



**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ**  
**ΕΙΣΑΓΩΓΗ & ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΧΡΗΣΙΜΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ**  
**(ΣΤ ΕΞΑΜΗΝΟ)**

**Νίκος Μ. Κατσουλάκος**  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ  
ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ  
(ΚΑΙ ΟΧΙ ΜΟΝΟ...)



# Τι είναι οι στρόβιλοι;

Οι στρόβιλοι ή τουρμπίνες είναι μία κατηγορία κινητήρων, των στροβιλομηχανών, που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της θερμικής ή κινητικής ενέργειας ενός ρευστού σε ωφέλιμο έργο.

- **Υδροστρόβιλοι**

- **Ατμοστρόβιλοι**
- **Αεριοστρόβιλοι**

Οι κινητήριες μηχανές που χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο τον ατμό διακρίνονται σε **εμβολοφόρες ή παλινδρομικές** και σε **περιστροφικές ή ατμοστροβίλους**

## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Απουσία παλινδρομικών και τριβόμενων εξαρτημάτων: μικρές ανάγκες λίπανσης, ελάχιστα προβλήματα ζυγοστάθμισης
- Σχετικά υψηλή απόδοση

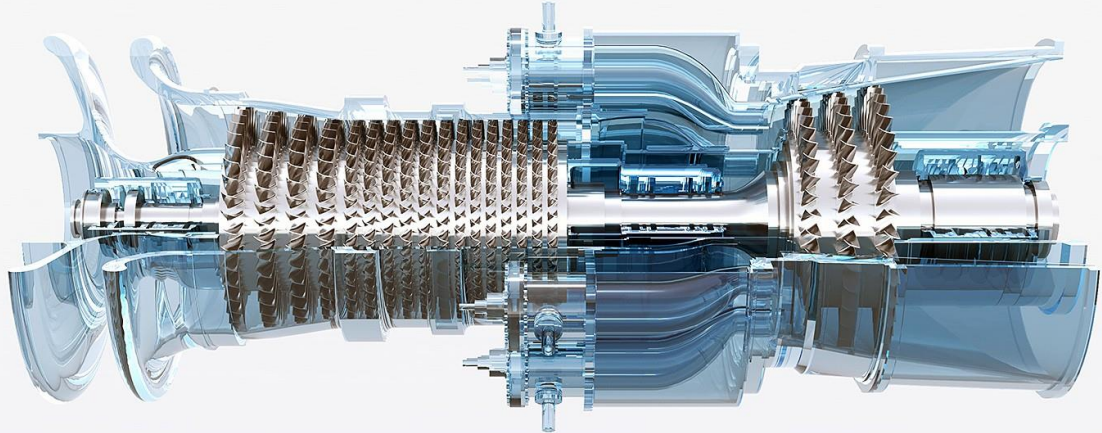
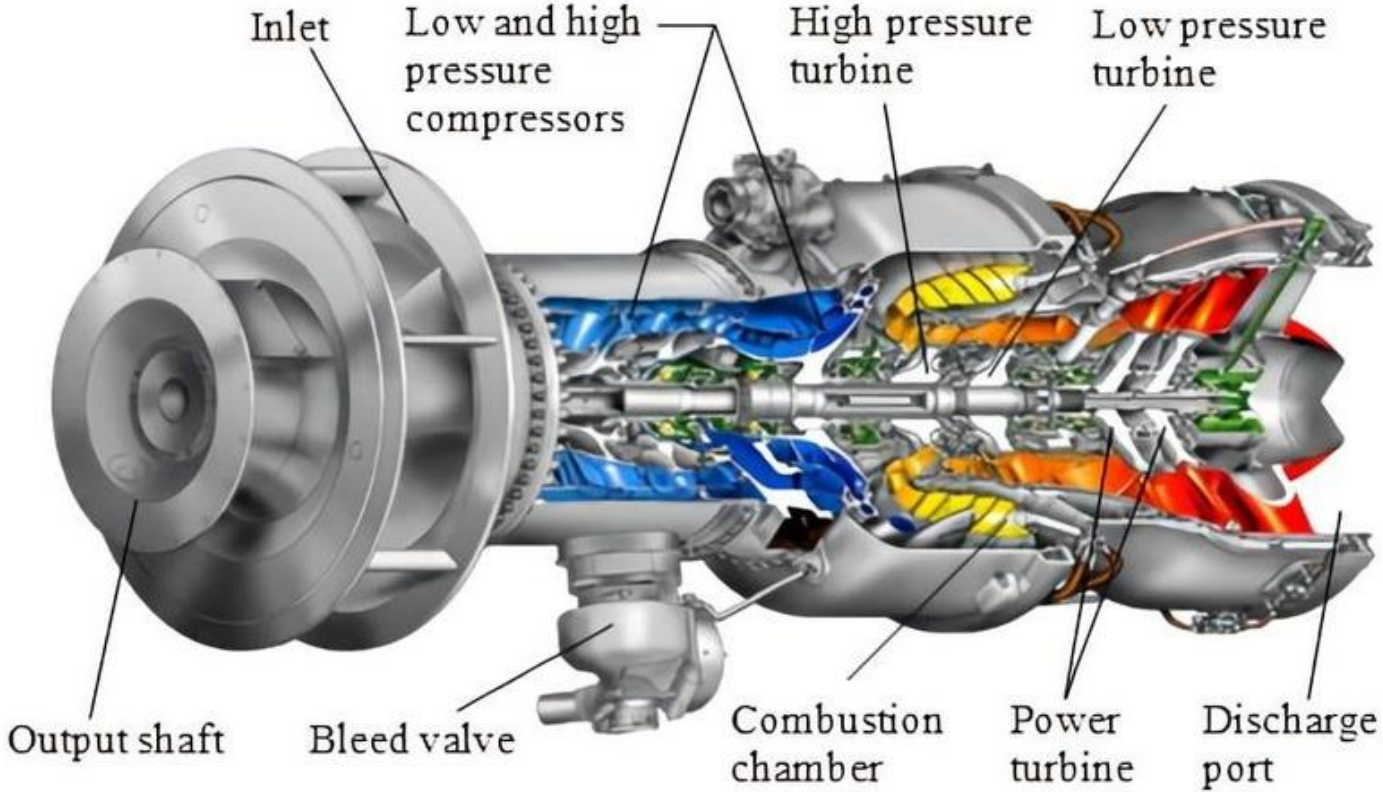


## ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

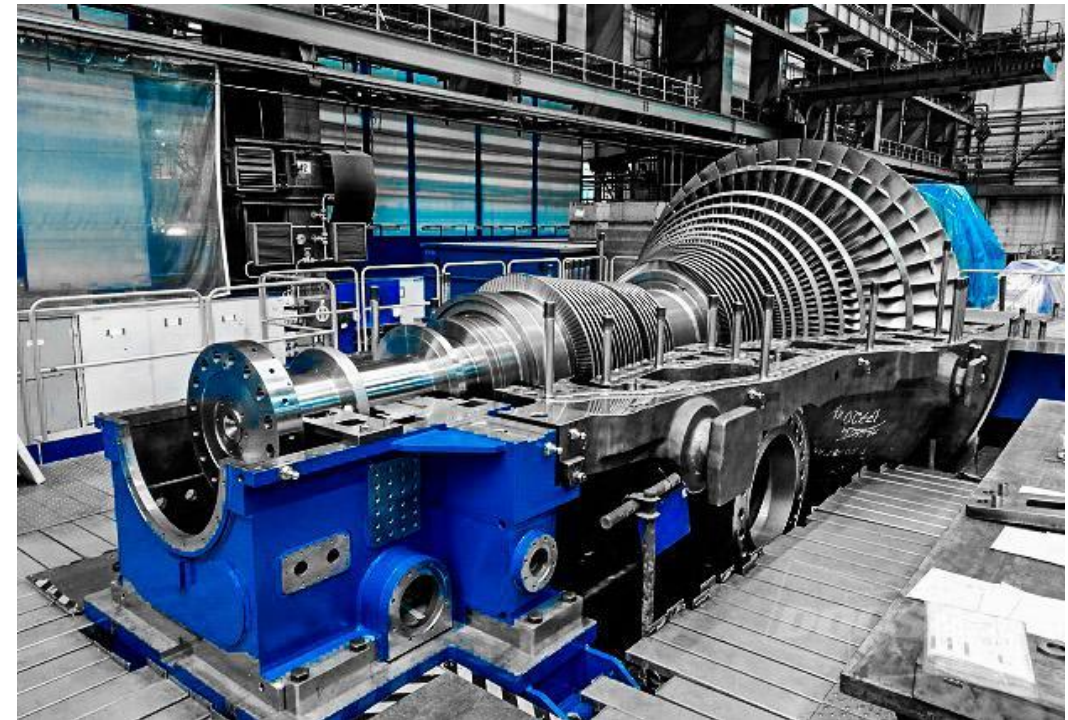
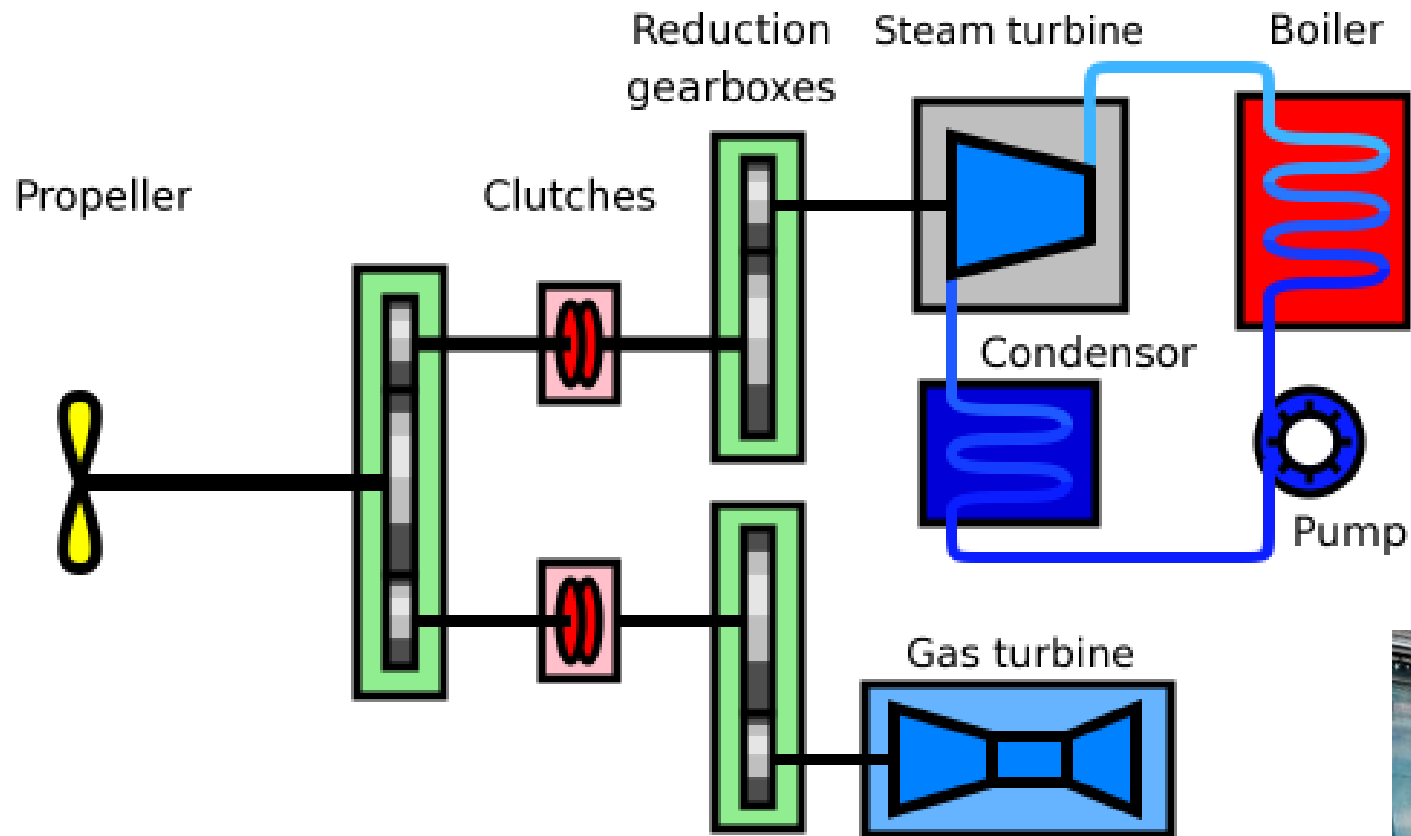
- Στην περίπτωση των ατμοστροβίλων, χρειάζεται η παραγωγή ατμού υψηλής πίεσεως από δαπανηρές εγκαταστάσεις
- Στην περίπτωση των αεριοστροβίλων, παρατηρείται υψηλό κόστος αγοράς και αυξημένη κατανάλωση καυσίμου



# Αεριοστρόβιλος (Gas Turbine)



# Ατμοστρόβιλος (Steam Turbine)



## Κύριες διαφορές αεριοστροβίλων - ατμοστροβίλων

### Difference Between Gas Turbine and Steam Turbine in Tabular form:

S.no	Gas Turbine	Steam Turbine
1.	In the gas turbine, the compressor and combustion chamber are important components.	In the steam turbine, the steam boiler and accessories are important components.
2.	Less space for installation is required.	More space for installation is required.
3.	The mass of gas turbines per kW produced is less.	The mass of the steam turbine per kW produced is more.
4.	Less installation and running cost.	More installation and running costs.
5.	With the changing load conditions, its control is easy.	Its control is difficult, with the changing load condition.
6.	The starting of this turbine is easy and quick.	The starting of the steam turbine is not easy and takes a long time.
7.	A gas turbine does not depend on water supply.	A steam turbine depends upon water supply.
8.	Its efficiency is less.	Its efficiency is high.

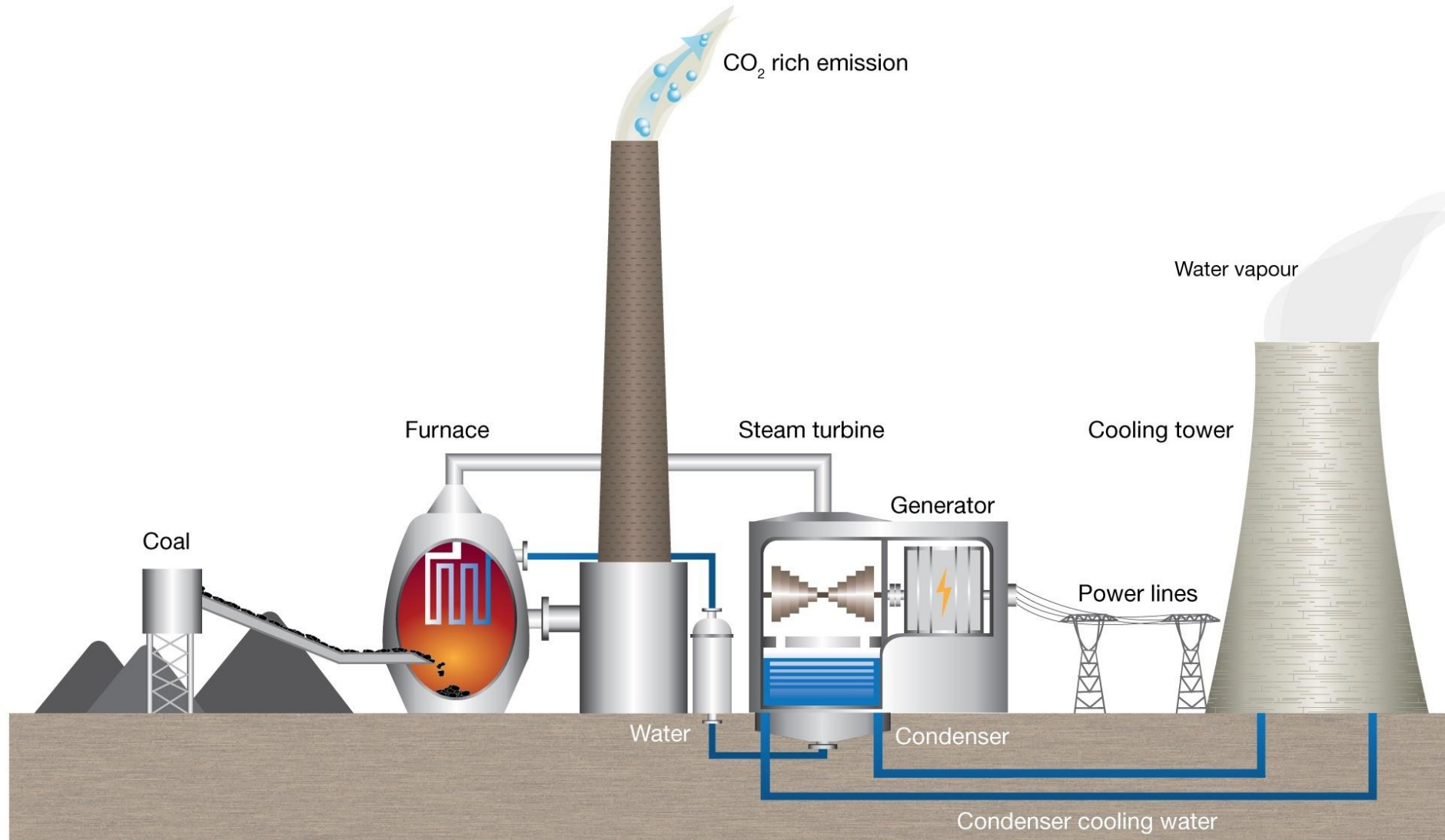


*Ποια είναι η κύρια εφαρμογή των  
ατμοστροβίλων (εκτός της ναυτιλίας);;*

**Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε  
ατμοηλεκτρικούς σταθμούς**

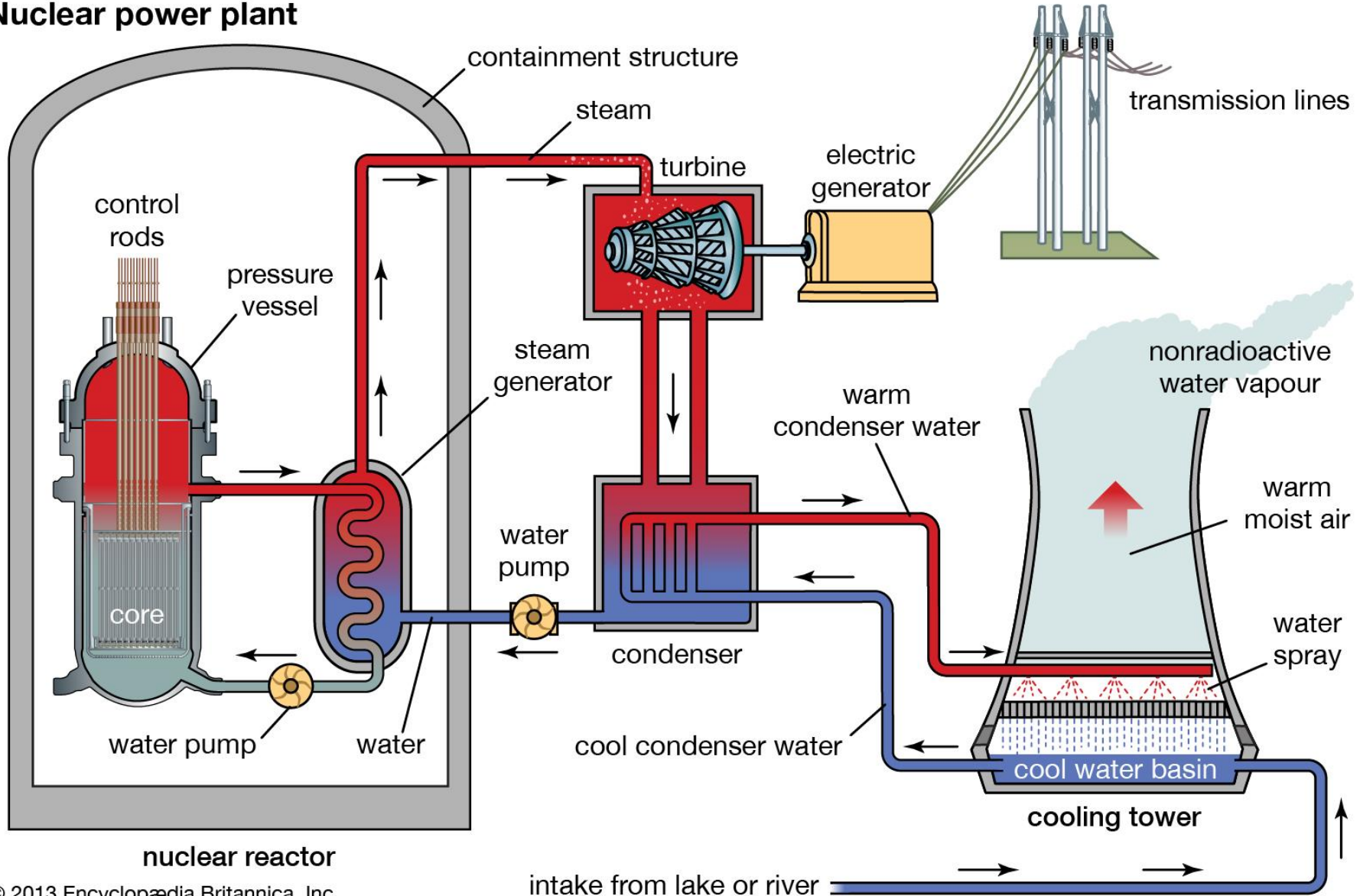


# Διάγραμμα ατμοηλεκτρικού σταθμού με στερεό καύσιμο (π.χ. λιγνίτης)



# Διάγραμμα ατμοηλεκτρικού σταθμού με πυρηνικό καύσιμο

Nuclear power plant





Πόσο ουράνιο χρειάζεται ένας πυρηνικός σταθμός ανά έτος;

**27 kg / MWe**

Ποιο είναι η αντίστοιχη ποσότητα άνθρακα;

**2.500 tn / MWe**

---

Πόσο κοστίζει το πυρηνικό καύσιμο;

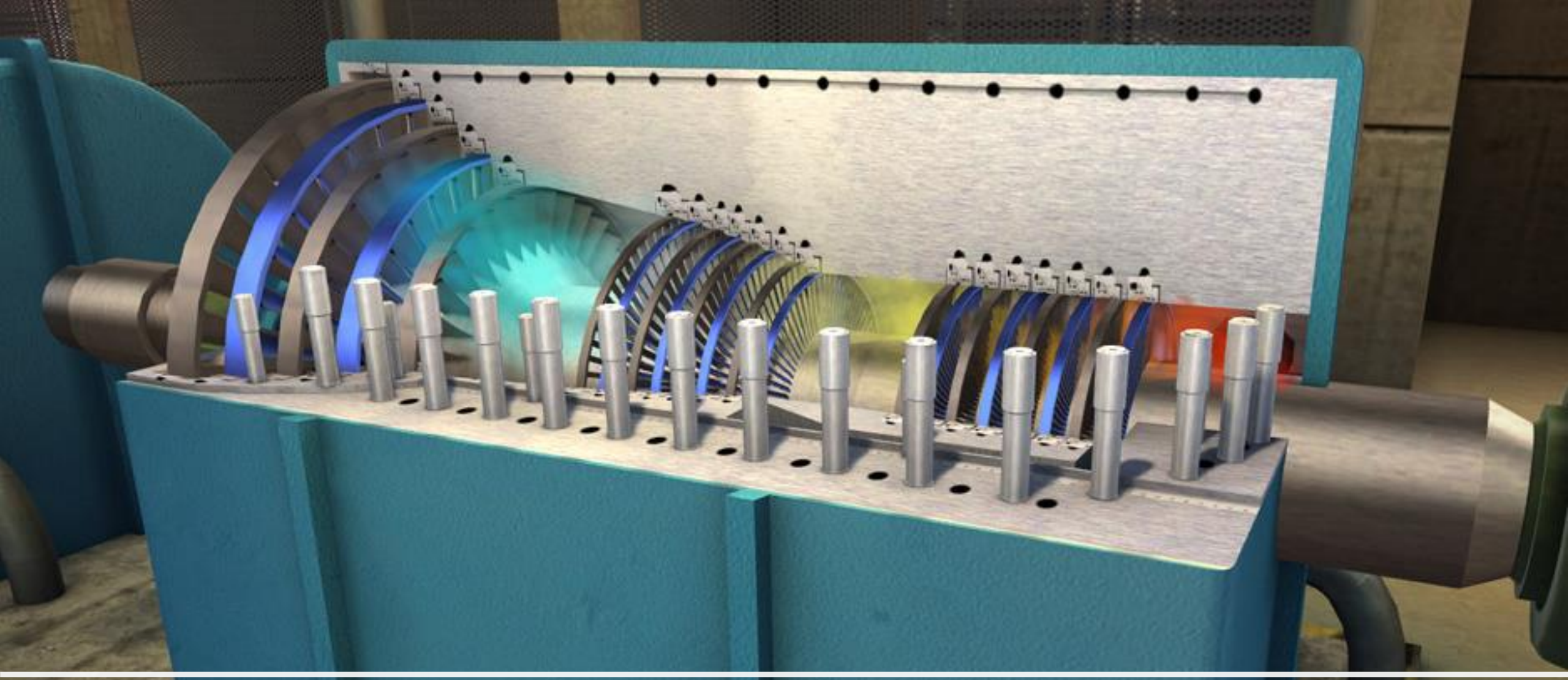
**1.400 \$ / kg**

Πόσο κοστίζει ο άνθρακας;

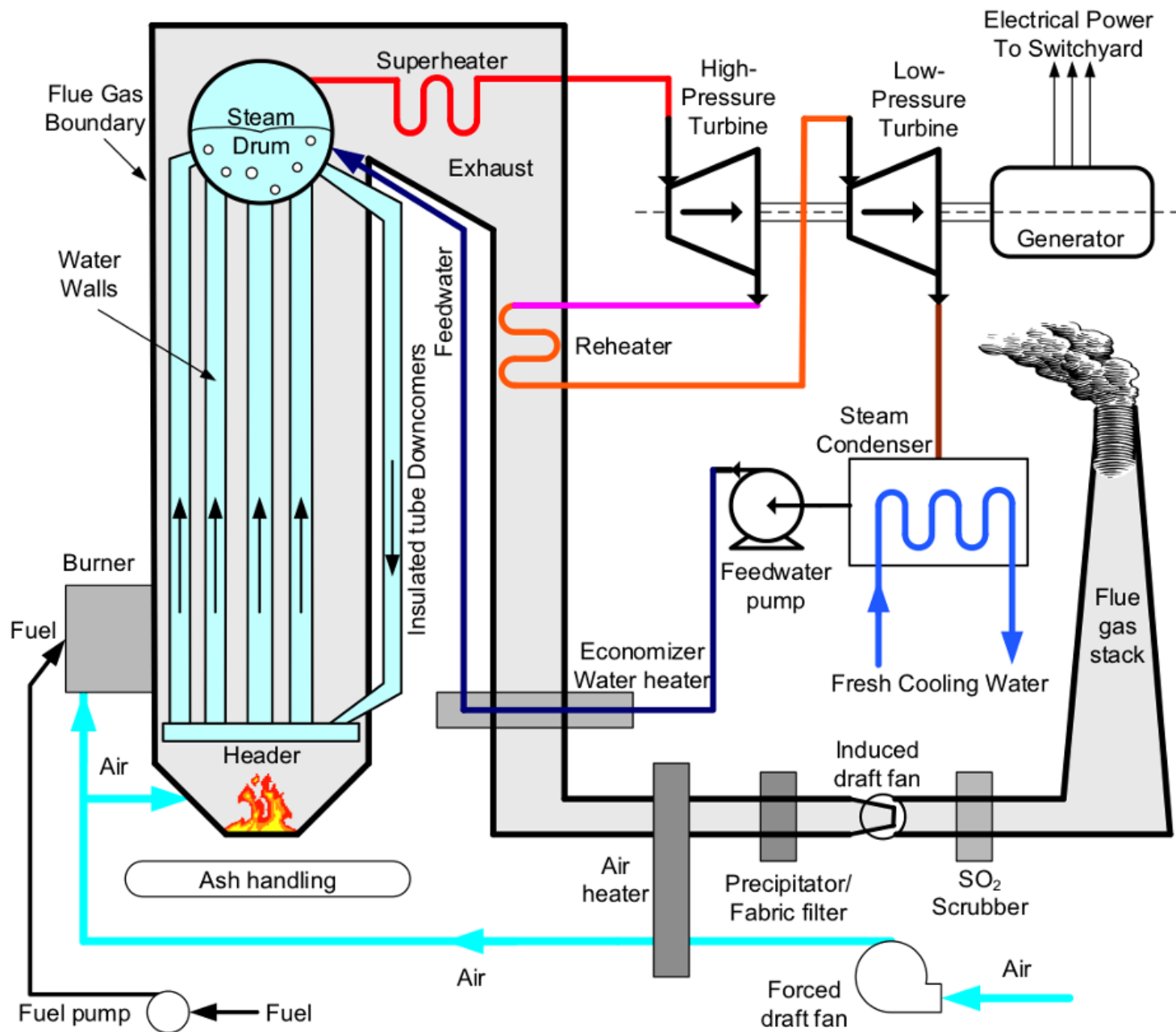
**170 \$ / tn**

---

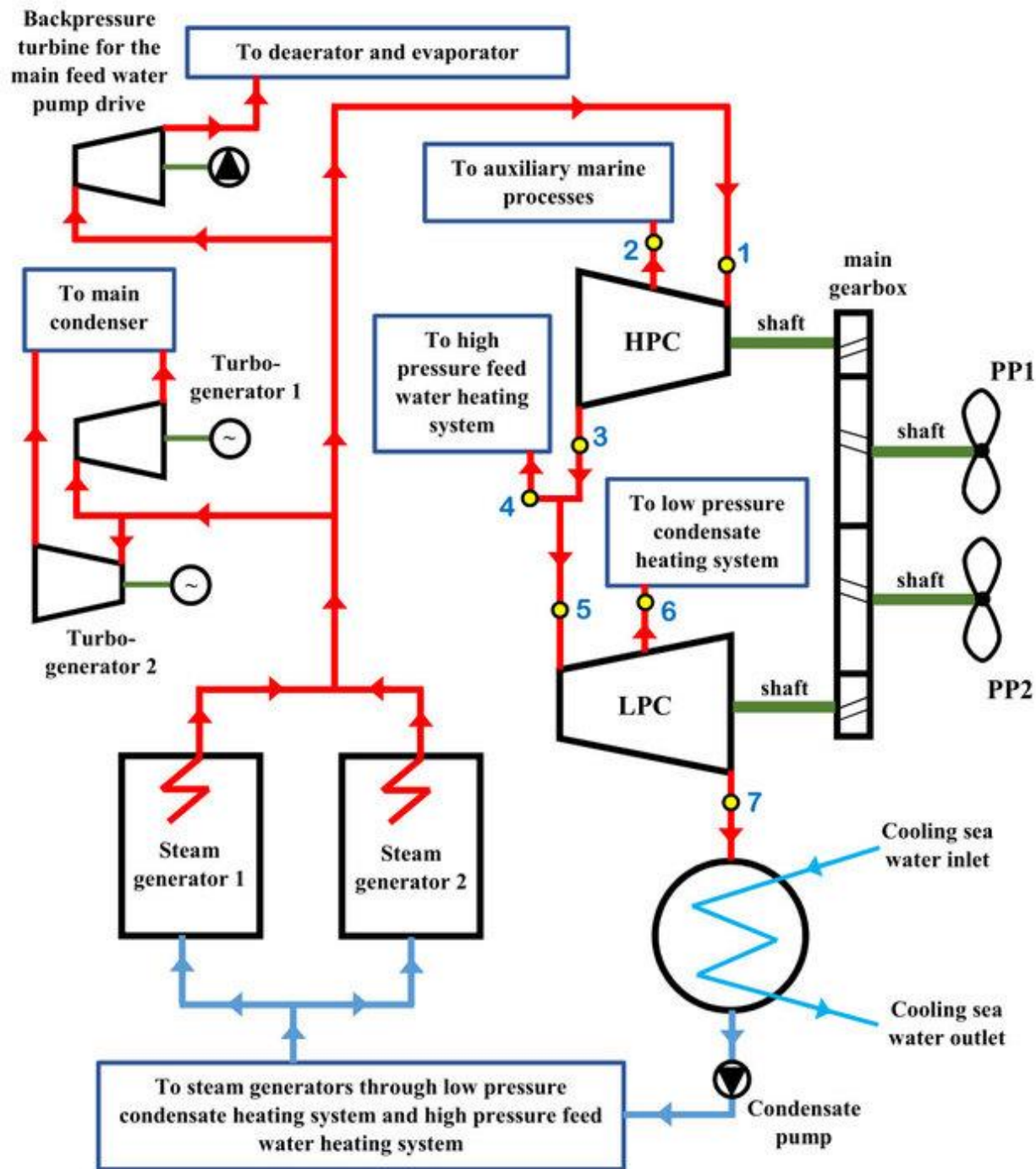
- Ποσοστό κόστους καυσίμου στο συνολικό κόστος λειτουργίας ανθρακικού σταθμού: **έως 80%**
- Ποσοστό κόστους καυσίμου στο συνολικό κόστος λειτουργίας πυρηνικού σταθμού: **έως 15%**



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΤΩΝ ΑΡΧΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

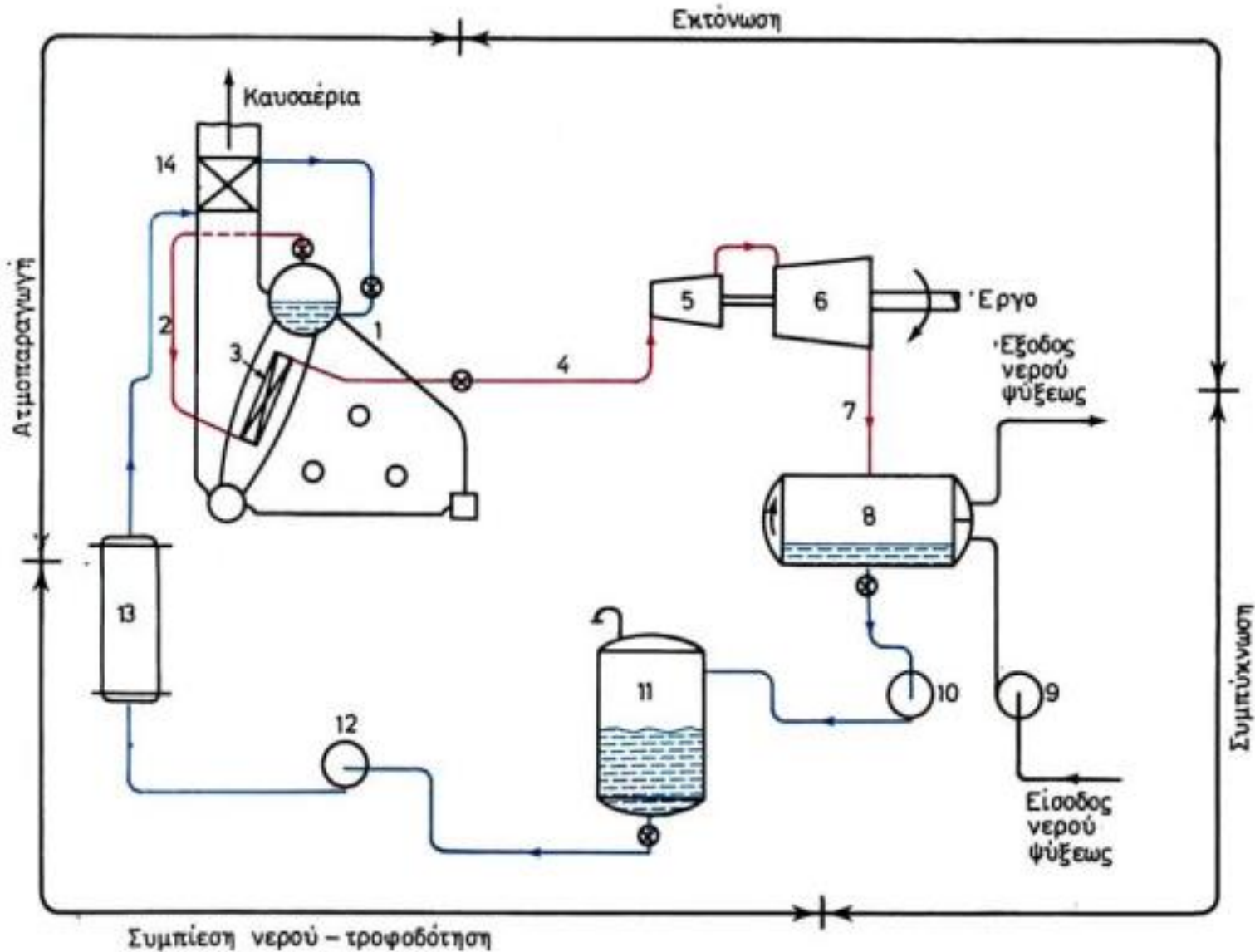


# Διάγραμμα ροής ατμοηλεκτρικού σταθμού με υπερθερμαντήρα / αναθερμαντήρα



## Εφαρμογή ατμοστροβίλων σε πλοίο (γενική διάταξη)

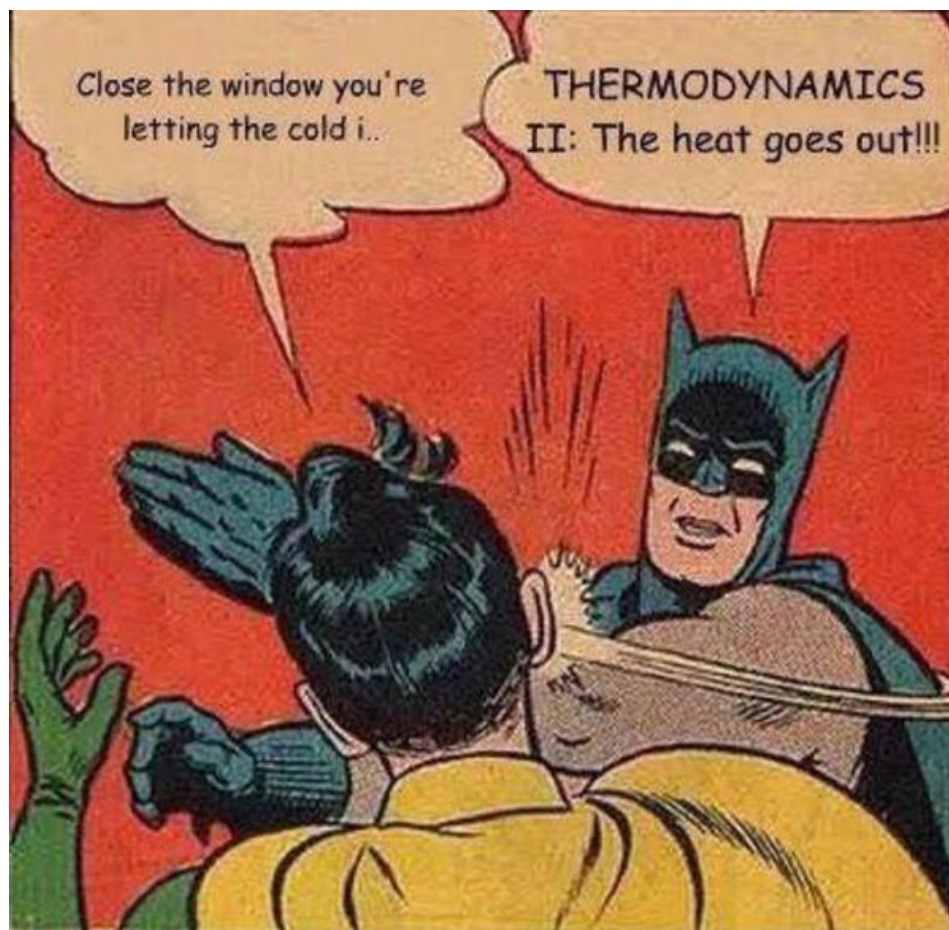
# Εφαρμογή ατμοστρόβιλων σε πλοίο (διάταξη με διάφορες συσκευές)



## ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- 1) Ατμολέβητας. 2) Ατμαγωγός κεκορεσμένου ατμού. 3) Υπερθερμαντήρας. 4) Ατμαγωγός υπέρθερμου ατμού. 5) Ατμοστρόβιλος Υ.Π. 6) Ατμοστρόβιλος Χ.Π. 7) Εξατμιστικός αγωγός. 8) Συμπυκνωτής (ψινείο). 9) Αντλία κυκλοφορίας θαλασσινού νερού ψύξεως. 10) Αντλία συμπυκνώματος (αεραντλία). 11) Εξαεριστική δεξαμενή UFT (de-aerating-feed tank) ή θερμοοροχείο. 12) Τροφοοτική αντλία. 13) Προθερμαντήρας. 14) Οικονομητήρας.

# ΟΛΙΓΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (ΞΑΝΑ...) ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ





# Ενέργεια – Ισχύς - Απόδοση

Έργο:  $W = F \cdot S$

$N \cdot m = J$

1 kcal = 4,186 kJ

Ισχύς:  $P = \frac{W}{t}$

$J/sec = W$

1 BTU = 1,055 kJ

1 PS = 0,736 kW

Βαθμός απόδοσης:  $\eta = \frac{\text{Ωφέλιμη ενέργεια}}{\text{Καταναλισκόμενη ενέργεια}}$



## Θερμογόνος ικανότητα (ή δύναμη) καυσίμου

Είναι η θερμική ενέργεια που εκλύεται κατά την καύση ενός κιλού στερεού ή υγρού καυσίμου ή ενός κυβικού μέτρου αερίου καυσίμου που βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες.

Τυπικές τιμές για διάφορα καύσιμα

- Πετρέλαιο: 9,77 kWh/ lit
- Φυσικό αέριο: 10,35 kWh/ m<sup>3</sup>
- Pellets: 5 kWh/ kg
- Καυσόξυλο: 4 kWh/ kg

## Συντελεστής φόρτισης ενεργειακής μονάδας

$$C = \frac{E_{\omega\phi\epsilon\lambda\iota\mu\eta}(T)}{E_{\delta\iota\alpha\theta\epsilon\sigma\iota\mu\eta}(T)} = \frac{E_{\omega\phi\epsilon\lambda\iota\mu\eta}(T)}{P_{\epsilon\gamma\kappa\alpha\tau\epsilon\sigma\tau\eta\mu\epsilon\lambda\eta} \cdot T}$$

Ο συντελεστής αυτός εκφράζει ουσιαστικά τη διαθεσιμότητα μίας ενεργειακής μονάδας σε μια χρονική περίοδο  $T$ . Έτσι, ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα μπορεί να έχει  $C$  ακόμη και 99%. Από την άλλη, μία ανεμογεννήτρια που έχει διακυμάνσεις στη λειτουργία της, θα έχει συνήθως  $C$  το πολύ μέχρι 50 έως 55%.

## Ορισμοί (1)

- **Εντροπία (S)** είναι το μέγεθος που εκφράζει τη δυνατότητα ενός θερμοδυναμικού συστήματος να παράγει έργο. Ορίζεται ως το πηλίκο της απειροστής προσδιδόμενης θερμότητας (σε μια αντιστρεπτή μεταβολή) προς τη θερμοκρασία (kJ/K).
- **Ειδική εντροπία (s)** είναι η εντροπία ανά μονάδα μάζας (kJ/kg · K)
- **Ενθαλπία (H)**. Αντιπροσωπεύει το ολικό ποσό θερμότητας που περιέχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα. Αποτελεί το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας και του γινομένου της πίεσης επί τον όγκο. (kJ)
- **Ειδική ενθαλπία (h)** είναι η ενθαλπία ανά μονάδα μάζας (kJ/kg).

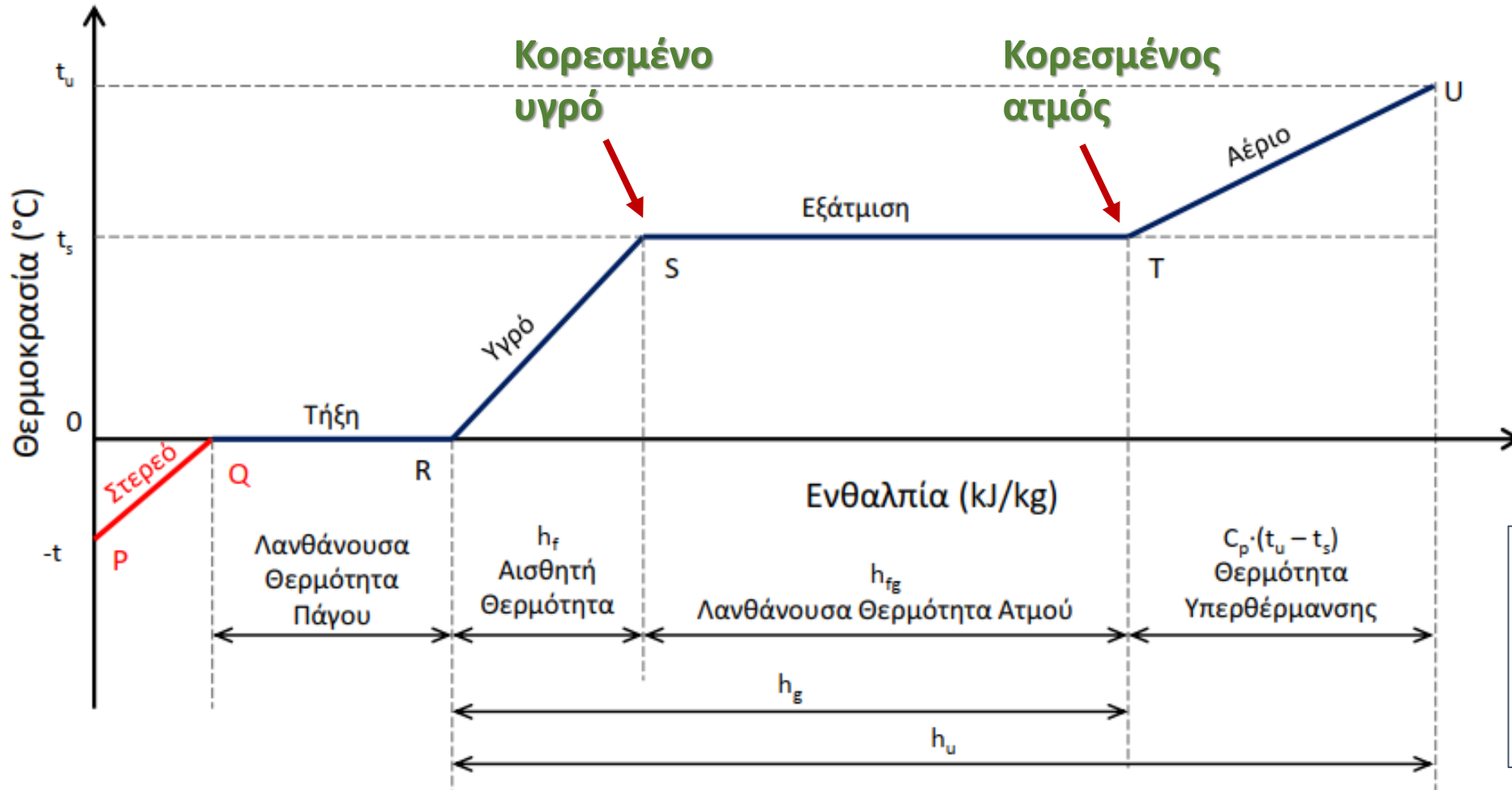
## Ορισμοί (2)

- **Θερμοκρασία κορεσμού ( $T_{sat}$ )** είναι η θερμοκρασία στη οποία, σε δεδομένη πίεση, μια καθαρή ουσία αλλάζει φάση από υγρή σε αέρια ή από αέρια σε υγρή.
- **Πίεση κορεσμού ( $P_{sat}$ )** είναι η πίεση στην οποία, σε δεδομένη θερμοκρασία, μια καθαρή ουσία αλλάζει φάση από υγρή σε αέρια ή από αέρια σε υγρή.
- **Βαθμός ξηρότητας ( $x$ )** είναι ο αριθμός που παίρνει τιμές από το 0 έως το 1 και μας δείχνει πόσος ατμός βρίσκεται στο σύνολο της μάζας υγρού-ατμού. Π.χ. βαθμός ξηρότητας 0,2 σημαίνει 20% ατμός και 80% υγρό.
- **Ειδική θερμότητα ( $C$ )** ενός σώματος είναι το ποσό θερμότητας που απαιτείται για να υψωθεί η θερμοκρασία της μονάδας μάζας του κατά 1 βαθμό ( $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ )

## Ορισμοί (3)

- **Ξηρός κορεσμένος ατμός** είναι ο ατμός που δεν περιέχει σταγονίδια υγρού και βρίσκεται σε θερμοκρασία ατμοποίησης.
- **Υγρός ατμός** είναι ο ατμός που είναι μίγμα ξηρού ατμού με σταγονίδια υγρού
- **Υπέρθερμος ατμός** είναι ο ατμός που βρίσκεται σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία ατμοποίησης
- **Κορεσμένο υγρό** είναι το υγρό που έχει θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία ατμοποίησης
- **Κρίσιμο σημείο** είναι το σημείο στο οποίο το κορεσμένο υγρό μετατρέπεται σε ξηρό κορεσμένο ατμό

# Αλλαγή φάσεων νερού υπό σταθερή πίεση



Θεμελιώδης εξίσωση της  
θερμοδυναμικής:

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T$$

Πάγος

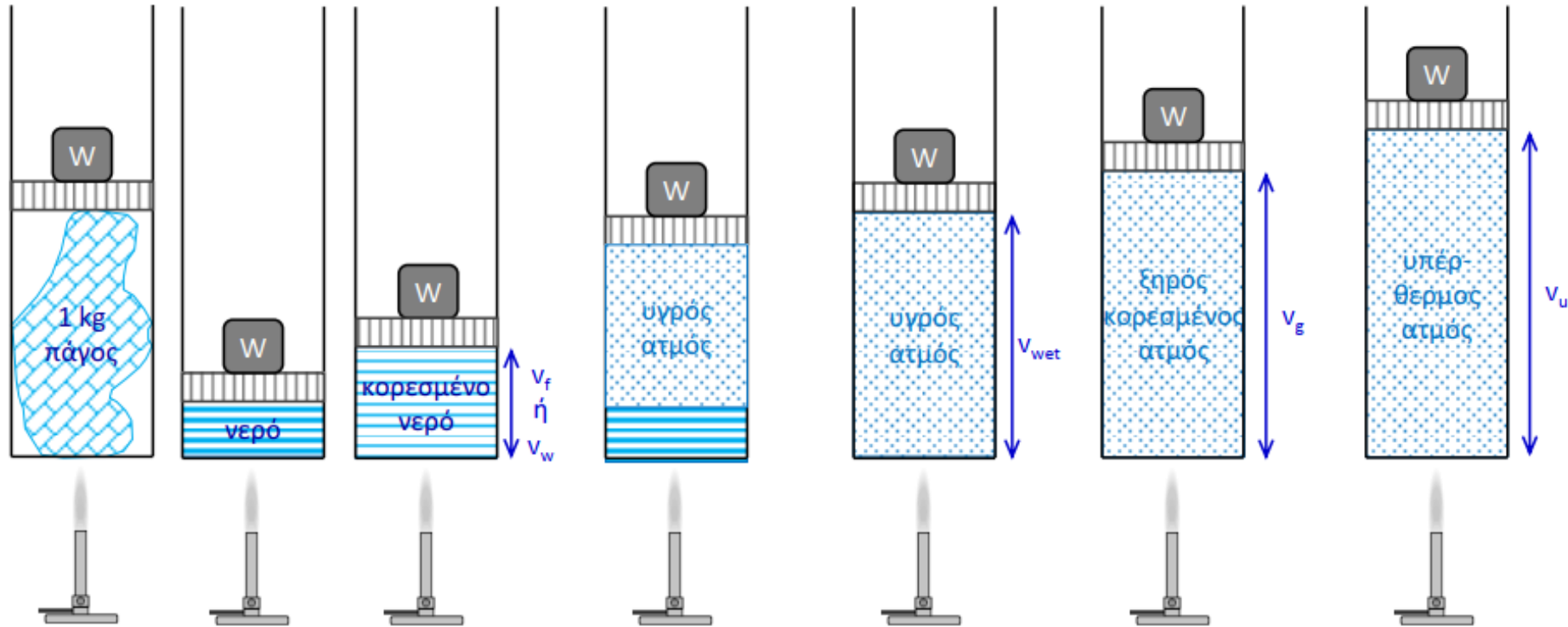
Πάγος και  
Νερό

Νερό  
Υπόψυκτο  
Υγρό

Νερό και  
Ατμός

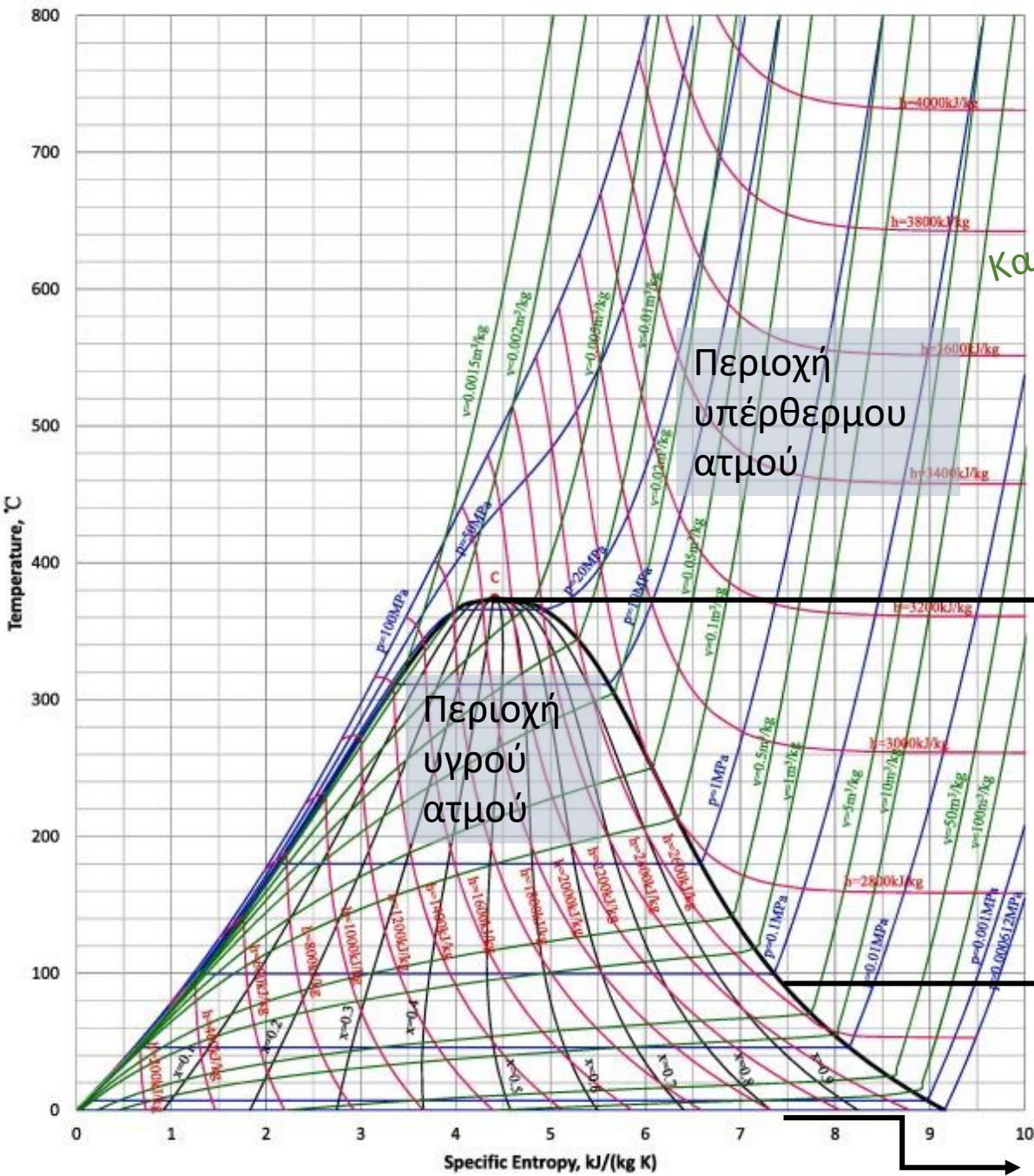
Υπερθέρμος  
Ατμός

# Αλλαγή φάσεων νερού υπό σταθερή πίεση Γράφημα μεταβολής όγκου



T-s Diagram of Water and Steam

# Διάγραμμα T-s νερού / ατμού



Καμπύλες όγκου (πράσινες)

Καμπύλες πίεσης (μπλε)

Καμπύλες ενθαλπίας (ροζ)

Περιοχή υπέρθερμου ατμού

Περιοχή υγρού ατμού

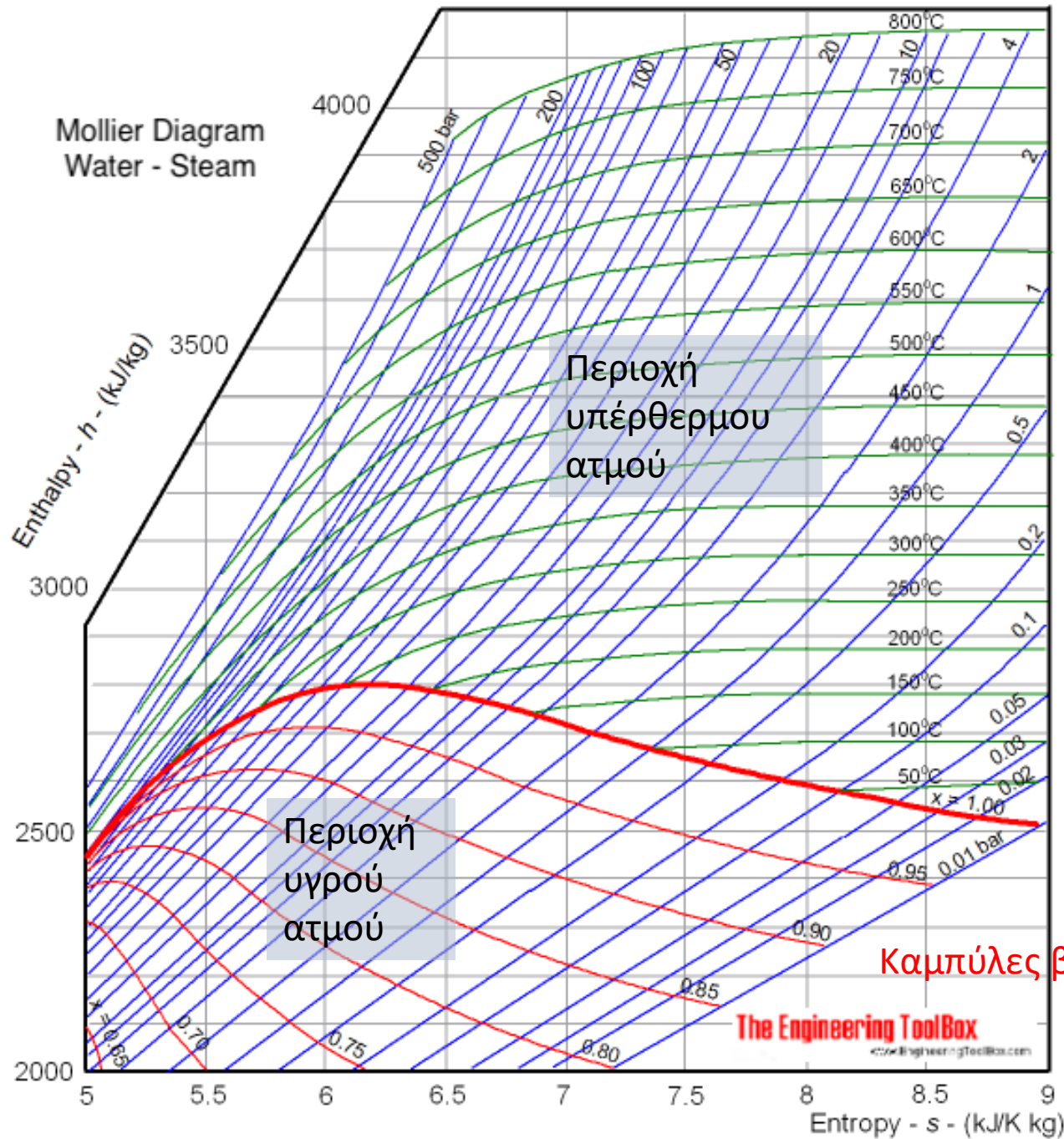
Κρίσιμο σημείο

Γραμμή κορεσμένου ατμού

Καμπύλες βαθμού ξηρότητας (μαύρες)



# Διάγραμμα h-s νερού / ατμού (Mollier)

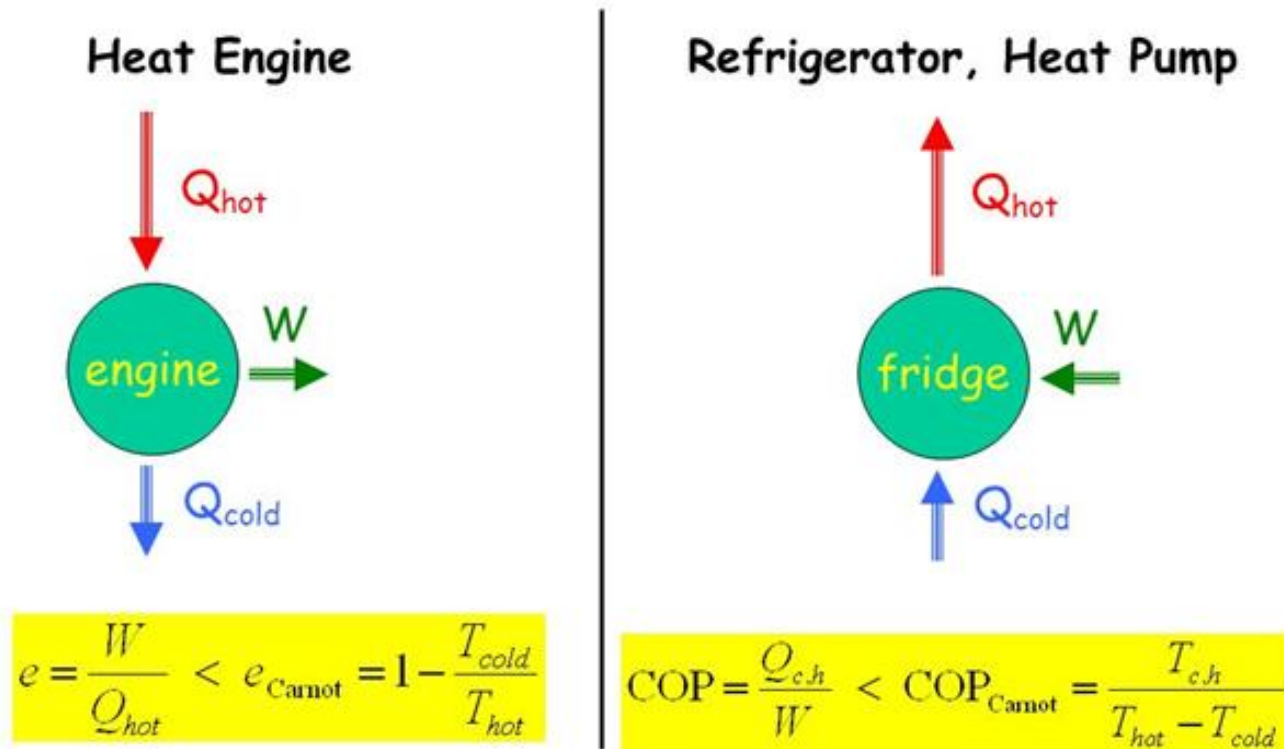


Καμπύλες θερμοκρασίας (πράσινες)

Καμπύλες πίεσης (μπλε)

Καμπύλες βαθμού ξηρότητας (κόκκινες)

# Διαφορά θερμικής και ψυκτικής μηχανής



$$W = Q_{hot} - Q_{cold}$$

- Η απόδοση της θερμικής μηχανής είναι το πηλίκο του ωφέλιμου έργου διά τη θερμότητα που καταναλώνεται, δηλαδή τη θερμότητα που παράγεται από την καύση του καυσίμου
- Η απόδοση του ψυγείου είναι το πηλίκο της θερμότητας που αφαιρείται από το θάλαμο ψύξης διά το έργο του συμπιεστή
- Η απόδοση της αντλίας θερμότητας είναι το πηλίκο της θερμότητας που μεταφέρεται διά το έργο του συμπιεστή

## Άσκηση κατανόησης αισθητής / λανθάνουσας θερμότητας

Ένας καταψύκτης έχει συντελεστή απόδοσης  $K = 4$ . Ο καταψύκτης μετατρέπει 1,5 kg νερού θερμοκρασίας  $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$  σε 1,5 kg πάγου θερμοκρασίας  $t_2 = -10\text{ }^\circ\text{C}$  σε μία ώρα.

α) Πόση θερμότητα πρέπει να αφαιρεθεί από το νερό;

β) Πόση ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται από τον καταψύκτη σε αυτήν την ώρα;

γ) Πόση ανεκμετάλλευτη θερμότητα αποβάλλεται στον χώρο, στον οποίο βρίσκεται ο καταψύκτης; ( $c_{\text{νερού}} = 4190\text{ J/kg K}$ ,  $c_{\text{πάγου}} = 2000\text{ J/kg K}$ ,  $L = 3,34 \times 10^5\text{ J/kg}$ )

# Τυπικοί κύκλοι στροβιλομηχανών – Γενικό πλαίσιο

- Η **εργαζόμενη ουσία (ατμός)** στις στροβιλομηχανές υφίσταται μία σειρά από **αλλαγές κατάστασης** που αποτελούν συνέχεια η μία της άλλης.
- Σχηματίζεται, έτσι, ένα **κλειστό κύκλωμα**, στο τέλος του οποίου η εργαζόμενη ουσία **επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση**.
- Η ύπαρξη ενός κλειστού κυκλώματος είναι απαραίτητη προϋπόθεση λειτουργίας για τις θερμικές μηχανές, γενικώς. Το κλειστό κύκλωμα λέγεται **θερμοδυναμικός ή θερμικός κύκλος**.

$H_1$ : Η θερμότητα που χορηγείται στον ατμό από το λέβητα (ή τον υπερθερμαντήρα)

$H_2$ : Η θερμότητα στην έξοδο του ατμού από το στρόβιλο

Θεωρητικό έργο στροβίλου:

$$L_{\theta} = H_1 - H_2$$

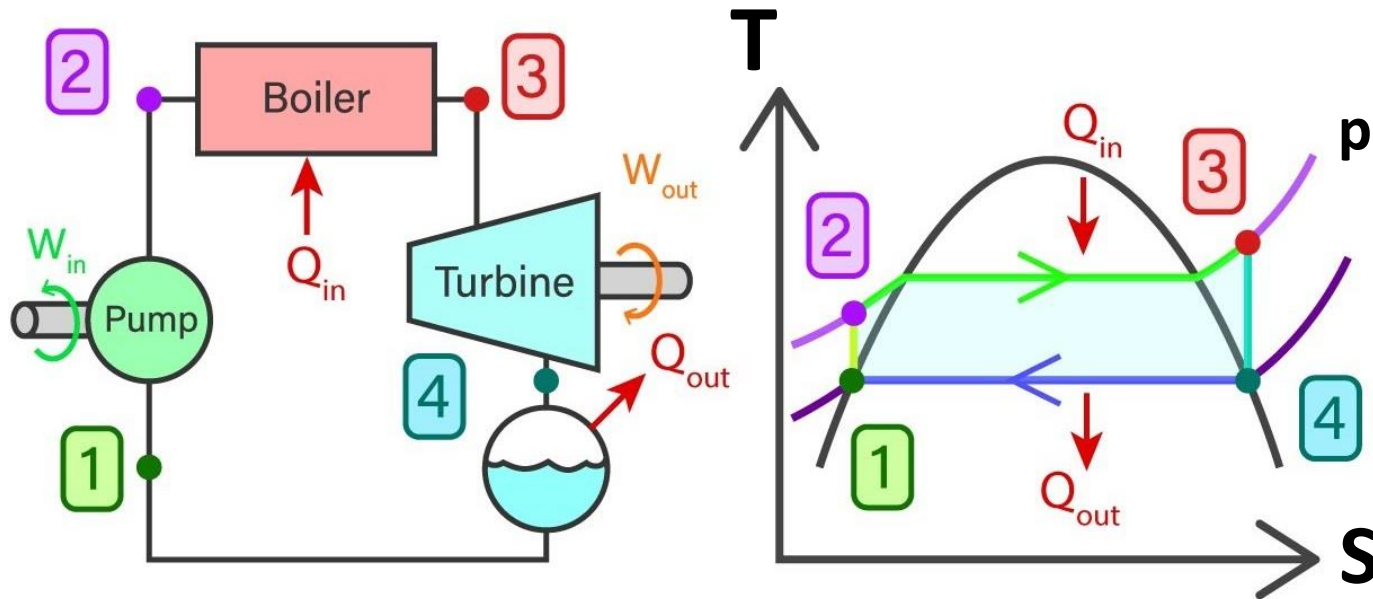
Θεωρητικός βαθμός απόδοσης κύκλου:

$$\eta_{\theta} = L_{\theta} / H_1 = 1 - H_2 / H_1$$

- Αυτά ισχύουν γενικώς για τις θερμικές μηχανές, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη διαφάνεια.
- Το θεωρητικό έργο θα προέκυπτε εάν δεν υπήρχαν θερμικές απώλειες κατά τη λειτουργία της μηχανής

# Τυπικοί κύκλοι στροβιλομηχανών – Κύκλος Rankine

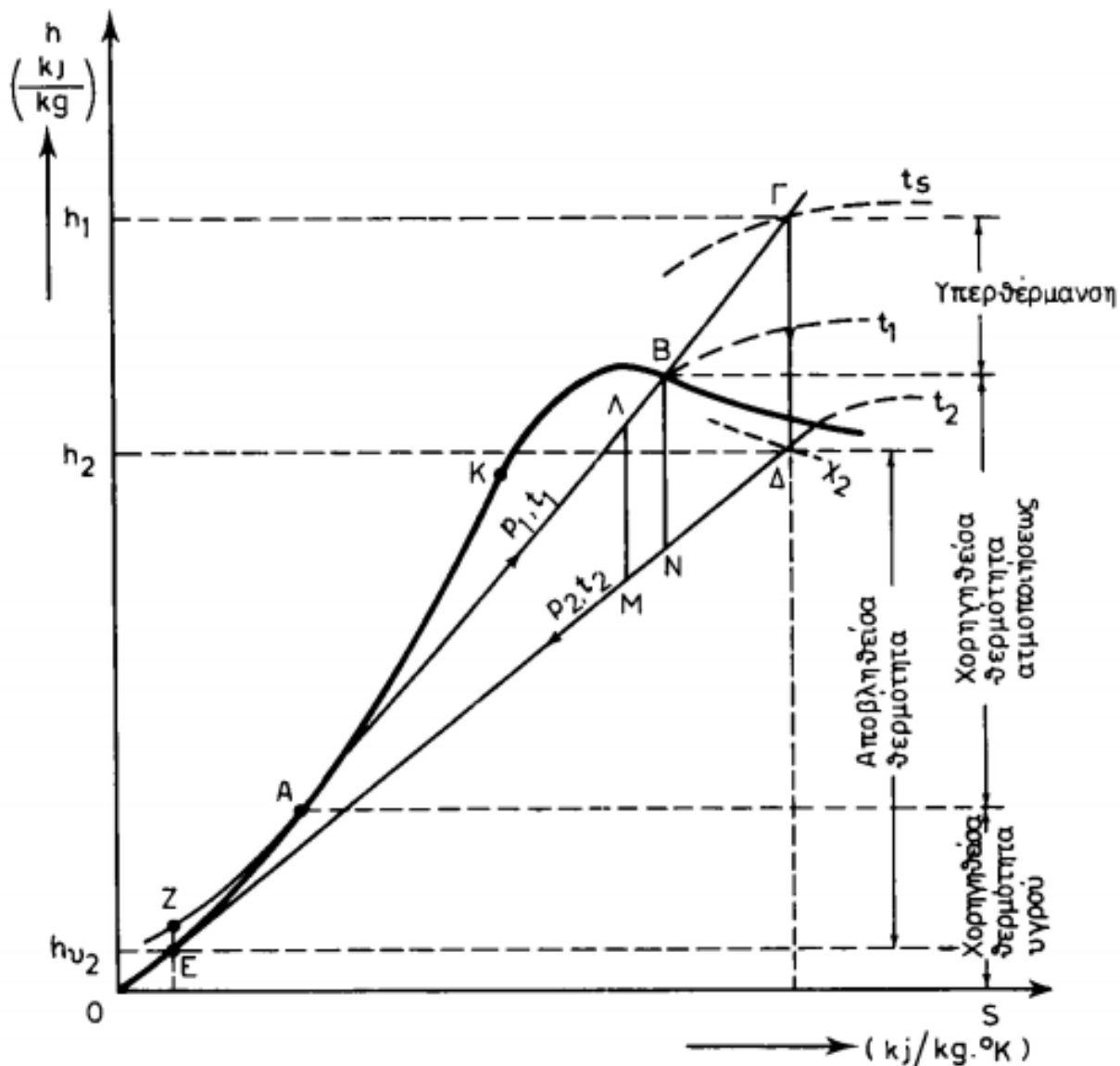
- Στις θερμικές στροβιλομηχανές συνηθίζεται να εφαρμόζεται ένας θερμικός κύκλος που προσομοιάζει στον λεγόμενο κύκλο Rankine. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο ιδανικός κύκλος Rankine σε αντιστοιχία με τη λειτουργία μιας βασικής διάταξης ατμοστροβίλου.



- Στην αντλία που μεταφέρει το συμπύκνωμα στο λέβητα γίνεται αδιαβατική / ισεντροπική μεταβολή
- Στο λέβητα έχουμε ισόθλιπτες μεταβολές (θέρμανση και υπερθέρμανση) και ισοθερμοκρασιακή μεταβολή (αλλαγή φάσης)
- Στην τουρμπίνα γίνεται ισεντροπική μεταβολή
- Στο συμπυκνωτή γίνεται ισοθερμοκρασιακή μεταβολή (αλλαγή φάσης)

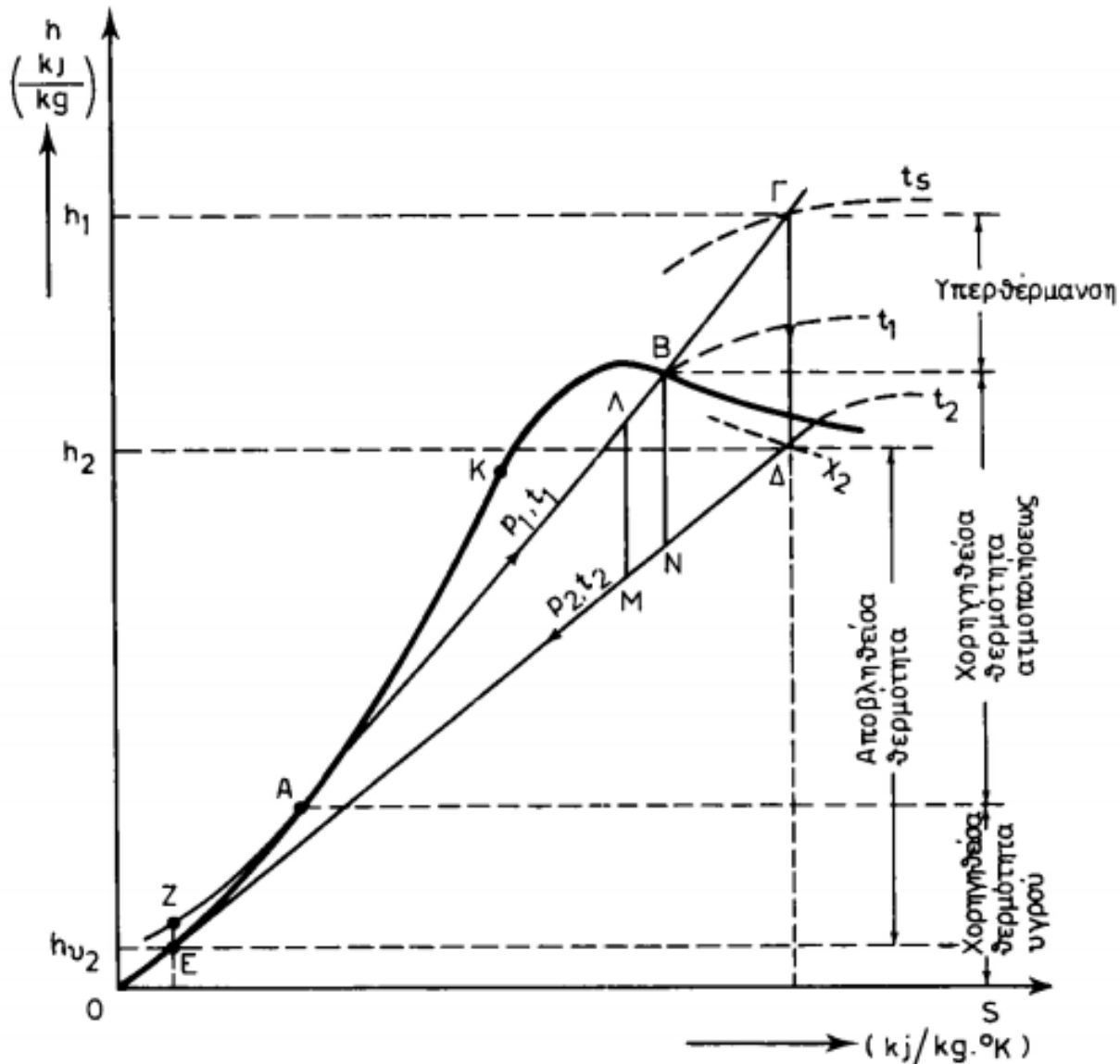
**Ο ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΕΙΝΑΙ ΑΥΤΟΣ ΠΟΥ ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

# Κύκλος Rankine σε διάγραμμα $h - s$



- **AB:** Ατμοποίηση του νερού υπό σταθερή πίεση (και θερμοκρασία) στο λέβητα
- **BC:** Υπερθέρμανση του ατμού. Η καμπύλη πίεσεως  $p_1$  συναντάται με την καμπύλη θερμοκρασίας  $t_s$  που αντιστοιχεί στο σημείο υπερθέρμανσης. Η ενθαλπία στο σημείο Γ είναι  $h_1$
- **CD:** Ισεντροπική εκτόνωση του ατμού στο στρόβιλο μέχρι την πίεση  $p_2$ . Ο ατμός στο Δ γίνεται κορεσμένος με βαθμό ξηρότητας  $x_2$  και ενθαλπία  $h_2$ .
- **DE:** Συμπύκνωση του ατμού που εξέρχεται από τον στρόβιλο υπό σταθερή πίεση  $p_2$  και υπό σταθερή θερμοκρασία  $t_2$  – αποβολή λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης και υγροποίηση ατμού
- **EZ:** Ισεντροπική συμπίεση του υγρού από την αντλία μέχρι την πίεση  $p_1$  που είναι η πίεση του λέβητα
- **ZA:** Θέρμανση του νερού μέσα στο λέβητα υπό σταθερή πίεση

# Κύκλος Rankine σε διάγραμμα h – s



- **ΑΒΓΔΕΖΑ:** Κύκλος Rankine για υπέρθερμο ατμό
- **ΑΒΝΕΖΑ:** Κύκλος Rankine για ξηρό κορεσμένο ατμό
- **ΑΛΜΕΖΑ:** Κύκλος Rankine για υγρό ατμό

# Θεωρητική ισχύς και απόδοση

Θεωρητικό ειδικό έργο ατμοστροβίλου:

$$L_{\theta} = h_1 - h_2 = \Delta h_{\theta} \text{ (σε kJ/kg)}$$

Θεωρητική ισχύς ατμοστροβίλου:

$$P_{\theta} = G * \Delta h_{\theta} \text{ (σε kW εφ' όσον η παροχή ατμού είναι σε kg/sec)}$$

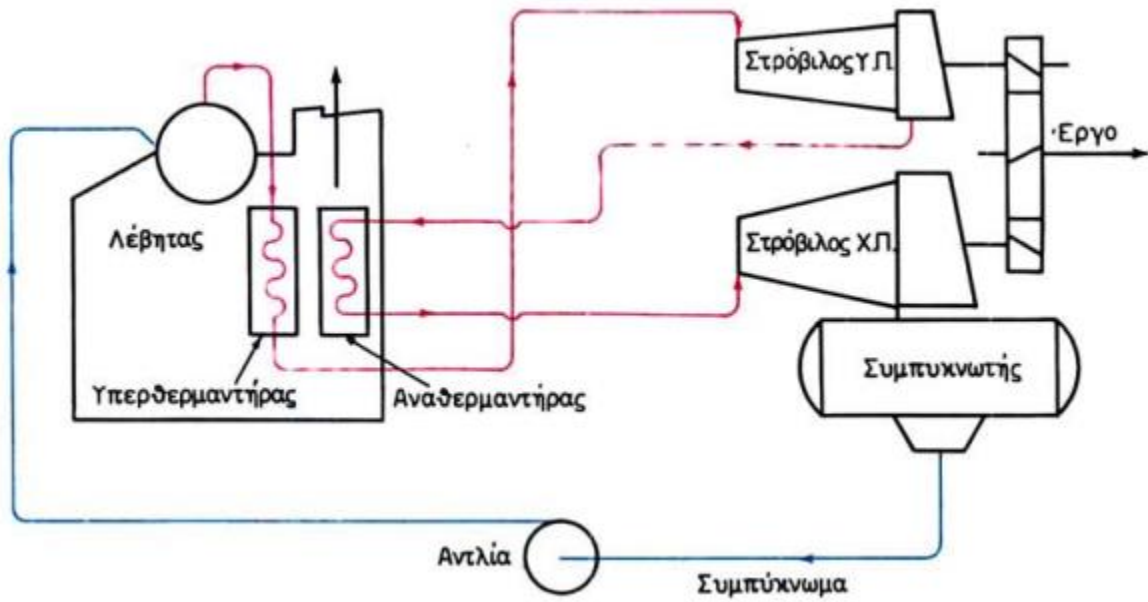
G: παροχή μάζας ατμού

Θεωρητικός βαθμός απόδοσης κύκλου:

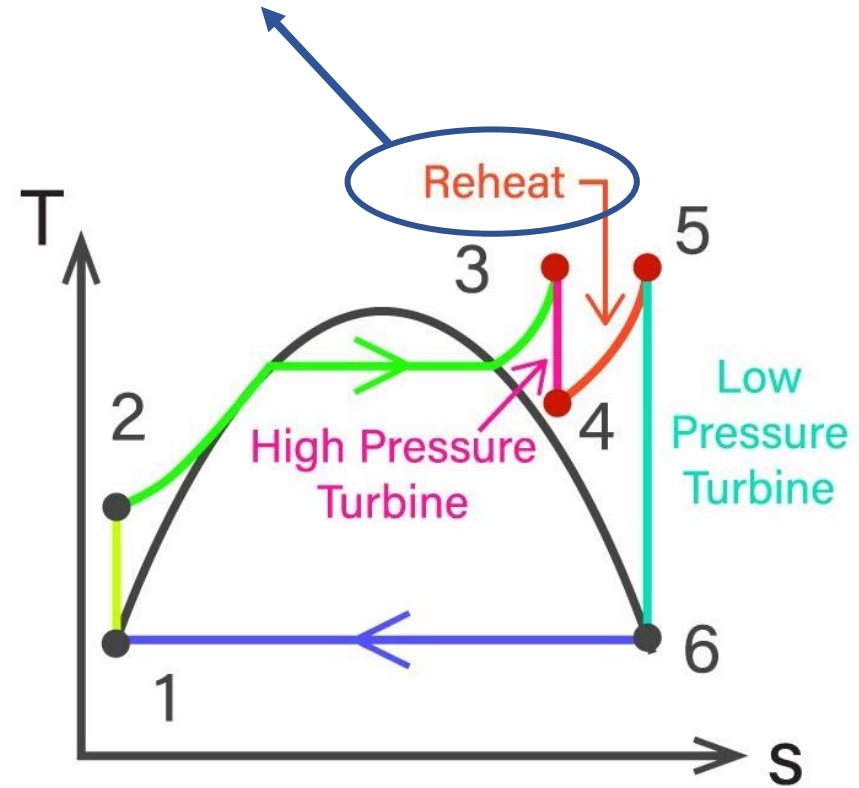
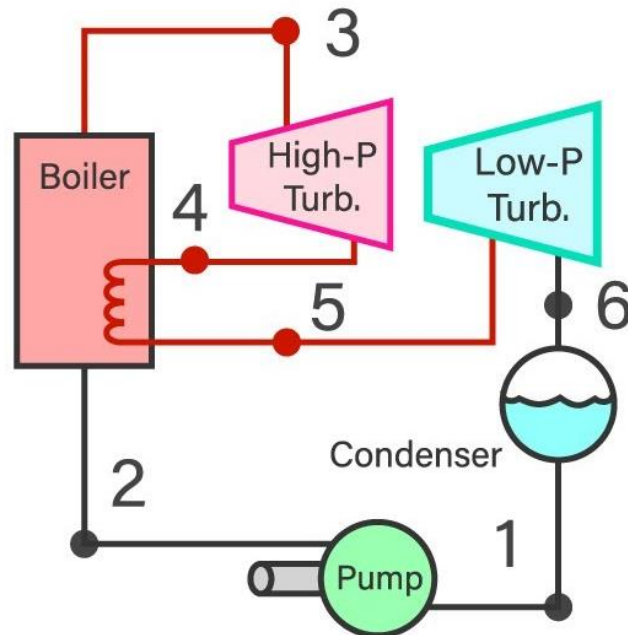
$$n_{\theta} = L_{\theta} / H_1 = 1 - H_1 / H_2 = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_{u2})$$



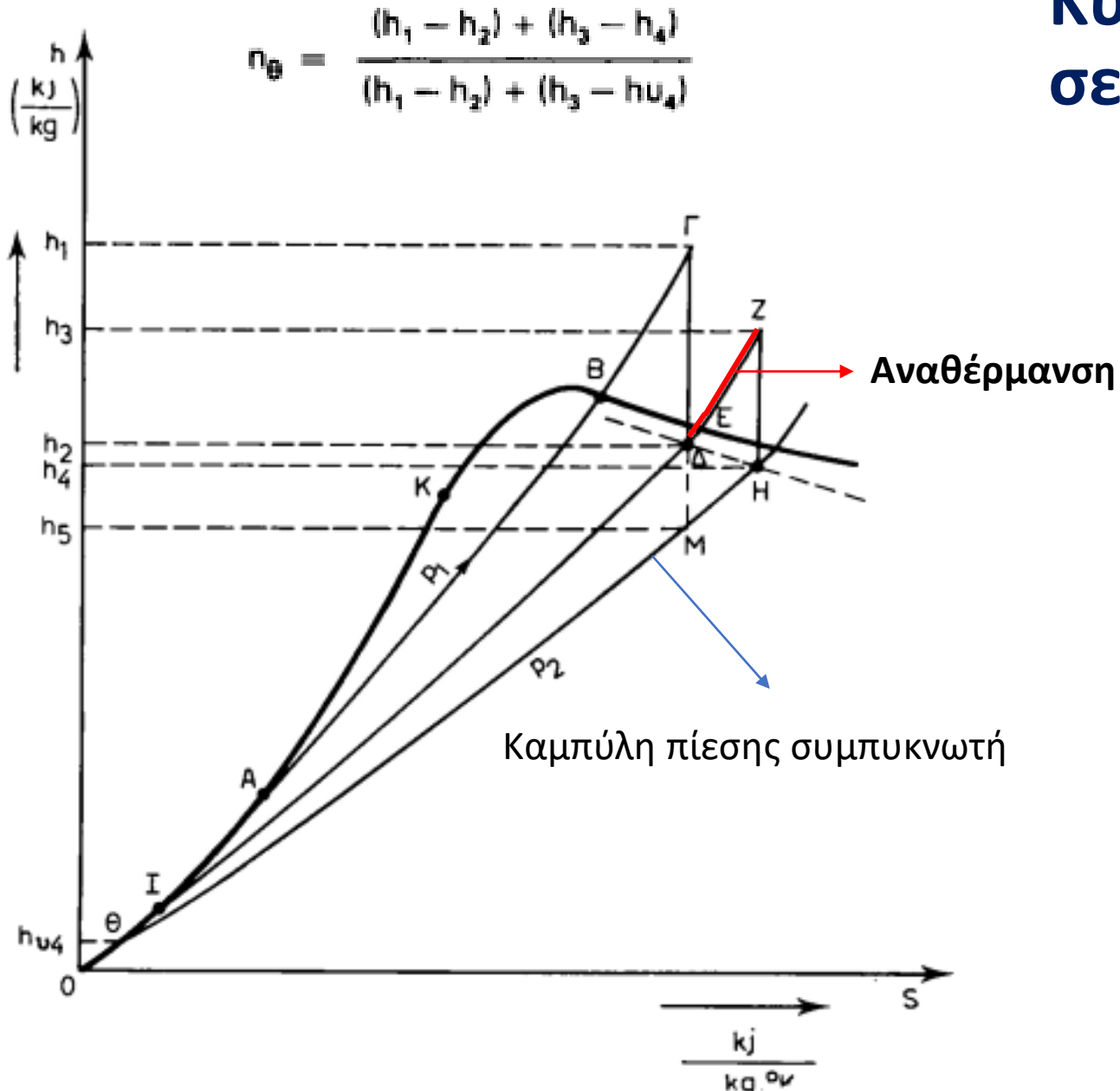
# Κύκλος Rankine με αναθέρμανση



Η αναθέρμανση εκφράζεται από την ισόθλιπτη μεταβολή 4 - 5



# Κύκλος Rankine με αναθέρμανση σε διάγραμμα h – s



Θεωρητικό ειδικό έργο ατμοστροβίλου:

$$L_{\theta} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)$$

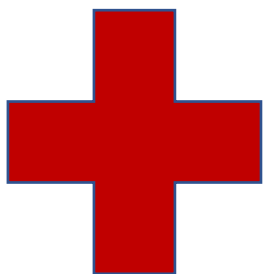
Θεωρητική ισχύς ατμοστροβίλου:

$$P_{\theta} = G^* L_{\theta}$$

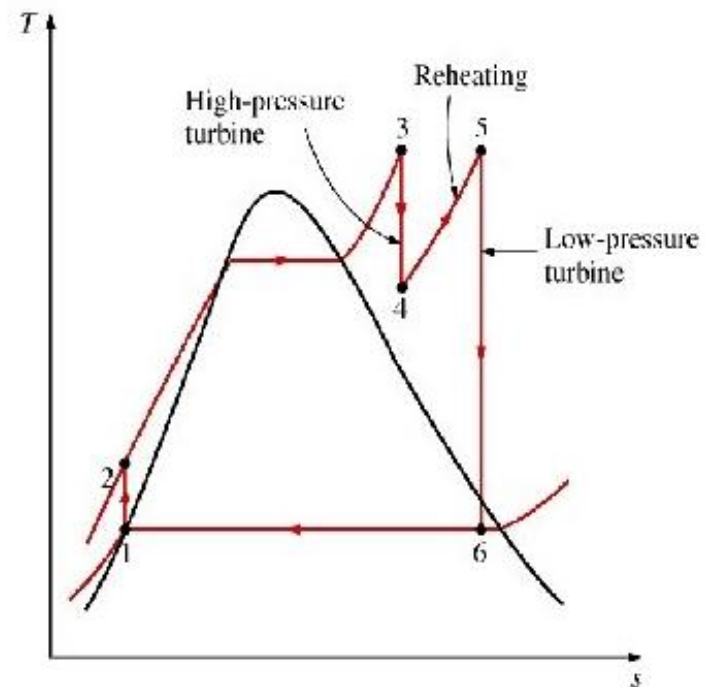
Θεωρητικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta_{\theta} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_{u4})}$$

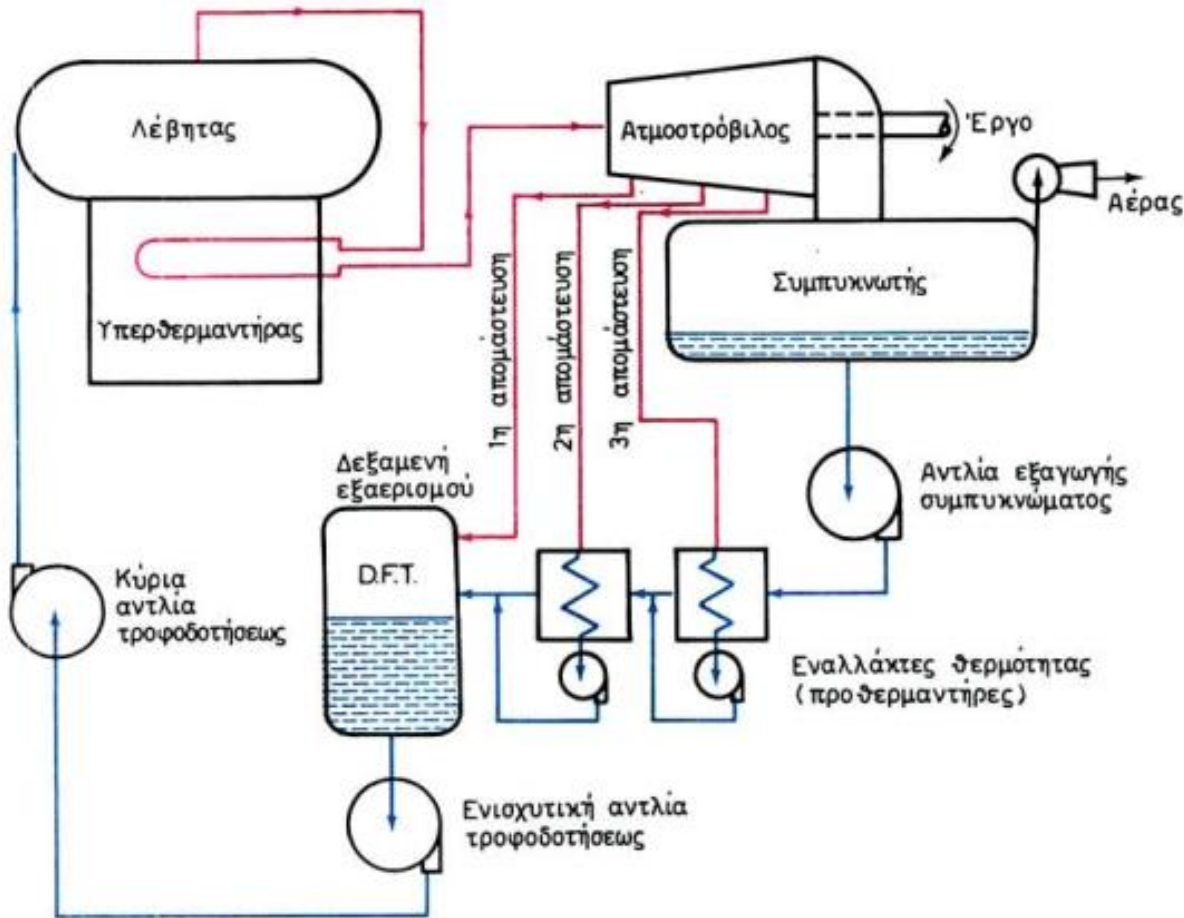
# Πλεονεκτήματα συστημάτων με αναθέρμανση



- Αυξάνεται το παραγόμενο έργο
- Ο ατμός αποκτά υψηλό βαθμό ξηρότητας και αποφεύγεται η μηχανική διάβρωση (erosion) των πτερυγίων / για την αποφυγή της μηχανικής διάβρωσης στην έξοδο προς το συμπυκνωτή ο βαθμός ξηρότητας πρέπει να είναι από 85% και πάνω
- Ο βαθμός απόδοσης βελτιώνεται (απόλυτα) κατά 1,5% και η βελτίωση εξαρτάται από το βαθμό αναθέρμανσης
- Το ιδανικό είναι η αναθέρμανση να συνδυάζεται με απομάστευση



# Ατμοστρόβιλος με απομάστευση

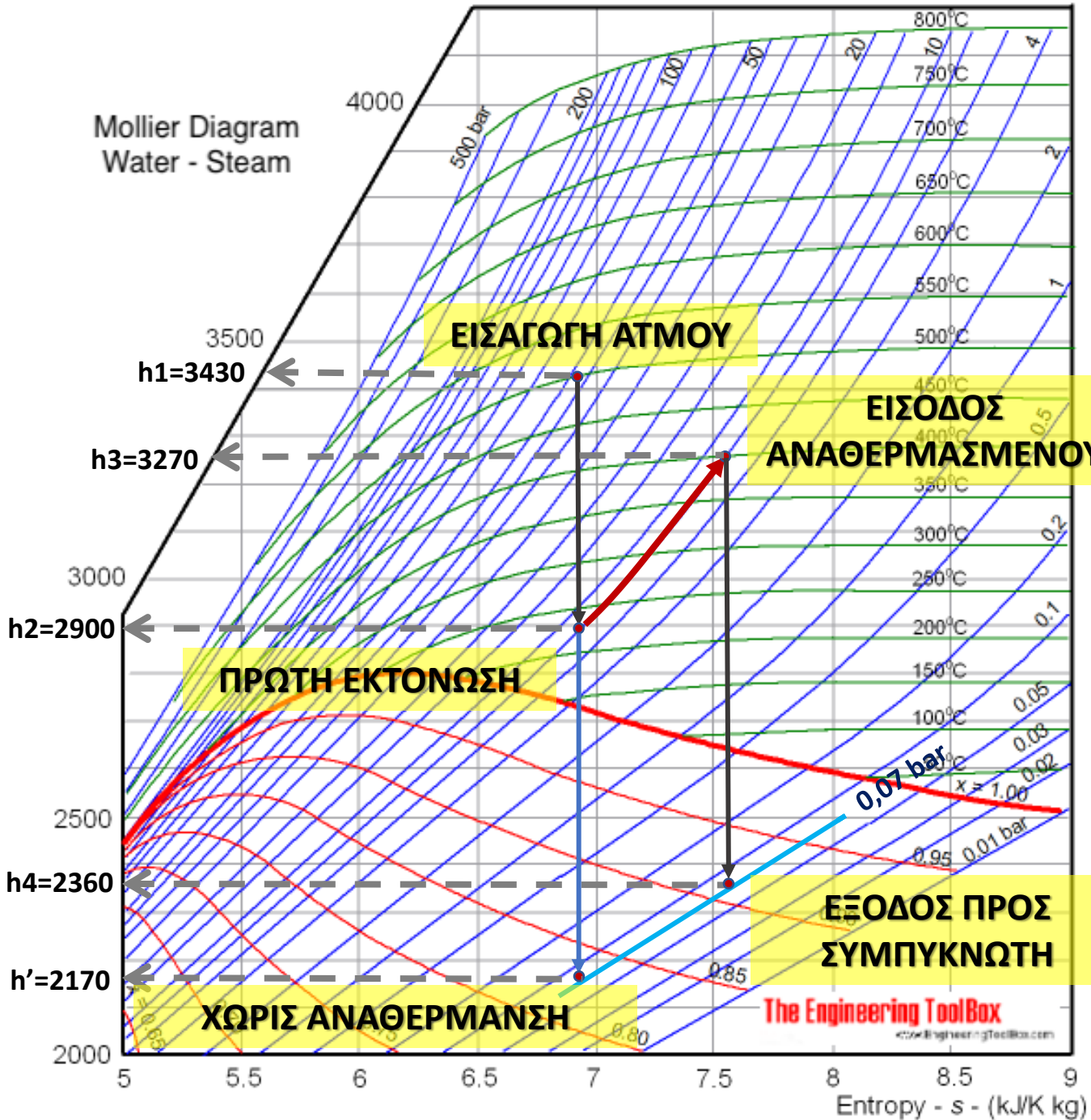


- Με τον όρο απομάστευση εννοούμε την αφαίρεση ποσότητας ατμού από ενδιάμεση βαθμίδα της μηχανής και τη χρησιμοποίηση της θερμότητας για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού.
- Συνήθως, στους ατμοστρόβιλους η απομάστευση είναι πολλαπλή και αντιστοιχεί στην πολυσταδιακή προθέρμανση του νερού.
- Τα σημεία απομάστευσης εκλέγονται έτσι, ώστε να ισοκατανέμεται στους προθερμαντήρες η θερμοκρασιακή άνοδος από τη θερμοκρασία συμπυκνωτή μέχρι την τελική θερμοκρασία προθέρμανσης
- Με την απομάστευση αφαιρείται ένα μέρος από το έργο που θα απέδιδε ο στρόβιλος χωρίς αυτήν. Όμως, τελικά, ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται 3 έως 4% (με όρους απόλυτης αύξησης)
- Αν ήταν δυνατόν η προθέρμανση του νερού να φτάσει τη θερμοκρασία του λέβητα, ο κύκλος θα ταυτιζόταν με τον κύκλο Carnot

# Άσκηση κατανόησης θερμοδυναμικών κύκλων / χρήσης διαγραμμάτων

Ένας ατμοστρόβιλος εργάζεται, ιδανικά, κατά τον κύκλο Rankine με αναθέρμανση. Η πίεση εισαγωγής είναι 60 bar και η θερμοκρασία εισαγωγής 500° C. Ο ατμός εκτονώνεται μέσα στο στρόβιλο σε πίεση 8 bar και στη συνέχεια οδηγείται στον αναθερμαντήρα, όπου και αναθερμαίνεται στους 400° C. Μετά εκτονώνεται ξανά στο στρόβιλο μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή που είναι ίση με 0,07 bar.

- A) Πόση είναι η χορηγούμενη θερμότητα στον ατμό;
- B) Πόση είναι η αποβαλλόμενη θερμότητα από το συμπυκνωτή;
- Γ) Πόσο είναι το παραγόμενο έργο;
- Δ) Πόσος είναι ο βαθμός απόδοσης;
- Ε) Πόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης σε σχέση με την περίπτωση λειτουργίας χωρίς αναθέρμανση;



- ✓ Από το σημείο που αντιστοιχεί στην εισαγωγή, κινούμαστε ισεντροπικά (κάθετα στον οριζόντιο άξονα) μέχρι να συναντήσουμε τις καμπύλες θερμοκρασίας και πίεσεως που αντιστοιχούν στην πρώτη εκτόνωση
- ✓ Έπειτα κινούμαστε ισόθλιπτα (πάνω στην καμπύλη πίεσης που αντιστοιχεί στην εκτόνωση) μέχρι να συναντήσουμε την καμπύλη θερμοκρασίας αναθέρμανσης και βρίσκουμε το σημείο που αντιστοιχεί στην είσοδο του αναθερμασμένου ατμού.
- ✓ Στη συνέχεια, όπως πριν, κινούμαστε ισεντροπικά μέχρι να συναντήσουμε την πίεση εξόδου στο συμπυκνωτή και βρίσκουμε, έτσι, το σημείο που αντιστοιχεί στην έξοδο προς το συμπυκνωτή.
- ✓ Αν δεν υπήρχε αναθέρμανση θα κινούμασταν ισεντροπικά μέχρι να συναντήσουμε την καμπύλη πίεσης που αντιστοιχεί στην πίεση εισόδου στο συμπυκνωτή.

Εκτός από τα σημεία που προσδιορίζουμε πάνω στο διάγραμμα Mollier είναι χρήσιμο να προσδιορίσουμε και το σημείο που αντιστοιχεί στην κατάσταση του νερού αφότου αυτό εξέλθει από το συμπυκνωτή. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε τους **πίνακες νερού – ατμού**. Βρίσκουμε την ενθαλπία του νερού, για πίεση ίση με 0,07 bar που είναι η πίεση λειτουργίας του συμπυκνωτή.

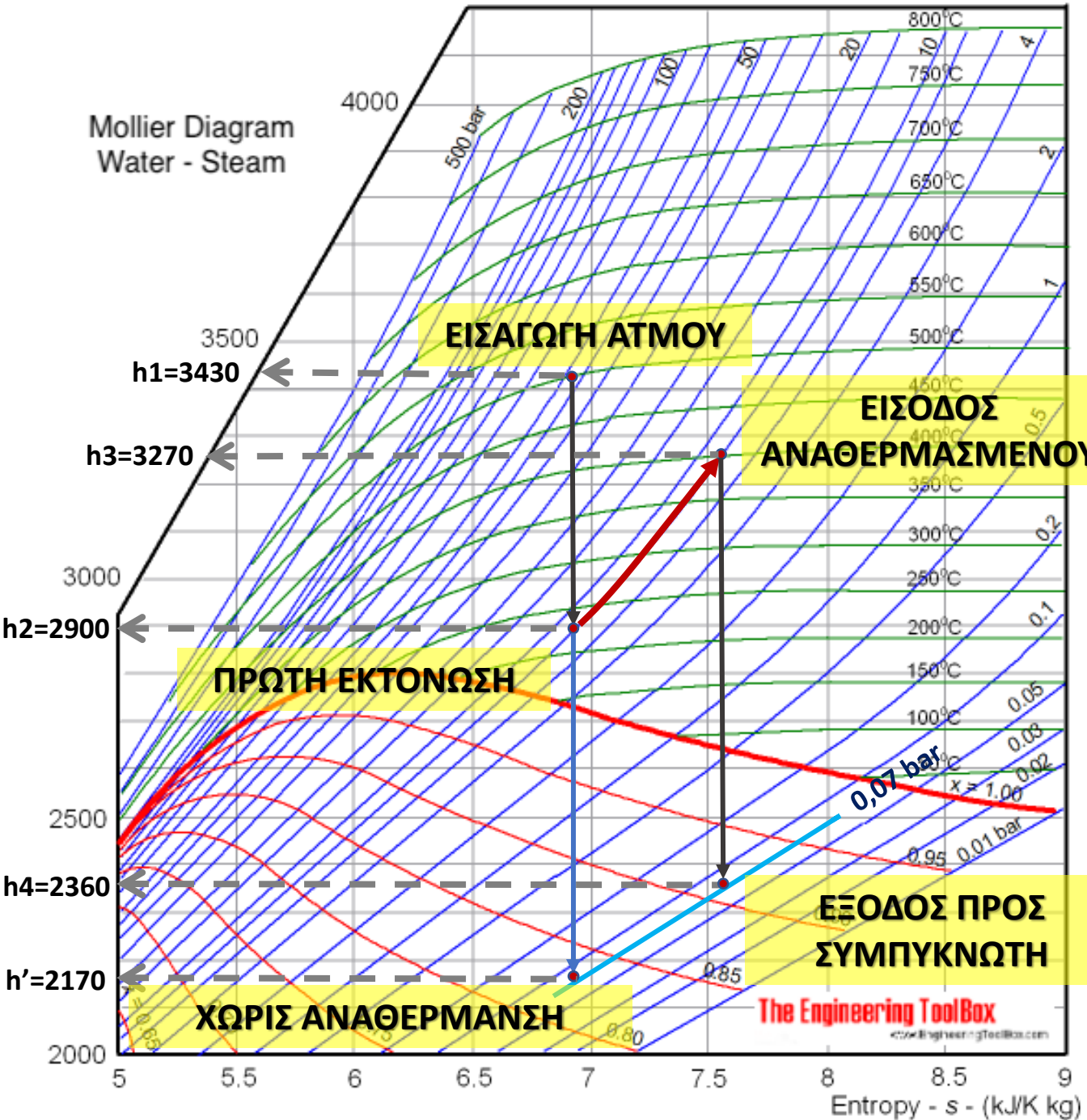
Ανατρέχουμε στο Παράρτημα Τεχνικής Θερμοδυναμικής και, αφού ξέρουμε την πίεση, χρησιμοποιούμε τον Πίνακα Γ2 που μας δίνει ιδιότητες κορεσμένου νερού και ατμού συναρτήσει της πίεσης.

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ2.**  
*Ιδιότητες κεκορεσμένου νερού καί κεκορεσμένου ατμού. Πίνακας πίεσεως.*

Απολ. Πίεση bar $p$	Θερμ. °C $t$	Είδικός όγκος, m <sup>3</sup> /kg		Ενθαλπία, kJ/kg			Εσωτερ. ενέργεια, kJ/kg		Εντρ. Κεκ.νερό $s_f$
		Κεκ.νερό $v_f$	Κεκ.άτμός $v_g$	Κεκ.νερό $h_f$	Κεκ.άτμός $h_{fg}$	Κεκ.άτμός $h_g$	Κεκ.νερό $u_f$	Κεκ.άτμός $u_g$	
0-006 02	0	0-001 000 2	206-298 7	-0-0	2501-6	2501-6	-0-0	2375-6	-0-0
0-006 11	0-01	0-001 000 2	206-162 9	+0-0	2501-6	2501-6	0	2375-6	0
0-010	6-98	0-001 001	129-210 7	29-3	2485-0	2514-4	29-3	2385-2	0-1060
0-020	17-51	0-001 001 2	67-011 6	73-5	2460-2	2533-6	73-5	2399-6	0-2606
0-030	24-10	0-001 002 7	45-670 0	101-0	2444-6	2545-6	101-0	2408-6	0-3543
0-040	28-98	0-001 004 0	34-803 3	121-4	2433-1	2554-5	121-4	2415-3	0-4225
0-050	32-90	0-001 005 2	28-194 5	137-8	2423-8	2561-6	137-8	2420-6	0-4763
0-060	36-18	0-001 006 4	23-740 6	151-5	2416-0	2567-5	151-5	2425-1	0-5209
<u>0-070</u>	39-03	0-001 007 4	20-530 4	<u>163-4</u>	2409-2	2572-6	163-4	2428-9	0-5591
0-080	41-54	0-001 008 4	18-103 8	173-9	2403-2	2577-1	173-9	2432-3	0-5926
0-090	43-79	0-001 009 4	16-203 4	183-3	2397-9	2581-1	183-3	2435-3	0-6224
0-10	45-83	0-001 010 2	14-673 7	191-8	2392-9	2584-8	191-8	2438-1	0-6493
0-15	54-00	0-001 014 0	10-022 1	226-0	2373-2	2599-2	226-0	2448-9	0-7545
0-20	60-09	0-001 017 2	7-649 2	251-5	2358-4	2609-9	251-5	2456-9	0-832
0-25	64-99	0-001 019 9	6-204 0	272-0	2346-4	2618-3	272-0	2463-2	0-893
0-30	69-13	0-001 022 3	5-229 0	289-3	2336-1	2625-4	289-6	2468-2	0-944
0-35	72-71	0-001 024 5	4-525 5	304-3	2327-2	2631-5	304-3	2473-1	0-987
0-40	75-89	0-001 026 5	3-993 2	317-7	2319-2	2636-9	317-7	2477-2	1-026
0-45	78-74	0-001 028 4	3-576 1	329-6	2312-0	2641-7	329-6	2480-8	1-060
0-50	81-35	0-001 030 1	3-240 1	340-6	2305-4	2646-0	340-5	2484-0	1-091
0-60	85-05	0-001 033 3	2-731 7	359-0	2293-6	2653-6	359-8	2489-7	1-141







## B) Αποβαλλόμενη θερμότητα

Πρόκειται για τη θερμότητα που αποβάλλεται από το συμπυκνωτή καθώς γίνεται η υγροποίηση του ατμού

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η αποβαλλόμενη θερμότητα είναι:

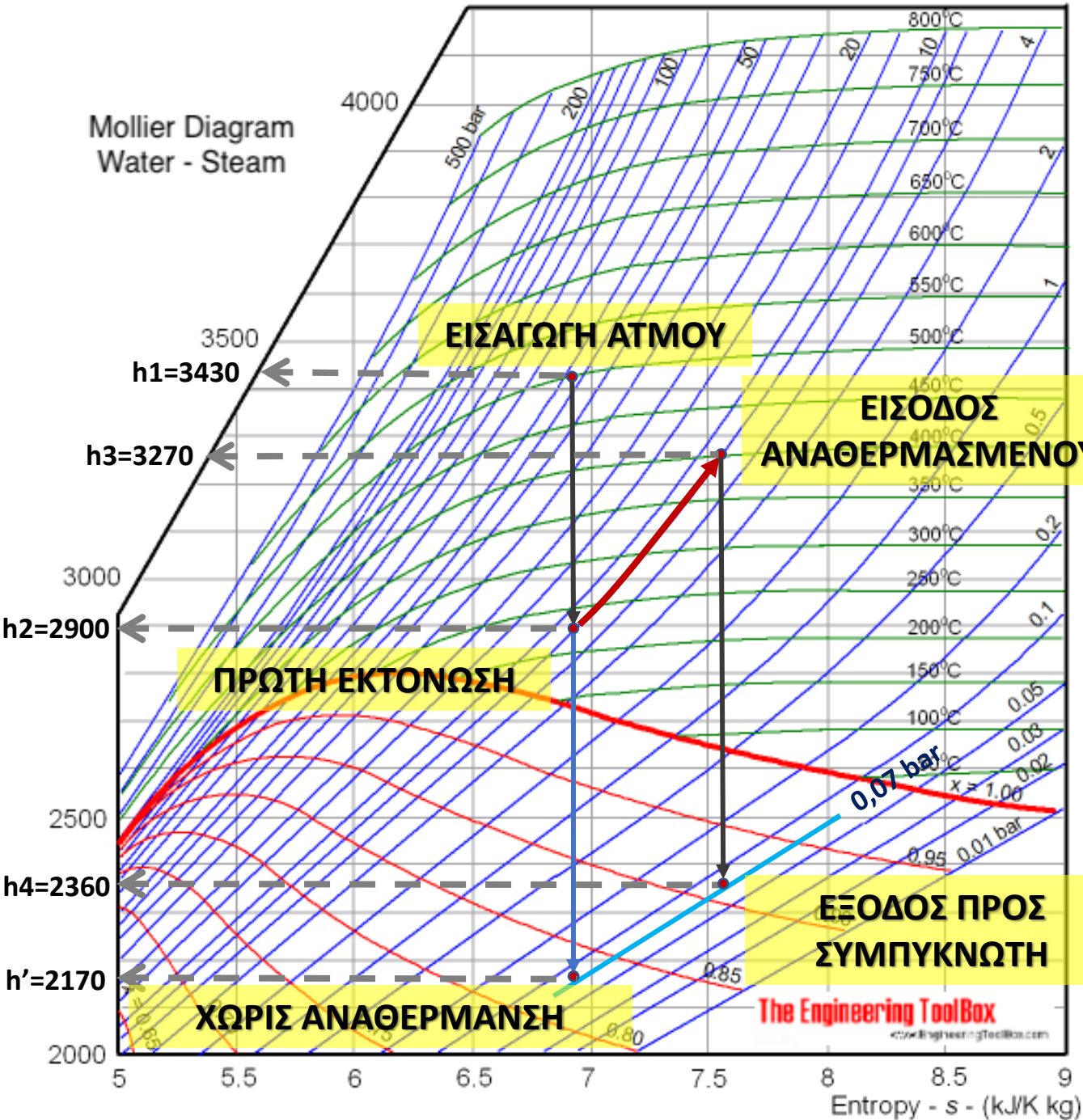
$$h_4 - h_{u4}$$

Με βάση τα αριθμητικά δεδομένα έχουμε ότι:

$$Q_{out} = 2.360 - 163$$

$$Q_{out} = \mathbf{2.197 \text{ kJ/kg}}$$





### Δ) Βαθμός απόδοσης

Ο (θεωρητικός) βαθμός απόδοσης είναι το πηλίκο του θεωρητικού έργου διά τη χορηγούμενη θερμότητα, δηλαδή την ενέργεια που «ξοδεύω» για να πάρω το θεωρητικό έργο.

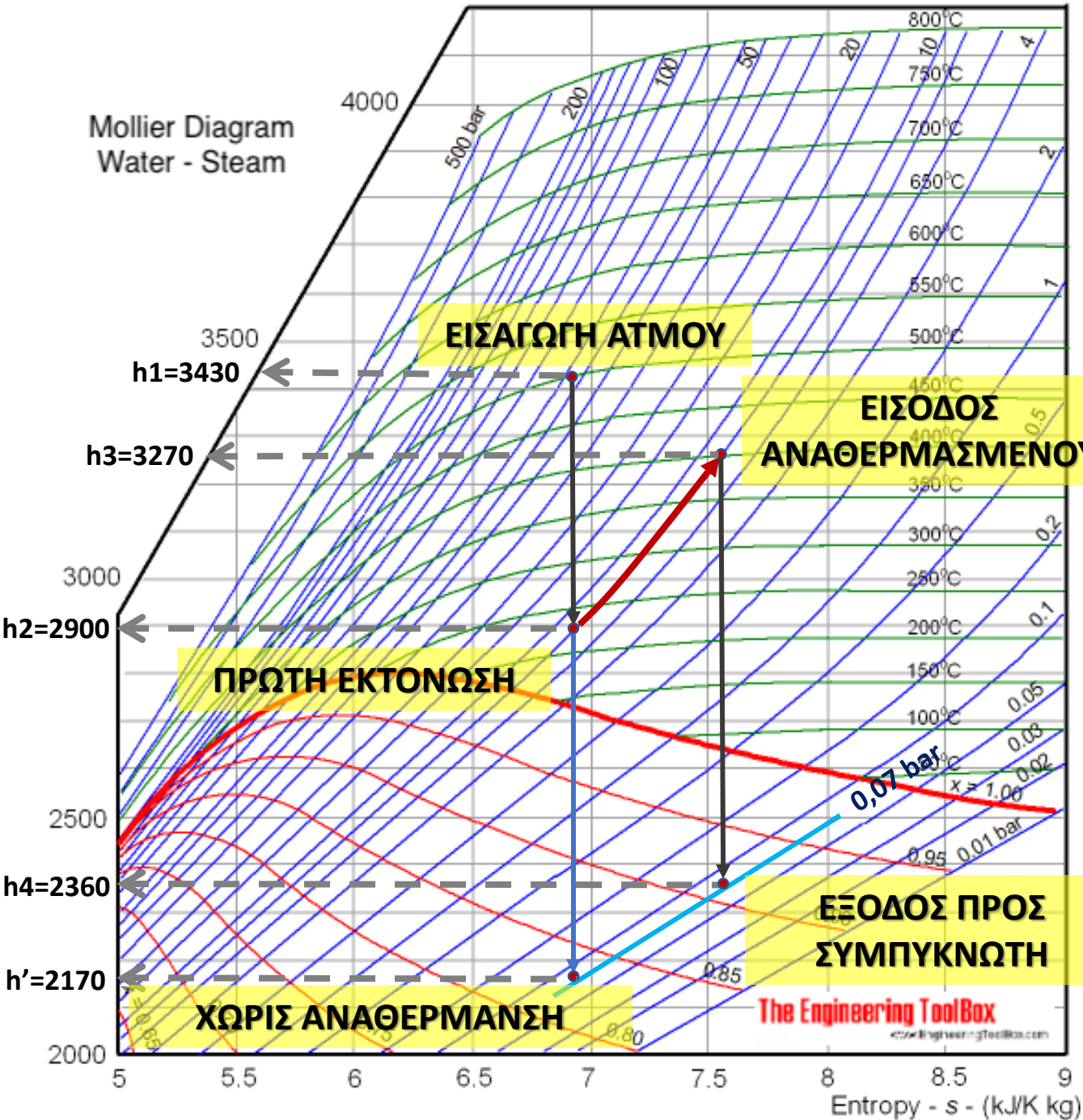
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο βαθμός απόδοσης θα είναι

$$\eta = L_{\theta} / Q_{in}$$

Με βάση τα αριθμητικά δεδομένα έχουμε ότι:

$$\eta = 1.440 / 3.637$$

$$\eta = 0,3959 = 39,6 \%$$



## Ε) Βαθμός απόδοσης σε σχέση με λειτουργία χωρίς αναθέρμανση

Στην περίπτωση λειτουργίας χωρίς αναθέρμανση το θεωρητικό έργο θα ήταν:

$$L_{\theta}' = h_1 - h' = 1.260 \text{ kJ/kg}$$

Η χορηγούμενη θερμότητα θα ήταν:

$$Q_{in}' = h_1 - h_{u4} = 3.267 \text{ kJ/kg}$$

Με βάση τα αριθμητικά δεδομένα έχουμε ότι:

$$\eta = 1.260 / 3.267$$

$$\eta = 0,3856 = 38,6 \%$$

Στην περίπτωση με χρήση αναθέρμανσης, ο βαθμός απόδοσης είναι 39,6%

Συνεπώς, με την αναθέρμανση, κερδίζουμε με απόλυτους όρους 1% στην απόδοση.

Η σχετική βελτίωση με την αναθέρμανση ως προς την απόδοση χωρίς αναθέρμανση είναι  $1/38,6=2,6\%$

**!!! Η υπολογιζόμενη σχετική βελτίωση αντιστοιχεί στην εξοικονόμηση καυσίμου με τη χρήση αναθέρμανσης**