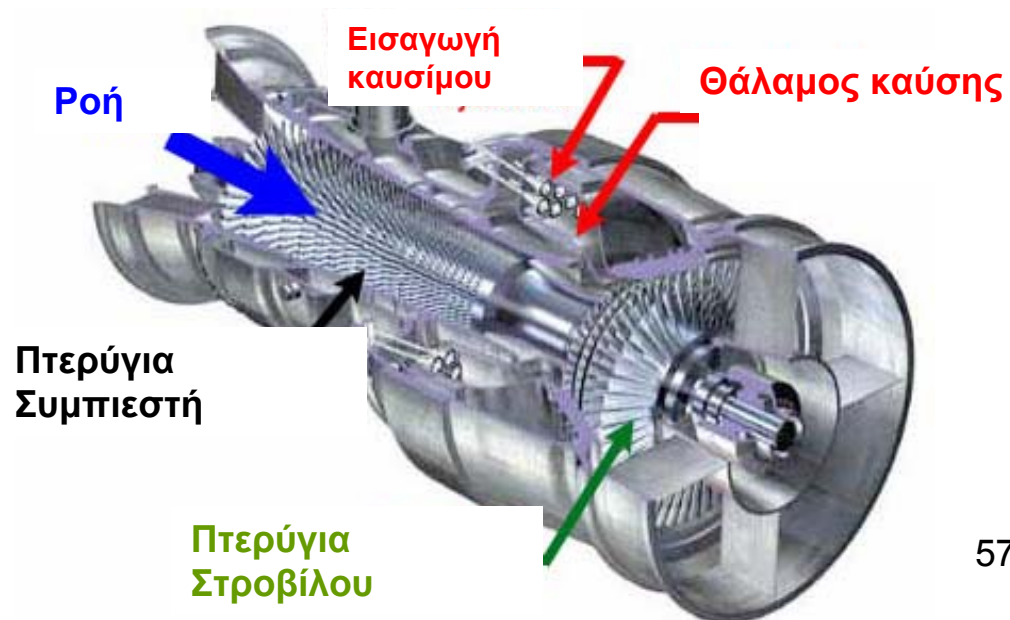
ΚΛΕΙΣΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΚΑΥΣΗ

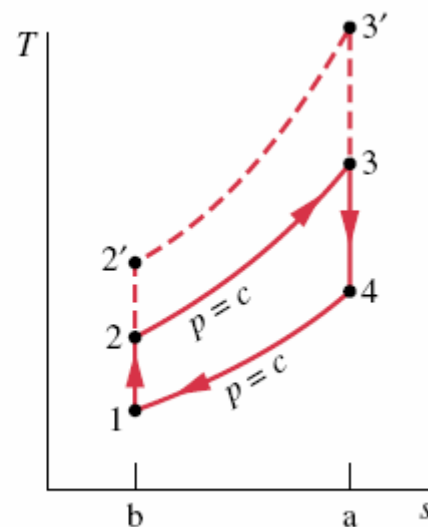
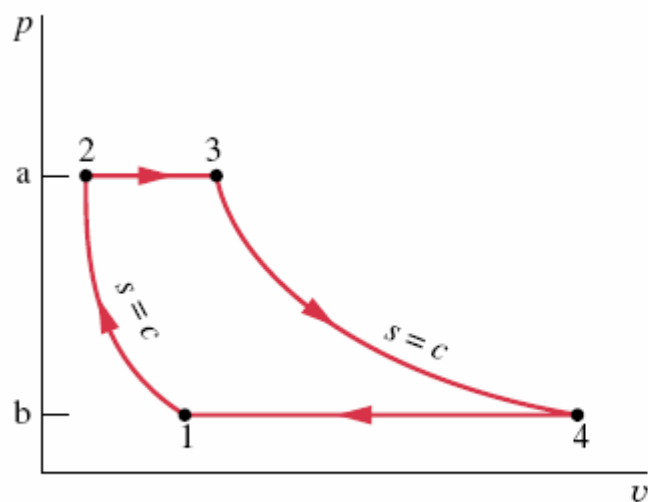
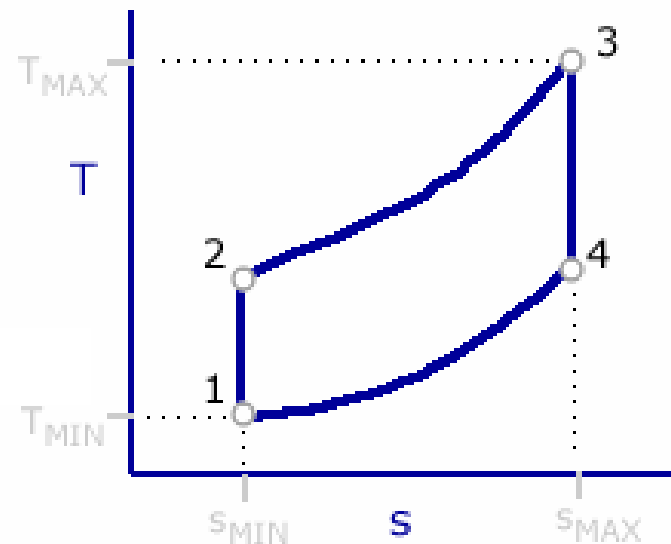
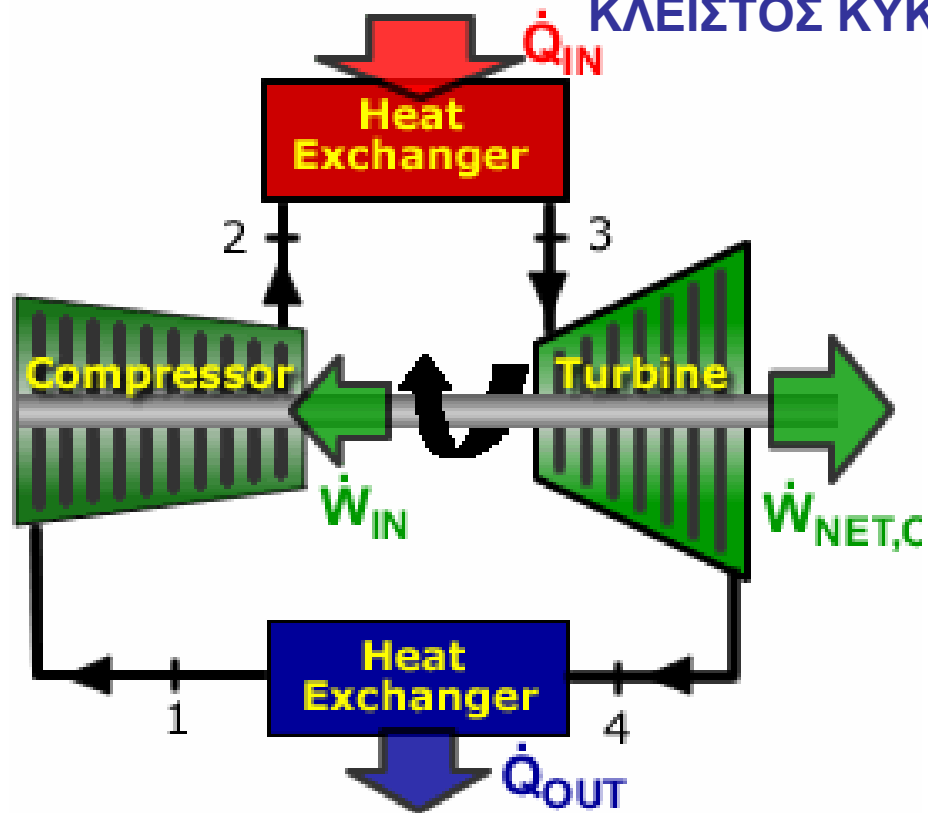




ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ



ΚΛΕΙΣΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ BRAYTON



ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΟΥ BRAYTON

$$\eta_{\text{CYCLE}} = 1 - \frac{q_{\text{OUT}}}{q_{\text{IN}}} \quad \Leftarrow \quad \text{Ιδανικός Brayton} \quad \begin{cases} q_{\text{OUT}} = c_p (T_4 - T_1) \\ q_{\text{IN}} = c_p (T_3 - T_2) \end{cases}$$

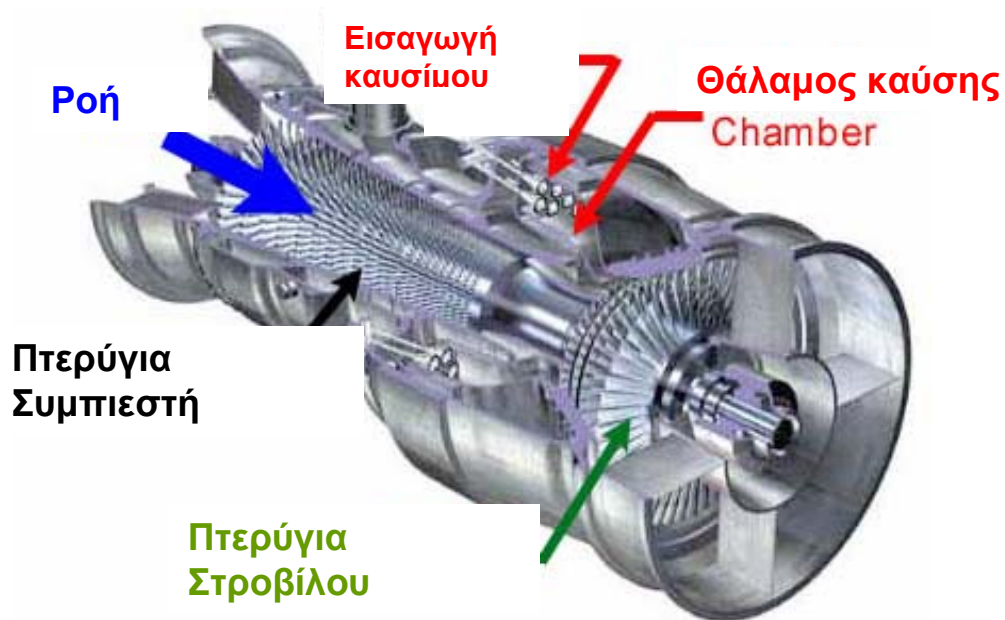
$$\Rightarrow \eta_{\text{BRAYTON,IAS}} = 1 - \frac{\cancel{c_p} (T_4 - T_1)}{\cancel{c_p} (T_3 - T_2)} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

Ισχύει από ισηντροπικές μεταβολές:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = r_p^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_3}{T_4} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \\ \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \end{cases}$$

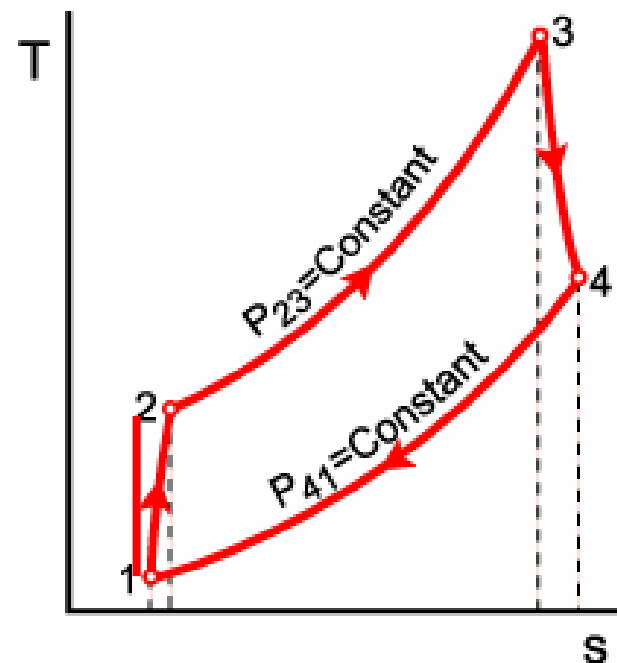
Αντικαθιστώντας στη σχέση του βαθμού απόδοσης:

$$\Rightarrow \eta_{\text{BRAYTON,IAS}} = 1 - \left(\frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \right) \frac{\cancel{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}}{\cancel{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$



Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή

$$\eta_{S,COMP} = \frac{w_{IN,S}}{w_{IN,ACT}}$$



Πραγματικός κύκλος Brayton με απώλειες στο συμπιεστή και στο στρόβιλο

ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ BRAYTON

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

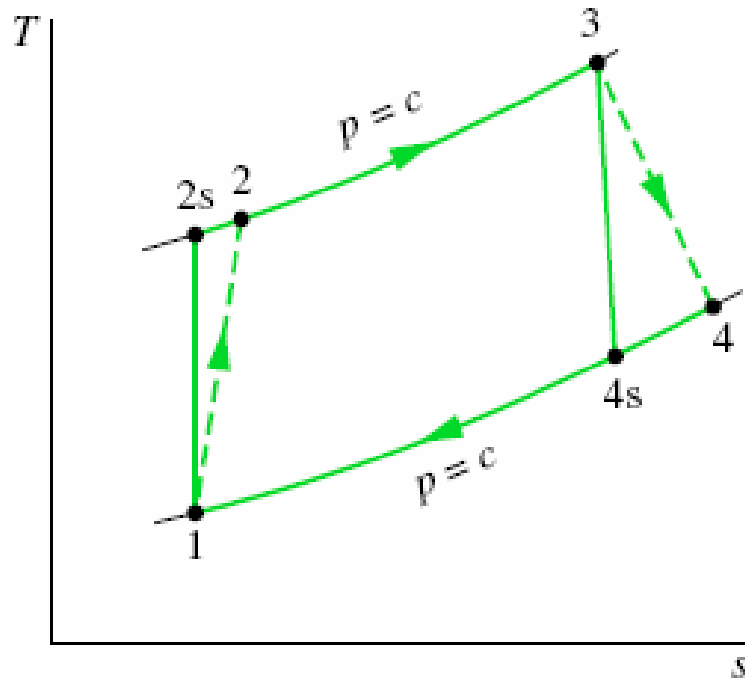
$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} \right)$$

$$T_4/T_1 = T_3/T_2, \text{ so}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

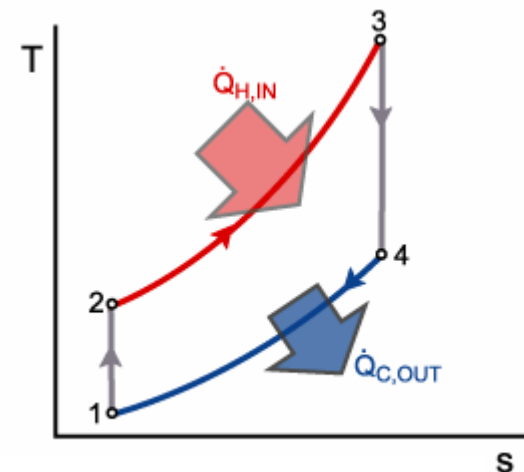
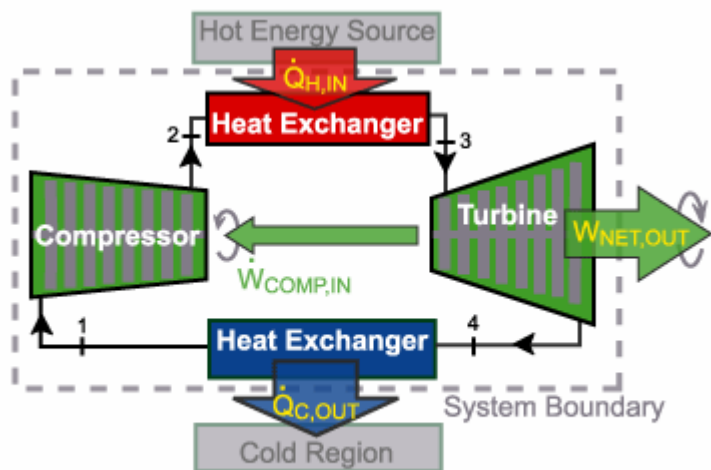
$$\eta = 1 - \frac{1}{(p_2/p_1)^{(k-1)/k}} \quad (k \text{ constant})$$

ΙΣΕΝΤΡΟΠΙΚΟΙ ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

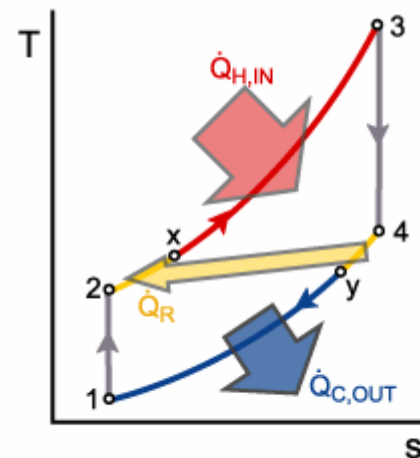
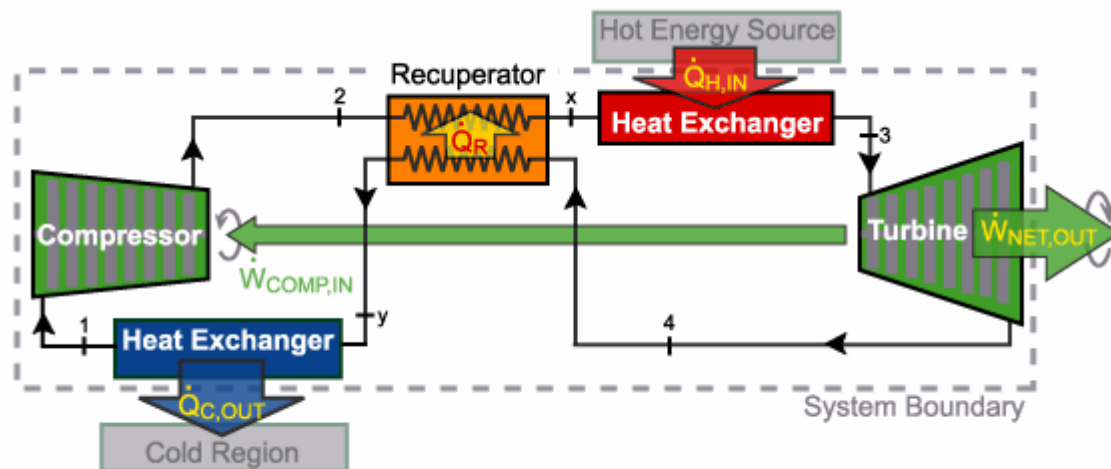


ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ $\longrightarrow \eta_t = \frac{(\dot{W}_t/\dot{m})}{(\dot{W}_t/\dot{m})_s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$

ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ $\longrightarrow \eta_c = \frac{(\dot{W}_c/\dot{m})_s}{(\dot{W}_c/\dot{m})} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$



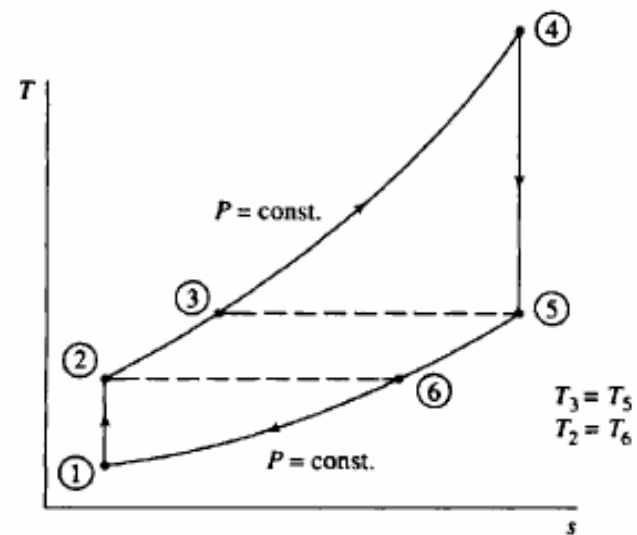
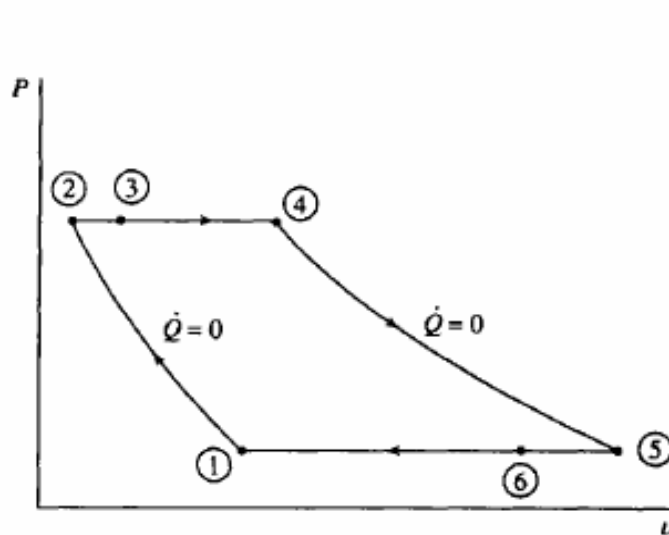
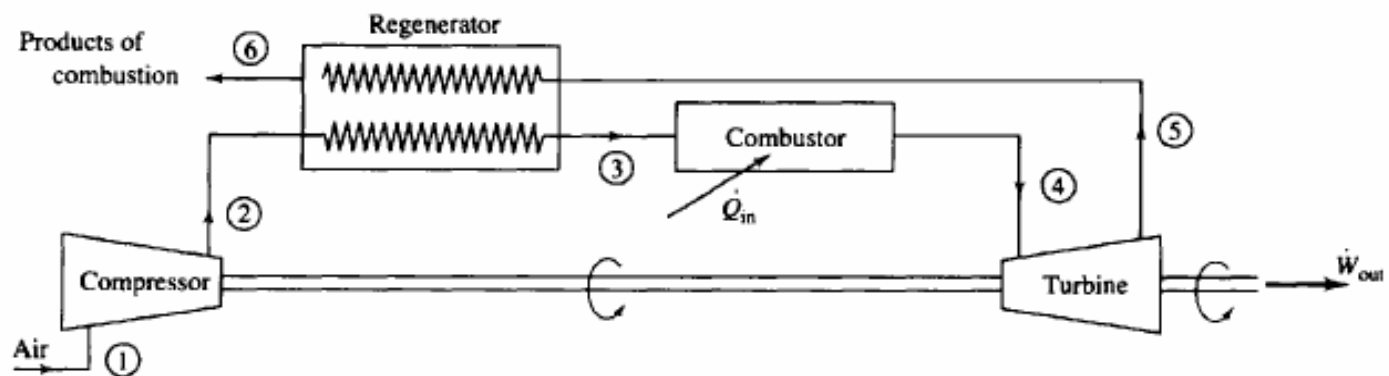
Απλός κύκλος Brayton



Κύκλος Brayton με αναγέννηση

$$\eta = \frac{w_{\text{turb}} - w_{\text{comp}}}{q_{\text{in}}}$$

$$q_{\text{in}} = c_p(T_4 - T_3) \quad w_{\text{turb}} = c_p(T_4 - T_5)$$



$$T_3 = T_5, \quad q_{\text{in}} = w_{\text{turb}}$$

$$\eta = 1 - \frac{w_{\text{comp}}}{w_{\text{turb}}} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_4 - T_5} = 1 - \frac{T_1}{T_4} \frac{T_2/T_1 - 1}{1 - T_5/T_4}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_4} \frac{(P_2/P_1)^{(k-1)/k} - 1}{1 - (P_1/P_2)^{(k-1)/k}} = 1 - \frac{T_1}{T_4} r_p^{(k-1)/k}$$

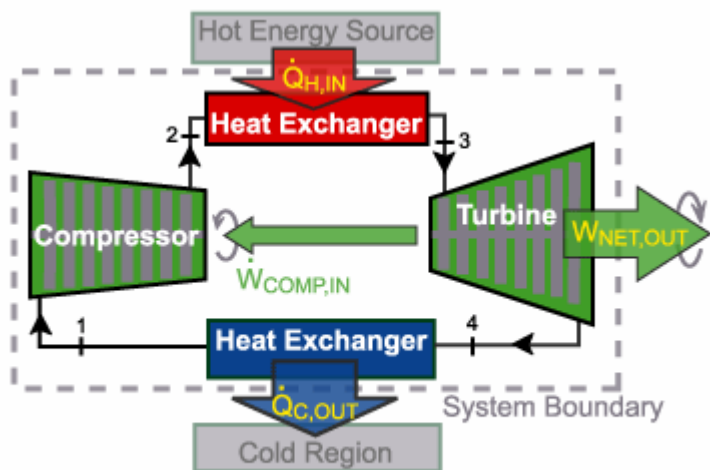
Στην πράξη η θερμοκρασία του αέρα που εξέρχεται από τον αναγεννητή πρέπει να είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία του αέρα που εισέρχεται στην κατάσταση 5.

Αποδοτικότητα αναγεννητή

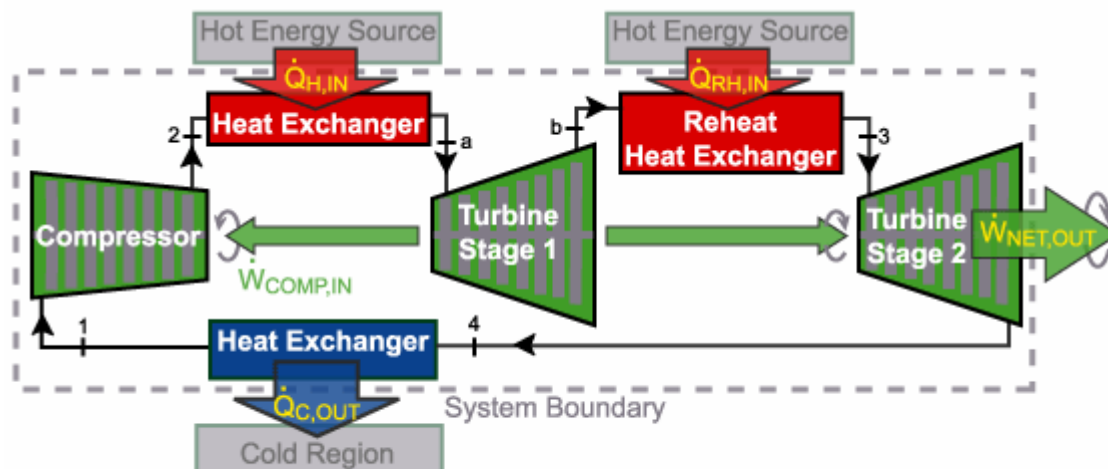
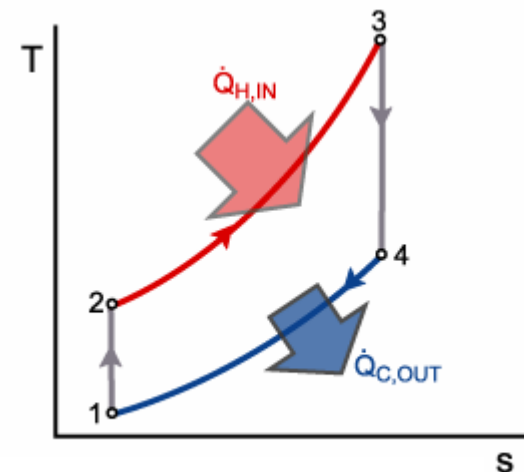
$$\eta_{\text{reg}} = \frac{h_3 - h_2}{h_5 - h_2} \quad (9.40)$$

$$\eta_{\text{reg}} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2} \quad (9.41)$$

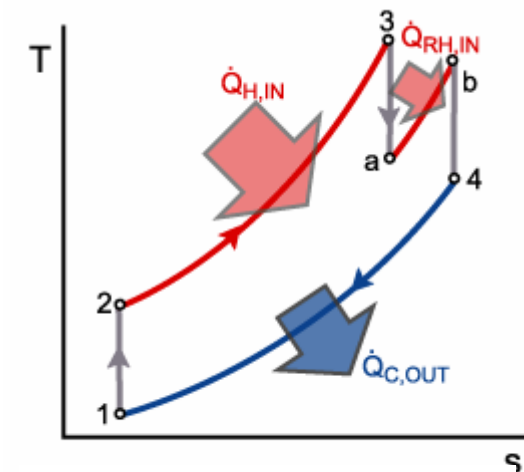
Για τον ιδανικό αναγεννητή $T_3=T_5$, Άρα $\eta_{\text{reg}}=1$

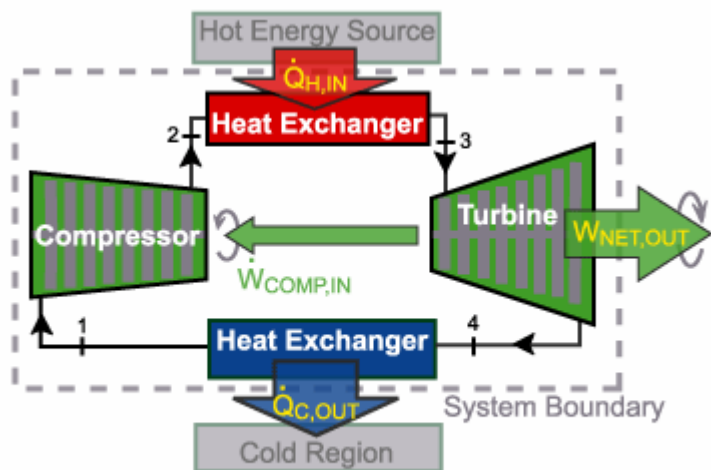


Απλός κύκλος Brayton

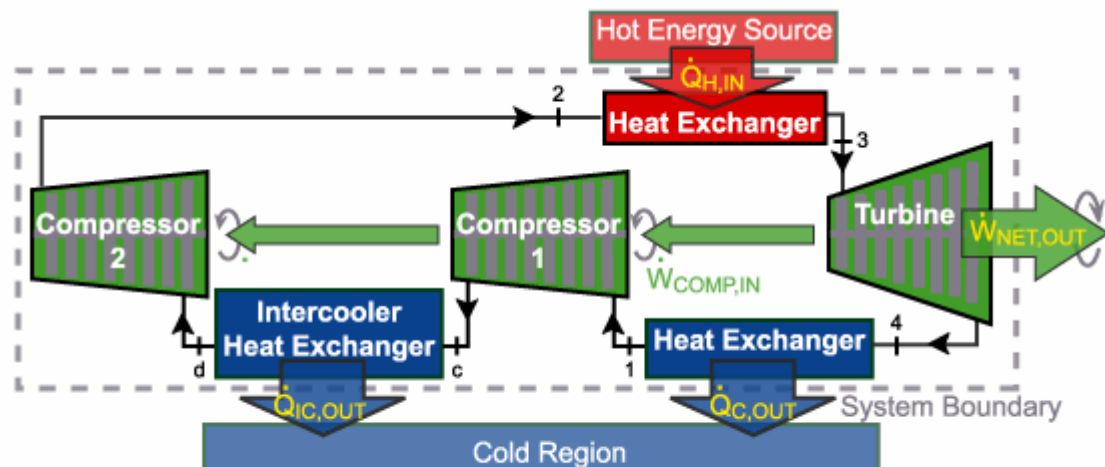
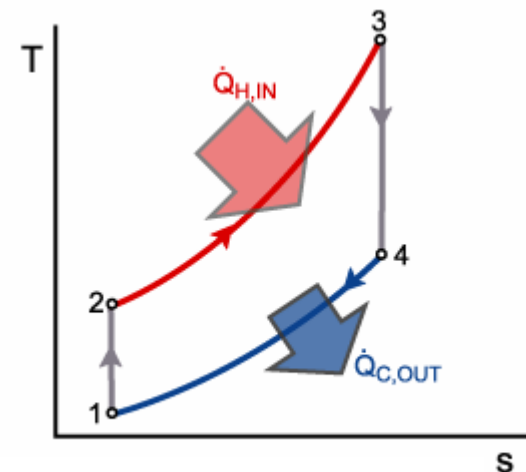


Κύκλος Brayton με αναθέρμανση

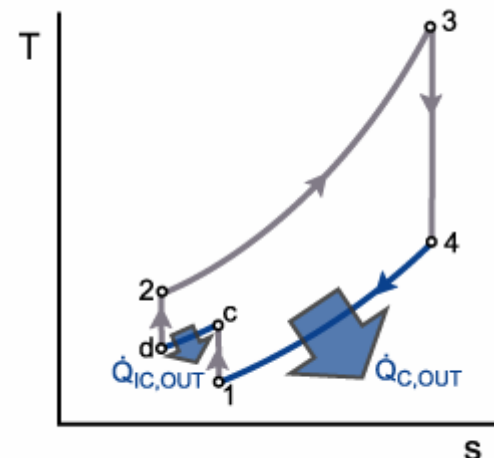




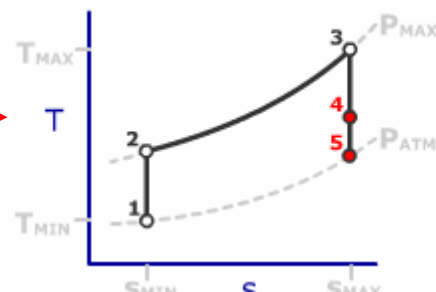
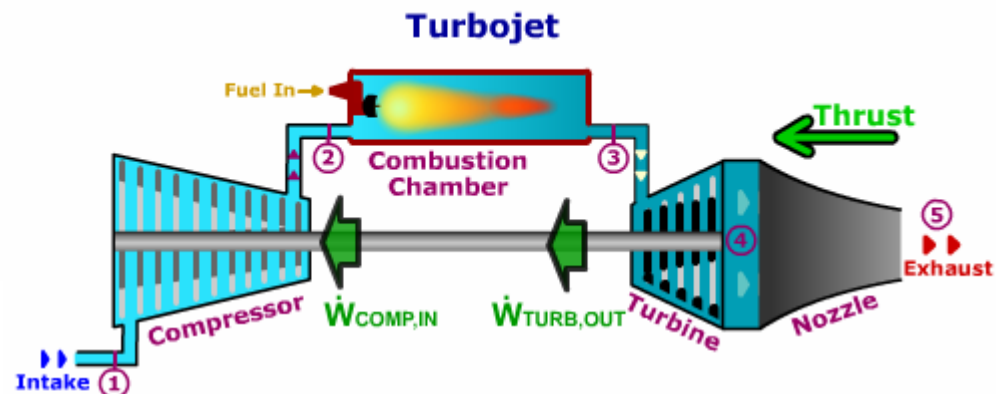
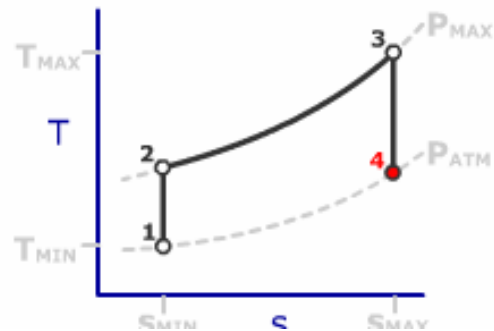
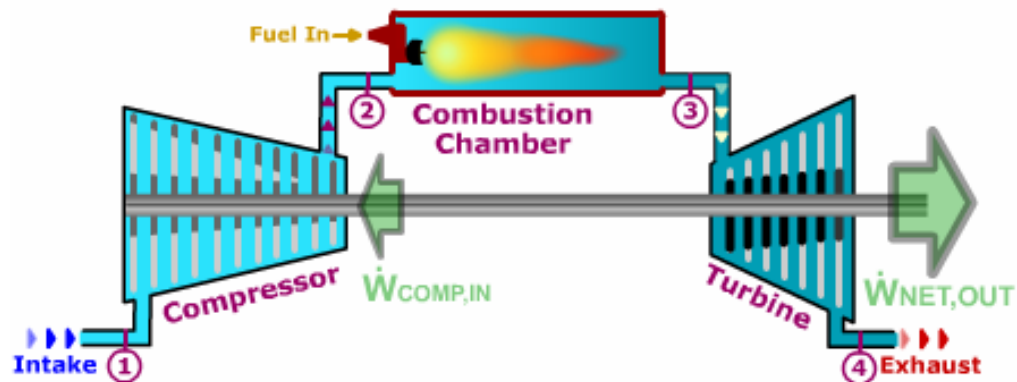
Απλός κύκλος Brayton



Κύκλος Brayton με ενδιάμεση ψύξη



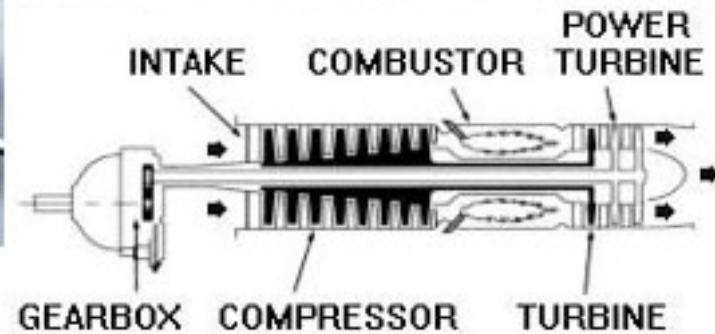
ΠΡΩΘΗΤΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ



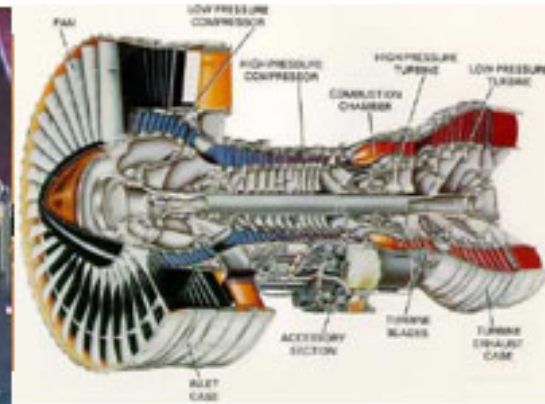
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Μικρή επιτάχυνση μεγάλης μάζας ρευστού

Prop-Jet Engines

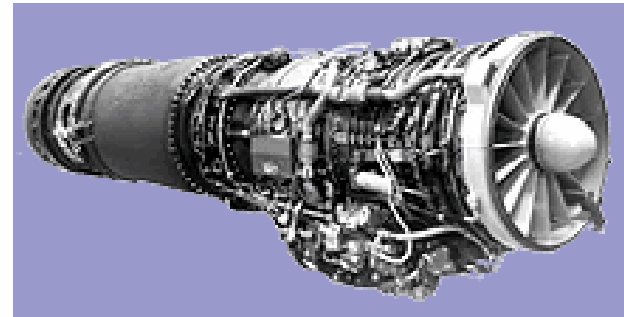


Fan-Jet Engines

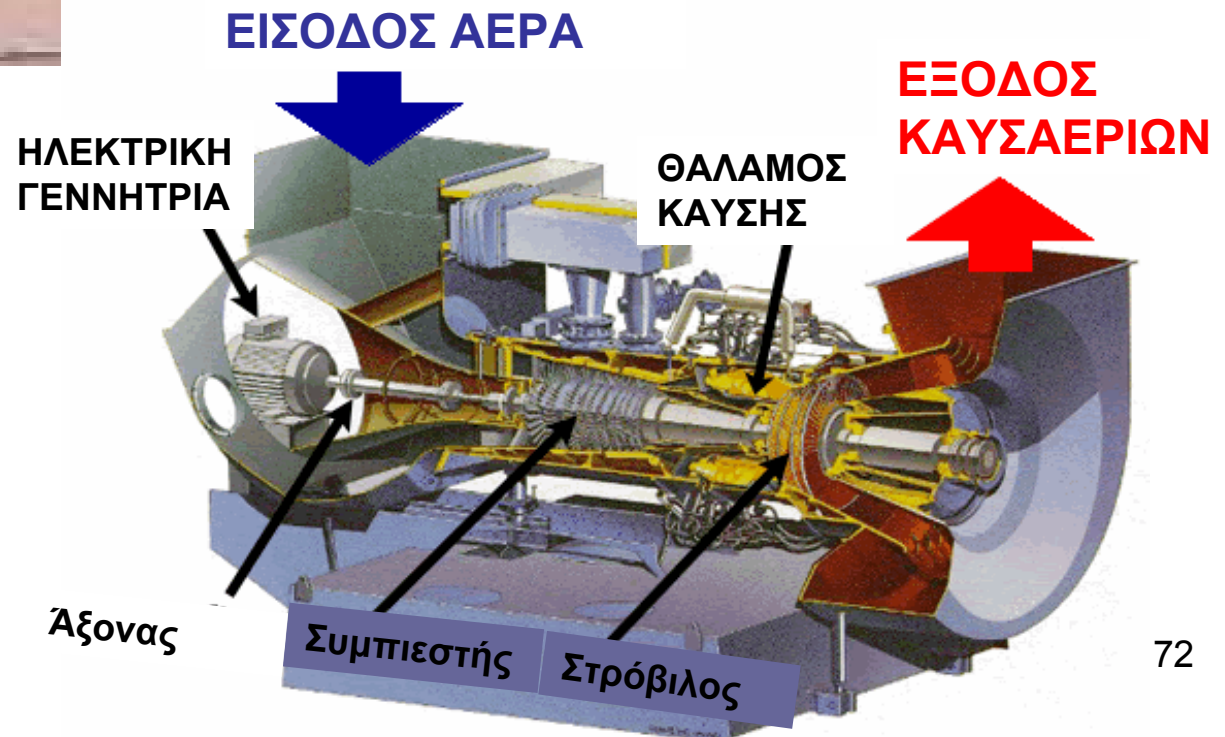
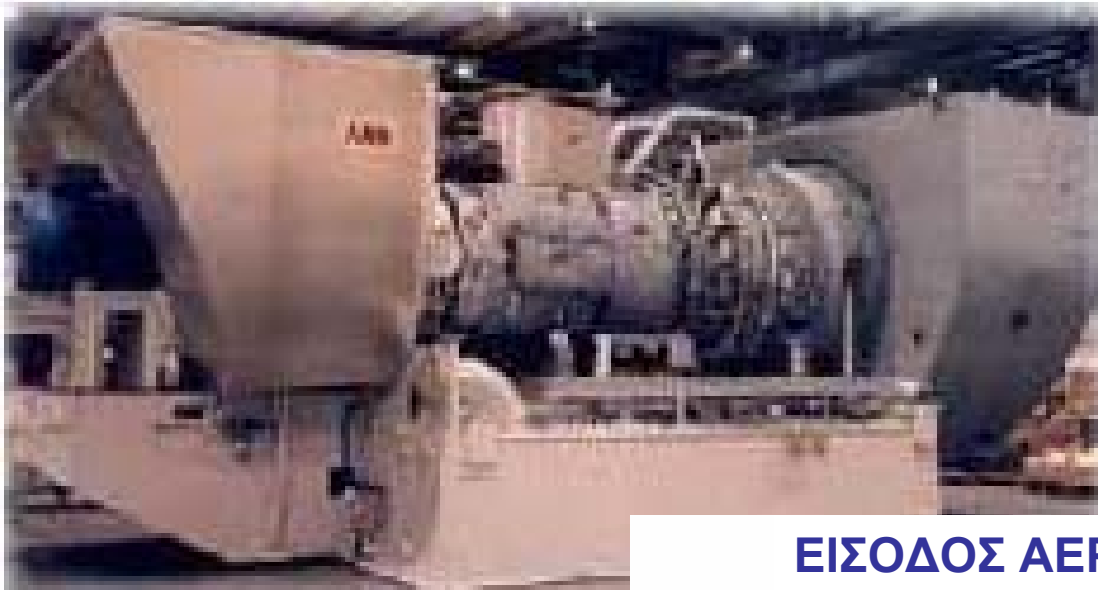


Μεγάλη επιτάχυνση μικρής μάζας ρευστού

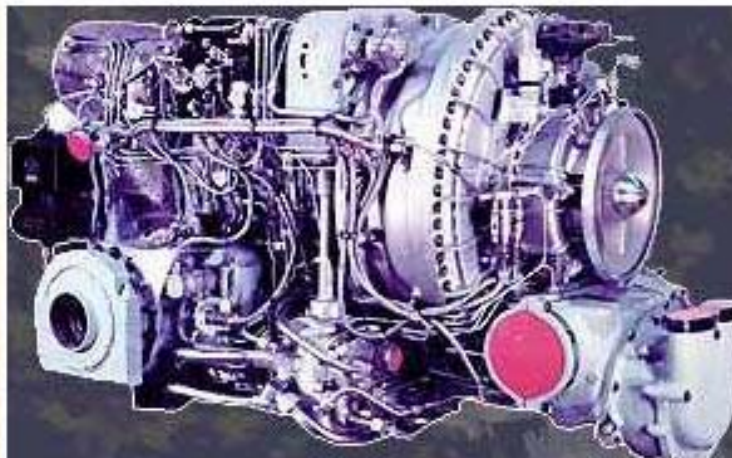
Turbojet Engine



Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ



ΠΛΟΙΑ



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

1. Κουρεμένος Δ.Α., ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Ι, Εκδόσεις Συμεων, 1993
2. Schmidt P.S., Ezekoye O., Howell J.R., Baker D., Thermodynamics: An Integrated Learning System, Wiley, 2005.
3. Potter M.C., Sommerton C.W., Thermodynamics for Engineers, Schaums, McGraw-Hill, 1993
4. Moran M.J., Shapiro H.W., Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2006