

## Ενθαλπία του μίγματος

$$h_{\text{mix}} = x \cdot h_{\text{sat, steam}} + (1 - x) \cdot h_{\text{sat, water}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h_{\text{mix}} = h_{\text{sat, water}} + x \cdot h_{\text{vaporization}} \Rightarrow h_{\text{mix}} = h_f + x \cdot h_{fg}$$

## Εντροπία του μίγματος

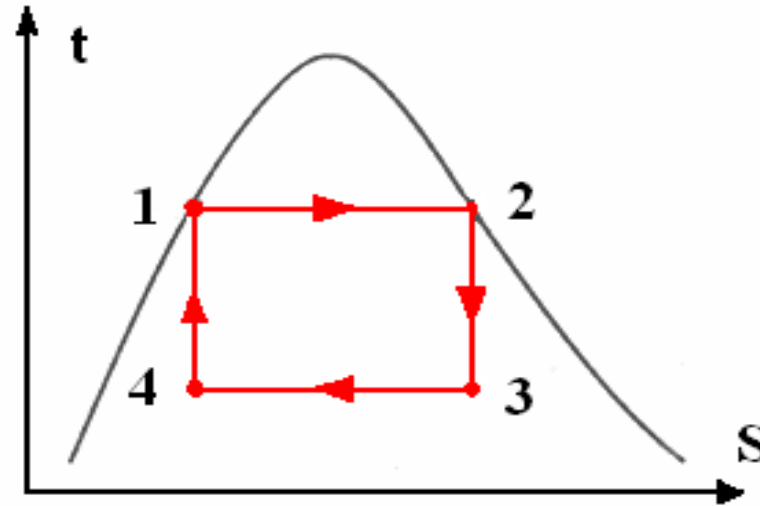
$$s_{\text{mix}} = x \cdot s_{\text{sat, steam}} + (1 - x) \cdot s_{\text{sat, water}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow s_{\text{mix}} = s_{\text{sat, water}} + x \cdot s_{\text{vaporization}} \Rightarrow s_{\text{mix}} = s_f + x \cdot s_{fg}$$

Αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν για **ειδικό όγκο** και **εσωτερική ενέργεια** του μίγματος

# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

## Κύκλος ατμού Carnot



$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

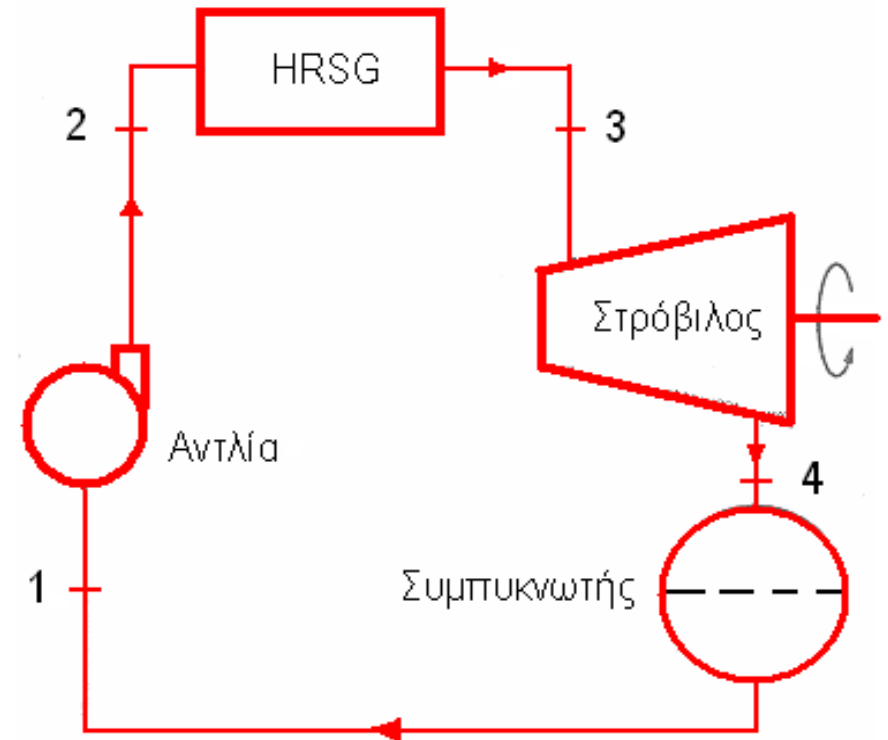
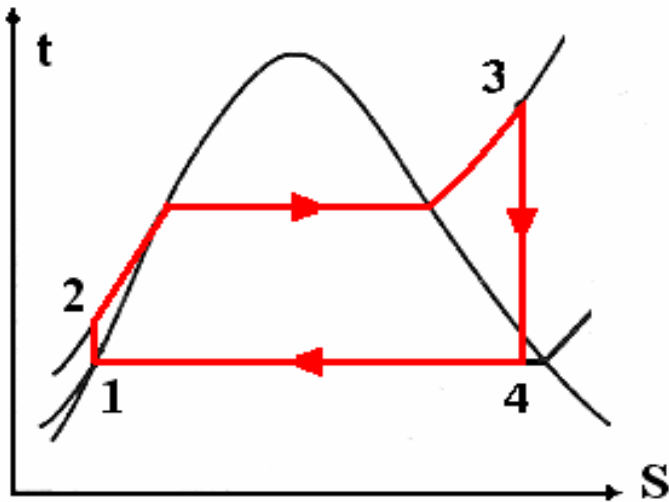
όπου T (K)

Τεχνικά προβλήματα :

1. Επειδή στα διφασικά συστήματα περιορίζεται η μέγιστη θερμοκρασία
2. Ανεπαρκής ποιότητα του ατμού
3. Συμπύεση του μίγματος υγρού-ατμού

# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

## Κύκλος Rankine



Αντλία ( $q = 0$ ):  $CW_{\text{pump}} = -(h_2 - h_1)$

HRSG ( $w = 0$ ):  $HI_{\text{HRSG}} = h_3 - h_2$

Ατμοστρόβιλος ( $q = 0$ ):  $EW_{\text{ST}} = -(h_4 - h_3)$

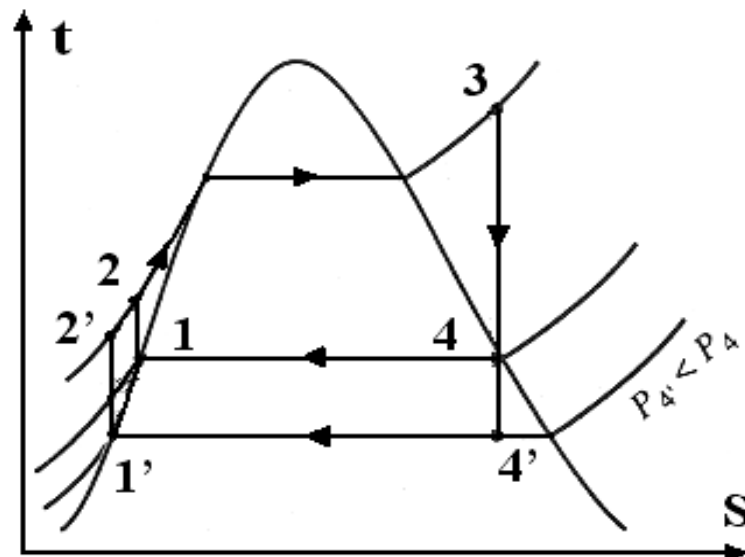
Συμπυκνωτής ( $w = 0$ ):  $HI_{\text{cond}} = h_1 - h_4$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{UW}{HI_{\text{HRSG}}} = \frac{EW_{\text{ST}} + CW_{\text{pump}}}{HI_{\text{HRSG}}} = \frac{HI_{\text{HRSG}} + HI_{\text{cond}}}{HI_{\text{HRSG}}} = 1 + \frac{HI_{\text{cond}}}{HI_{\text{HRSG}}}$$

# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

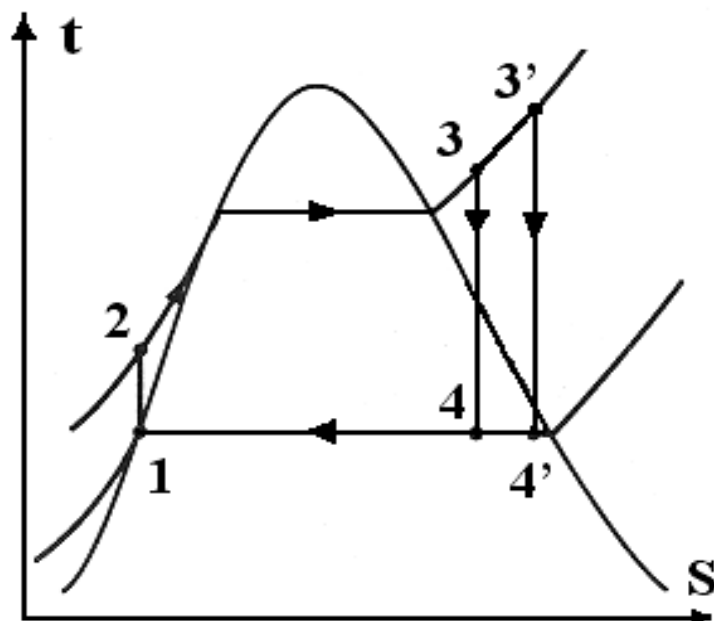
Μείωση της πίεσης του συμπυκνωτή

Πίεση συμπυκνωτή: 0.035-0.120bar  
Συνήθως 0.050-0.080bar



Υπερθέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες

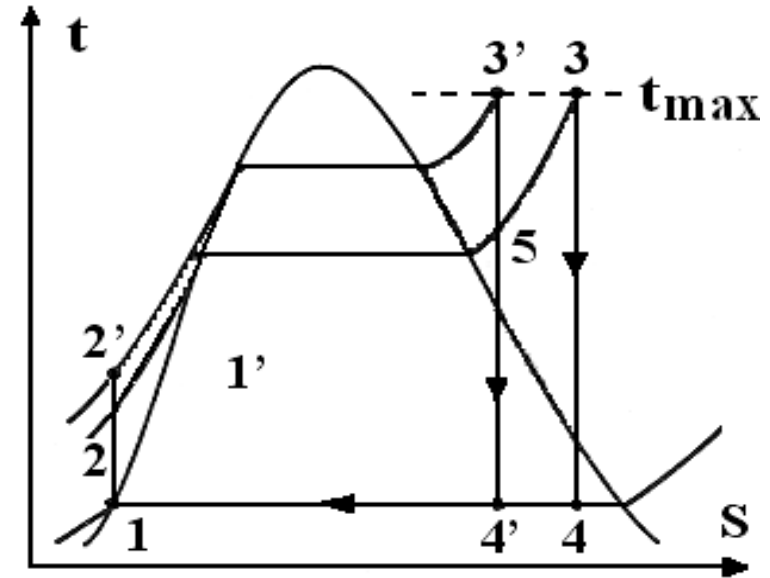
Συμβατικά: περίπου 540°C (1,000°F)  
Υπερκρίσιμα: 650-750°C



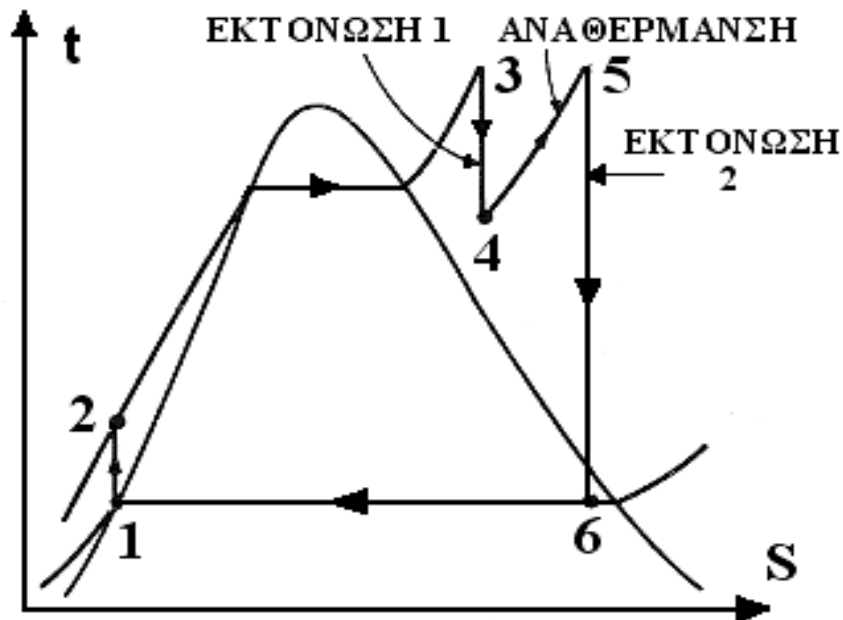
# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

Αύξηση της πίεσης της HRSG

Συμβατικά: 150-160bar

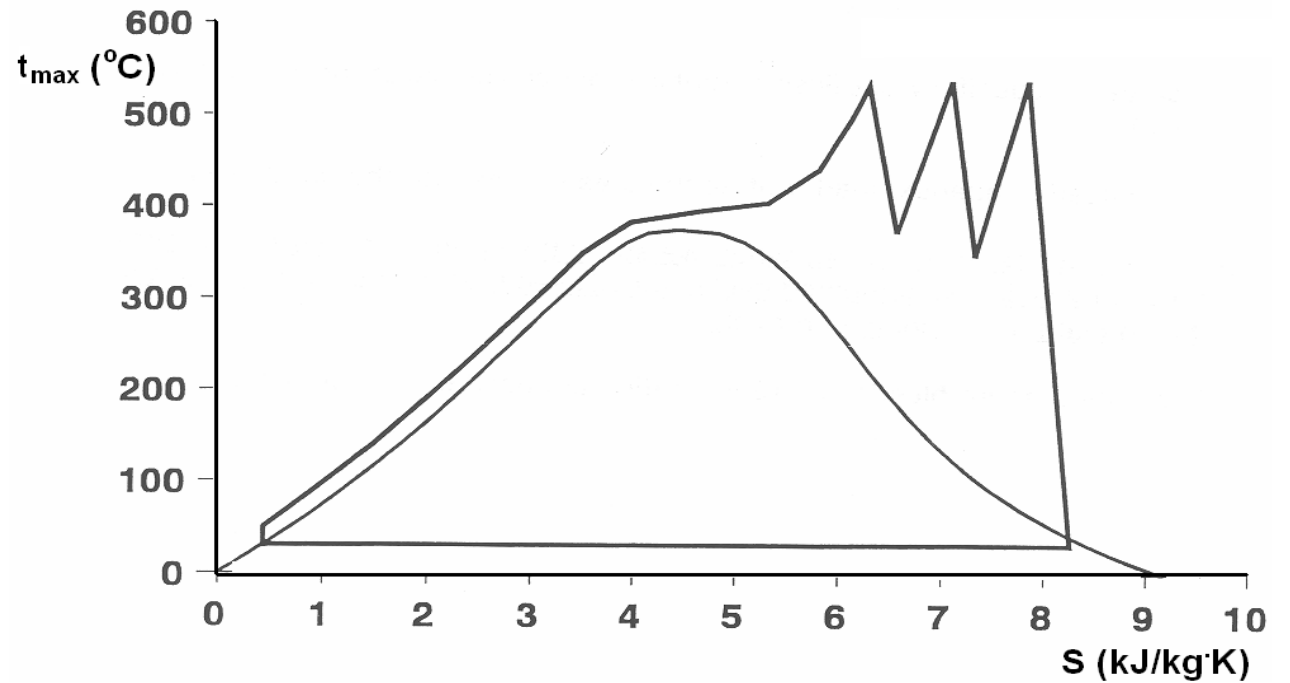


Αναθέρμανση



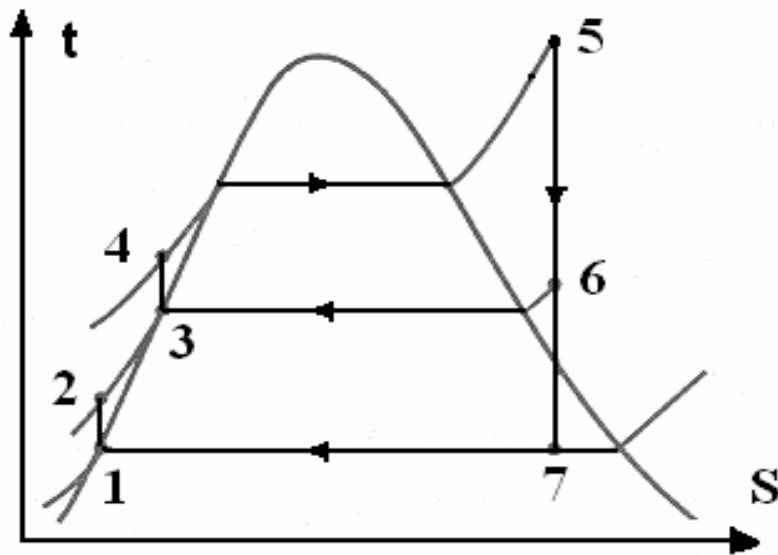
## Υπερκρίσιμη HRSG και διπλή αναθέρμανση

Πάνω από 220bar

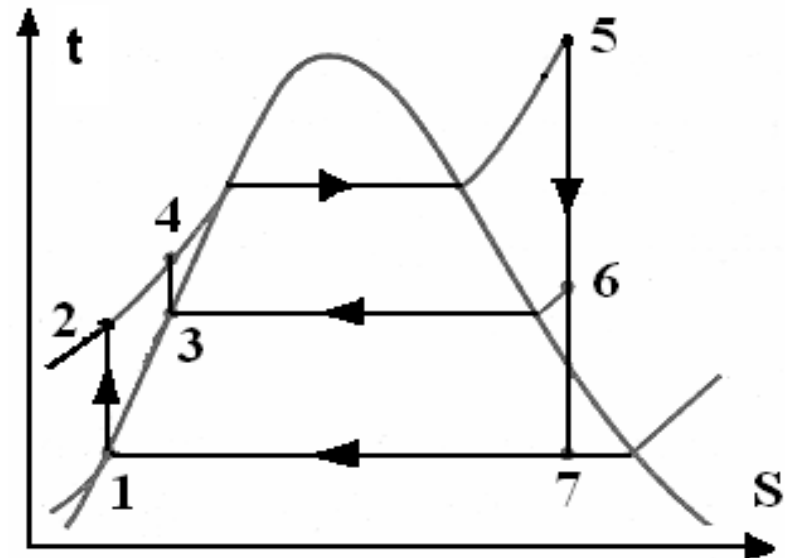


# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

## Αναγέννηση (Προθέρμανση)



ανοικτός θερμαντήρας



κλειστός θερμαντήρας

Αριθμός απομαστεύσεων: 3 έως και 10

**Ποιότητα ατμού:** από  $x = 0.85$  (πυρηνική) έως  $0.88$  (κανονικές εφαρμογές)

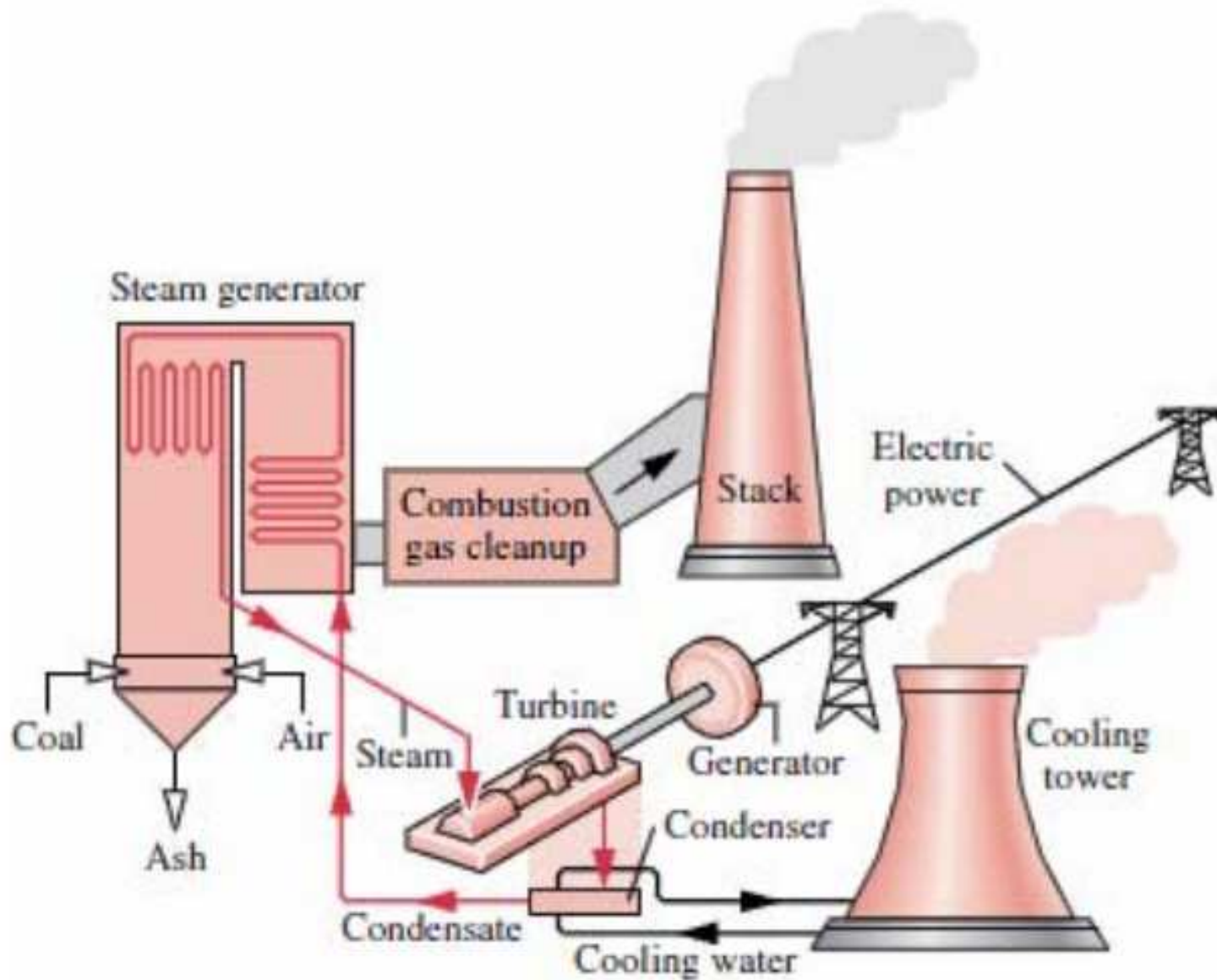
Βελτίωση της ποιότητα του ατμού στο τέλος της εκτόνωσης:

- Μείωση της μέγιστης πίεσης του κύκλου, αλλά αυτό μειώνει την απόδοση του κύκλου.
- Αύξηση της πίεσης του συμπυκνωτή, αλλά και αυτό επίσης μειώνει την απόδοση του κύκλου.
- Αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης, αλλά για να αντέξουν πάνω από το όριο των  $540^{\circ}\text{C}$  πρέπει να χρησιμοποιηθούν ακριβά υλικά υψηλής αντοχής.
- Μείωση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης των ατμοστρόβιλων, αλλά αυτό προφανώς δεν ενδείκνυται επίσης, επειδή η ισχύς των ατμοστρόβιλων είναι ευθέως ανάλογη προς την ισεντροπική απόδοση.



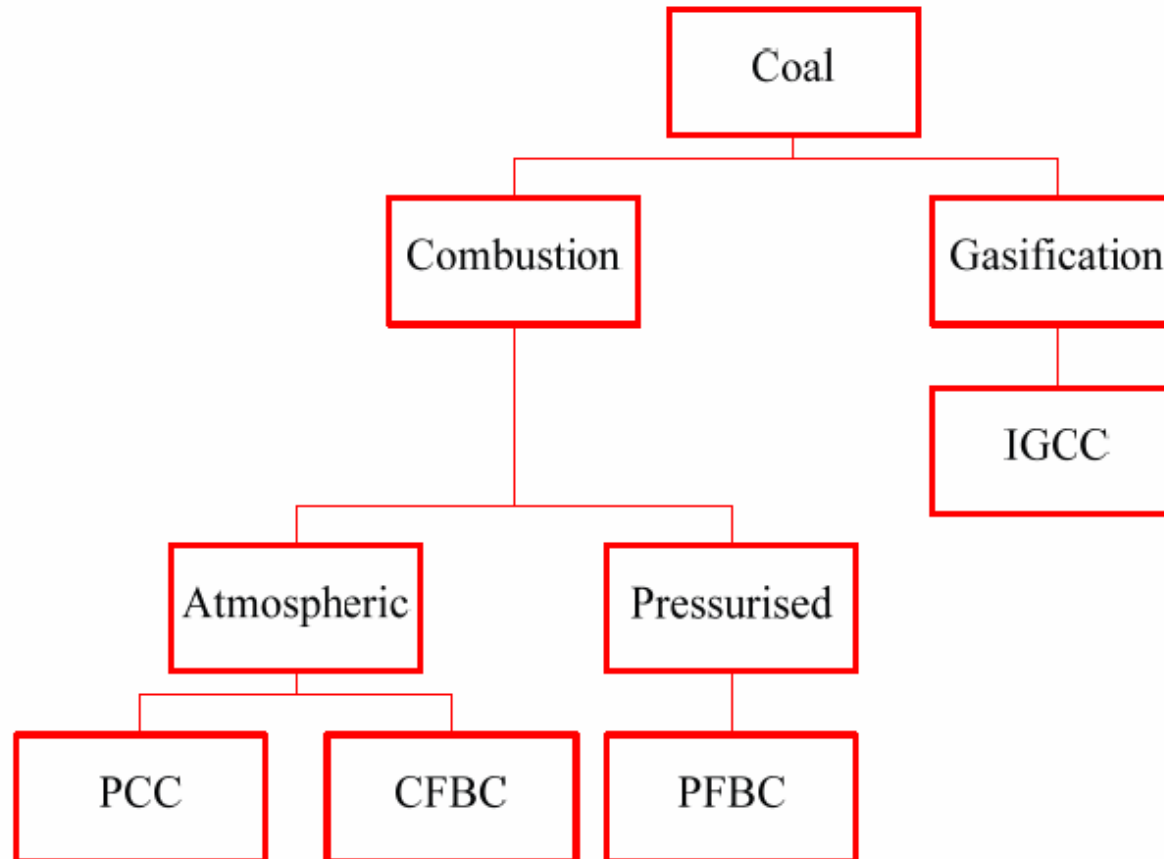
# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

## Ατμοηλεκτρικά εργοστάσια (ΑΗΣ)



# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

## Τύποι ατμοηλεκτρικών εργοστασίων (ΑΗΣ)



*IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle*

*PCC: Pulverised Coal Combustion*

*CFBC: Circulating Fluidised Bed Combustion*

*PFBC: Pressurised Fluidised Bed Combustion*

### Πλεονεκτήματα χρήσης του γαιάνθρακα σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας

- Τα αποθέματα γαιάνθρακα είναι σχετικά περισσότερα από κάθε άλλη συμβατική πρώτη ύλη, π.χ. το πετρέλαιο και άρα τον καθιστούν οικονομικά ελκυστικό.
- Τα αποθέματα γαιάνθρακα απαντώνται σε πολλά διαφορετικά γεωγραφικά σημεία του πλανήτη, γεγονός που δίνει την δυνατότητα σε πολλές χώρες που τον διαθέτουν να είναι όσο το δυνατόν αυτάρκης ενεργειακά, με προφανή πολιτικά πλεονεκτήματα.
- Οι γαιάνθρακες διαθέτουν σχετικά ικανοποιητική θερμογόνο ικανότητα 8-18MJ/kg, (συγκριτικά, το φυσικό αέριο έχει  $\approx 50$ MJ/kg).
- Ο γαιάνθρακας, είναι απαραίτητος για την παραγωγή σίδηρου, ατσαλιού και τσιμέντου στις περισσότερες χώρες.

### Προβλήματα από την χρήση του γαιάνθρακα για την παραγωγή ενέργειας

- Η καύση οποιουδήποτε καύσιμου που προέρχεται από απολίθωμα απελευθερώνει σημαντικές ποσότητες από CO<sub>2</sub> (φαινόμενο του θερμοκηπίου), CO (δηλητηριώδες αέριο), NO<sub>x</sub> (τοξικά αέρια, τρύπα του όζοντος), SO<sub>x</sub> (φαινόμενο της όξινης βροχής).
- Η καύση τους οδηγεί επίσης στην δημιουργία τέφρας είτε σε ιπτάμενη (*ash*) είτε σε υγρή μορφή (*slag*).
- Η εξόρυξη του γαιάνθρακα ειδικά με την μέθοδο των ανοικτών-επιφανειακών ορυχείων, διαταράσσει το φυσικό τοπίο και δημιουργεί μεγάλες ποσότητες υλικών για απόθεση.
- Η εξορυκτική διαδικασία και η μεταφορά του γαιάνθρακα οδηγεί συνήθως στην δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων αιωρούμενης σκόνης και θορύβου.
- Οι εγκαταστάσεις του εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις (περιλαμβάνουν μεγάλους αποθηκευτικούς χώρους-αυλές).

### Σχεδιαστικές επιλογές

- Πίεση ατμού: συμβατικά υποκρίσιμα εργοστάσια 160-170bar και στα υπερκρίσιμα περίπου 250bar. Ιδιαίτερα υψηλές αποδόσεις επιτυγχάνονται όταν η πίεση φθάνει 250-350bar, (*ultra supercritical*).
- Θερμοκρασία ατμού: Συνήθως, στα συμβατικά υποκρίσιμα εργοστάσια η θερμοκρασία είναι 530-560°C, ενώ τα υπερκρίσιμα έχουν θερμοκρασίες 580-615°C ακόμα και 700°C, (*ultra supercritical*).
- Αριθμός αναθερμάνσεων ατμού: μία ή το πολύ δύο.
- Αριθμός προθερμάνσεων τροφοδοτικού νερού: μέχρι και 10 φθάνοντας θερμοκρασία προθέρμανσης έως 350 °C.
- Η ξήρανση του άνθρακα έχει ελάχιστη επίπτωση στην απόδοση του εργοστασίου.
- Η πίεση λειτουργίας του συμπυκνωτή.
- Η δυνατότητα μεταβολής της πίεσης ατμού για καλύτερη λειτουργία σε μερικό φορτίο.
- Η τεχνολογία των υλικών: η επιλογή των υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την οικονομική δυνατότητα του επενδυτή. Η χρήση μεγάλων ποσοτήτων ακριβών *Ni-based* κραμάτων ή εξελιγμένου φερριτικού χάλυβα που χρησιμοποιείται για θερμοκρασίες μέχρι 650°C ανεβάζουν σημαντικά το κόστος κτήσης.

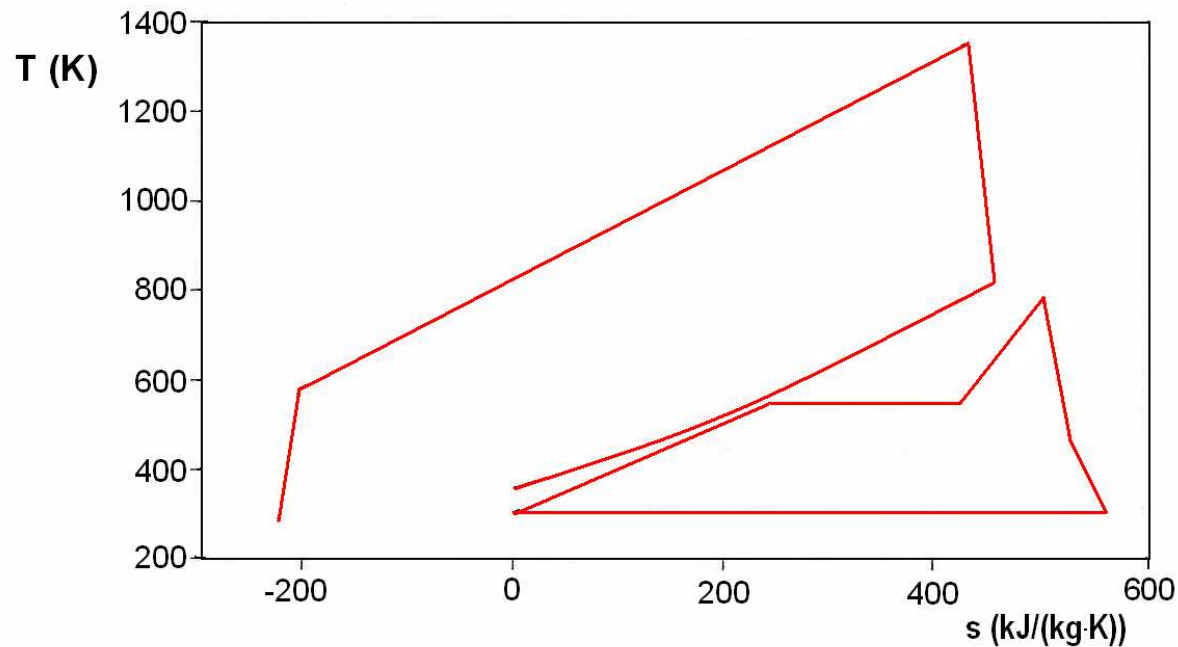
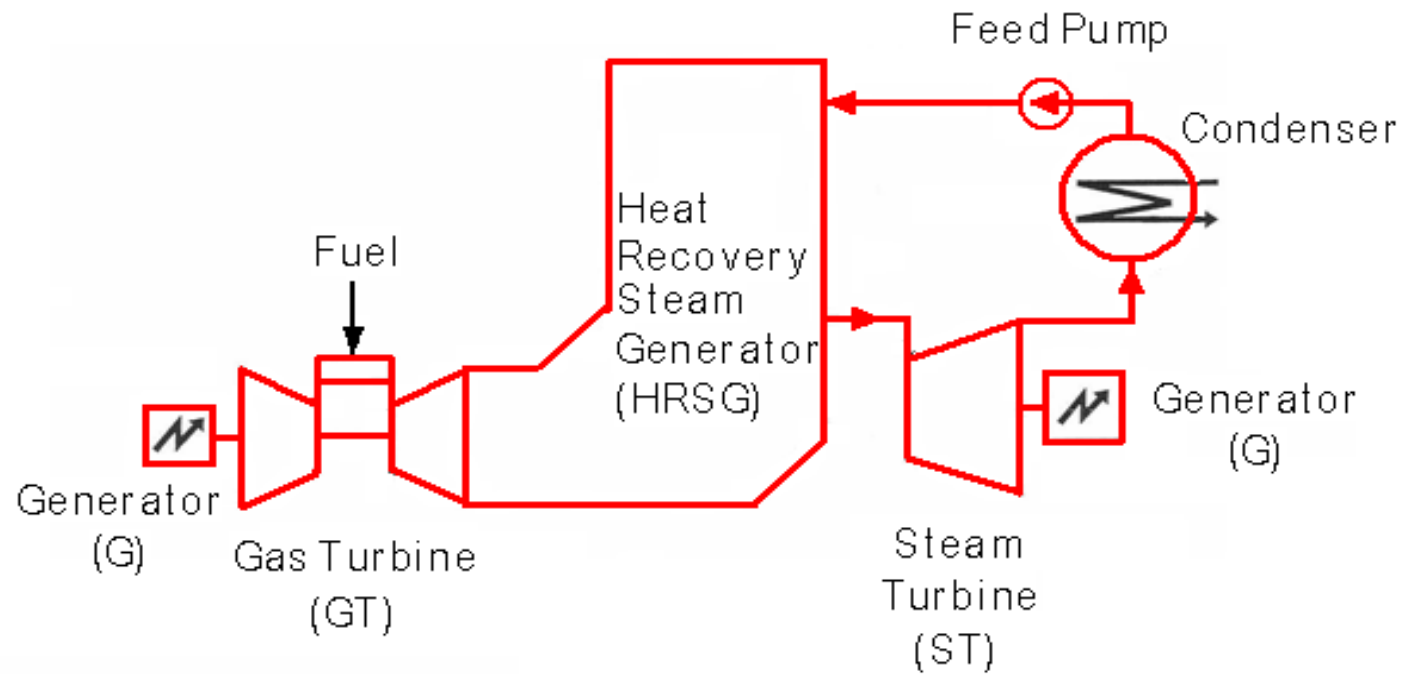
*Combined Cycle Power Plants, CCPP* ή  
*Gas Turbine Combined Cycle, GTCC* ή  
*Steam And Gas Turbine, STAG*.

**Συνδυασμένος κύκλος** (*Combined Cycle*) είναι ο συνδυασμός των δύο κύκλων ισχύος: ενός κύκλου αερίου (κύκλος *Brayton* ή *Gas Cycle, GC*) και ενός κύκλου ατμού (κύκλος *Rankine* ή *Steam Cycle, SC*).

- Ο **κύκλος αερίου**: υψηλής θερμοκρασίας (με μέγιστη την  $TET = 1,200-1,600^{\circ}\text{C}$  ενώ στο τέλος του απορρίπτεται θερμότητα μέσω των καυσαερίων  $500-700^{\circ}\text{C}$ ).
- Ο **κύκλος ατμού**: χαμηλής θερμοκρασίας (με μέγιστη θερμοκρασία περίπου  $550^{\circ}\text{C}$ ) απορρίπτεται θερμότητα σε θερμοκρασίες περίπου περιβάλλοντος.

$$\frac{U\dot{W}_{GT}}{U\dot{W}_{ST}} = \frac{2}{1}$$

# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό



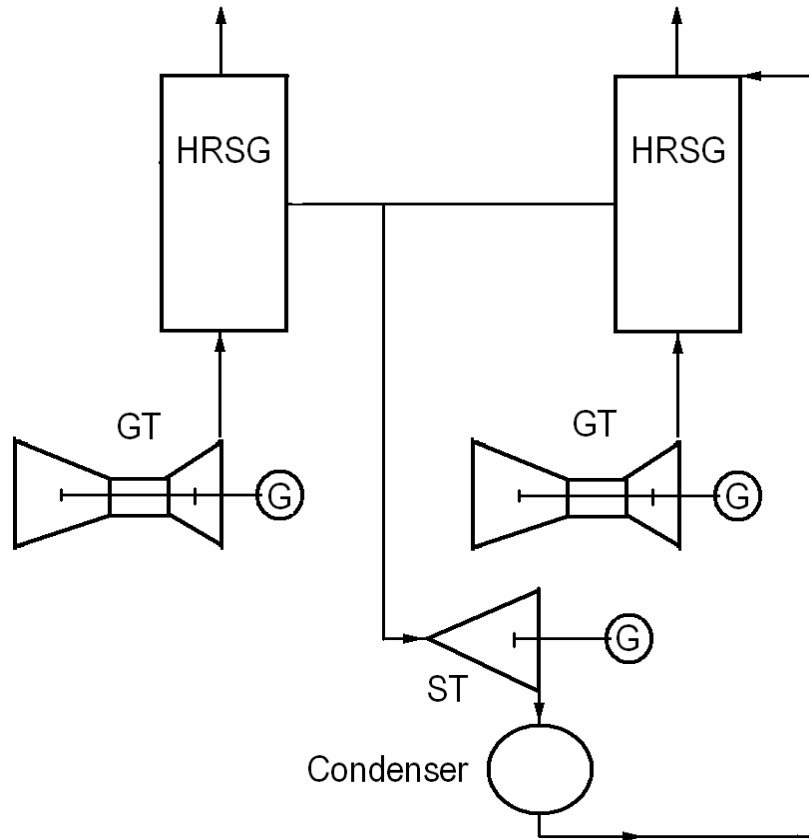
## Πλεονεκτήματα CCPP

- Υψηλός βαθμός θερμικής απόδοσης.
- Μειωμένο κόστος εγκατάστασης
- Ευελιξία καυσίμων
- Μειωμένος χρόνος εγκατάστασης
- Ευελιξία λειτουργίας
- Υψηλή αξιοπιστία (>98) και διαθεσιμότητα (>92)
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης

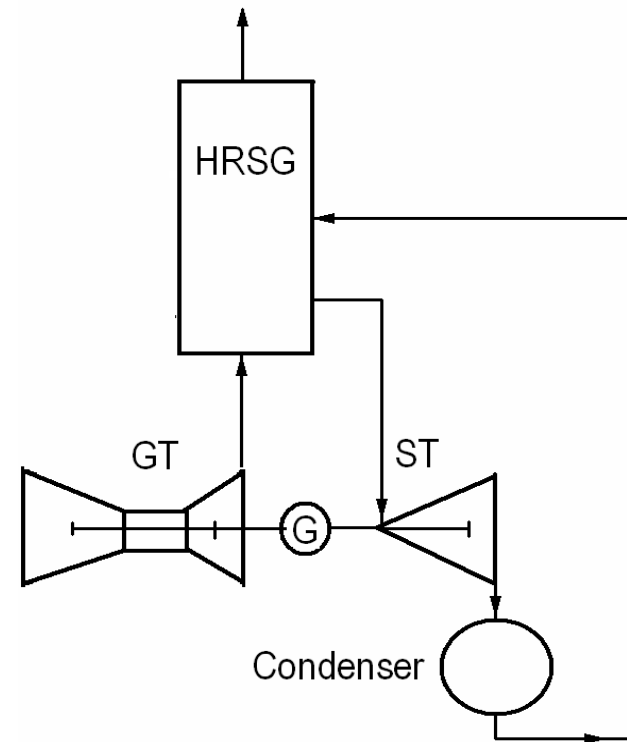


# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

## Διαμορφώσεις Εργοστασίων CCPP



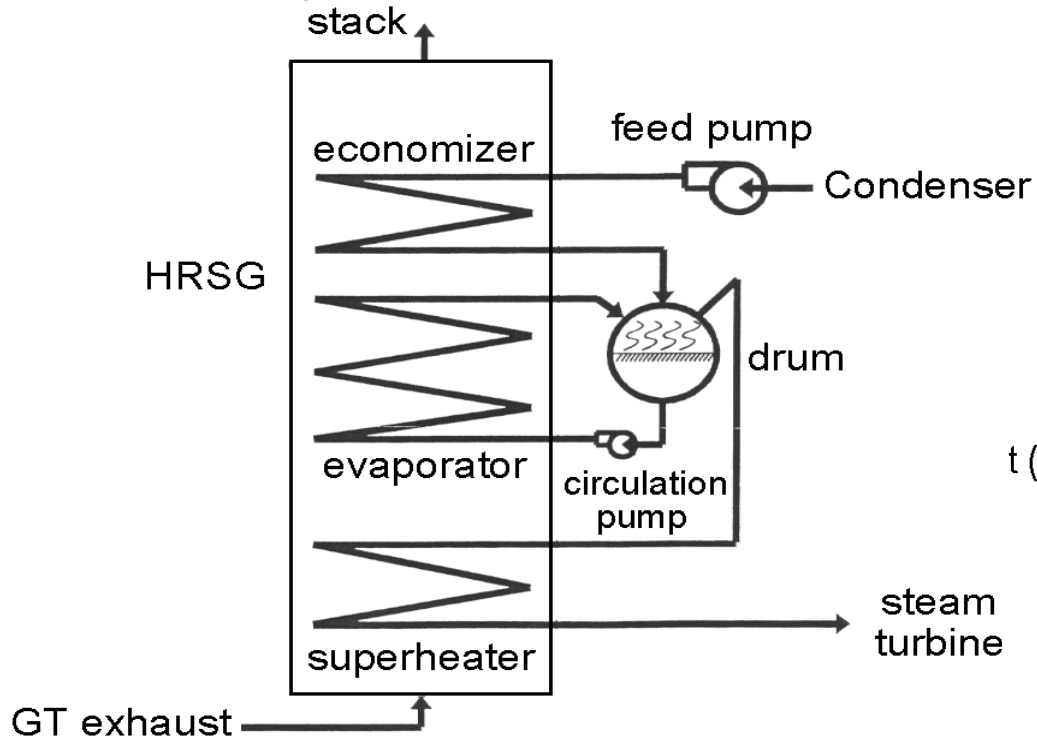
*Multi-shaft CCPP*



*Single-shaft CCPP*

# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

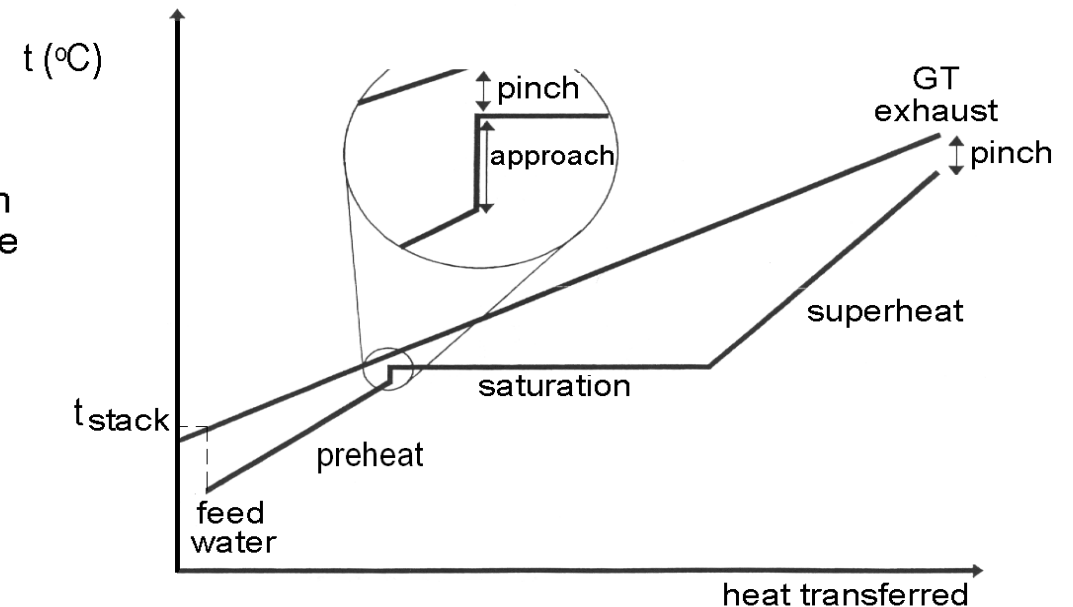
Γεννήτρια ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής ατμού  
(*Heat Recovery Steam Generator, HRSG*)



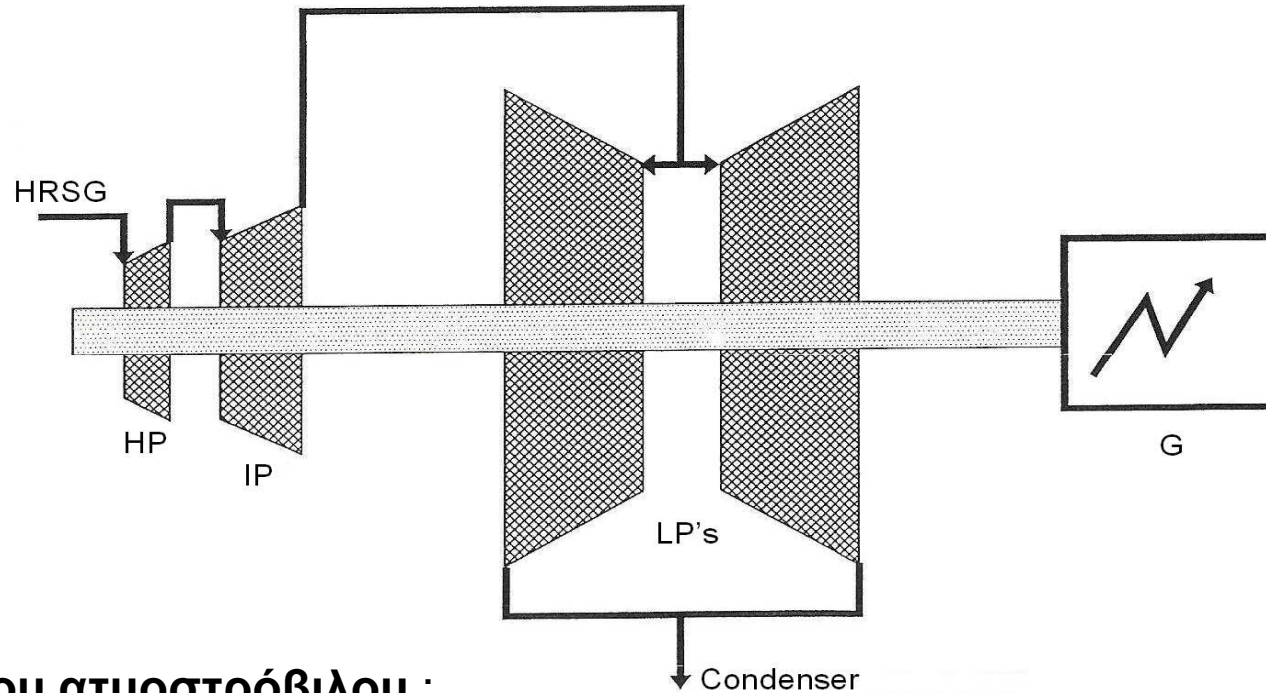
*superheater pinch point* : περίπου  $20^{\circ}\text{C}$

*evaporator pinch point*): περίπου  $10^{\circ}\text{C}$

*approach point*: από  $2-10^{\circ}\text{C}$



## Ατμοστρόβιλος (*steam turbine, ST*)



### Παράμετροι του ατμοστρόβιλου :

- η πίεση λειτουργίας,
- η μέγιστη θερμοκρασία εισόδου,
- η παροχή μάζας εισόδου,
- η πίεση εξόδου (*back pressure*),
- η ποιότητα του ατμού εξόδου ( $x$ ). Ποιότητες ατμού κάτω από 0.87-0.88 οδηγούν σε εμφάνιση προβλημάτων διάβρωσης,
- η εγκάρσια διατομή της εξαγωγής (*exhaust cross section*) και ο αριθμός των τυμπάνων χαμηλής πίεσης (*Low Pressure, LP*).

## Συμπυκνωτής

### παράμετροι του συμπυκνωτή:

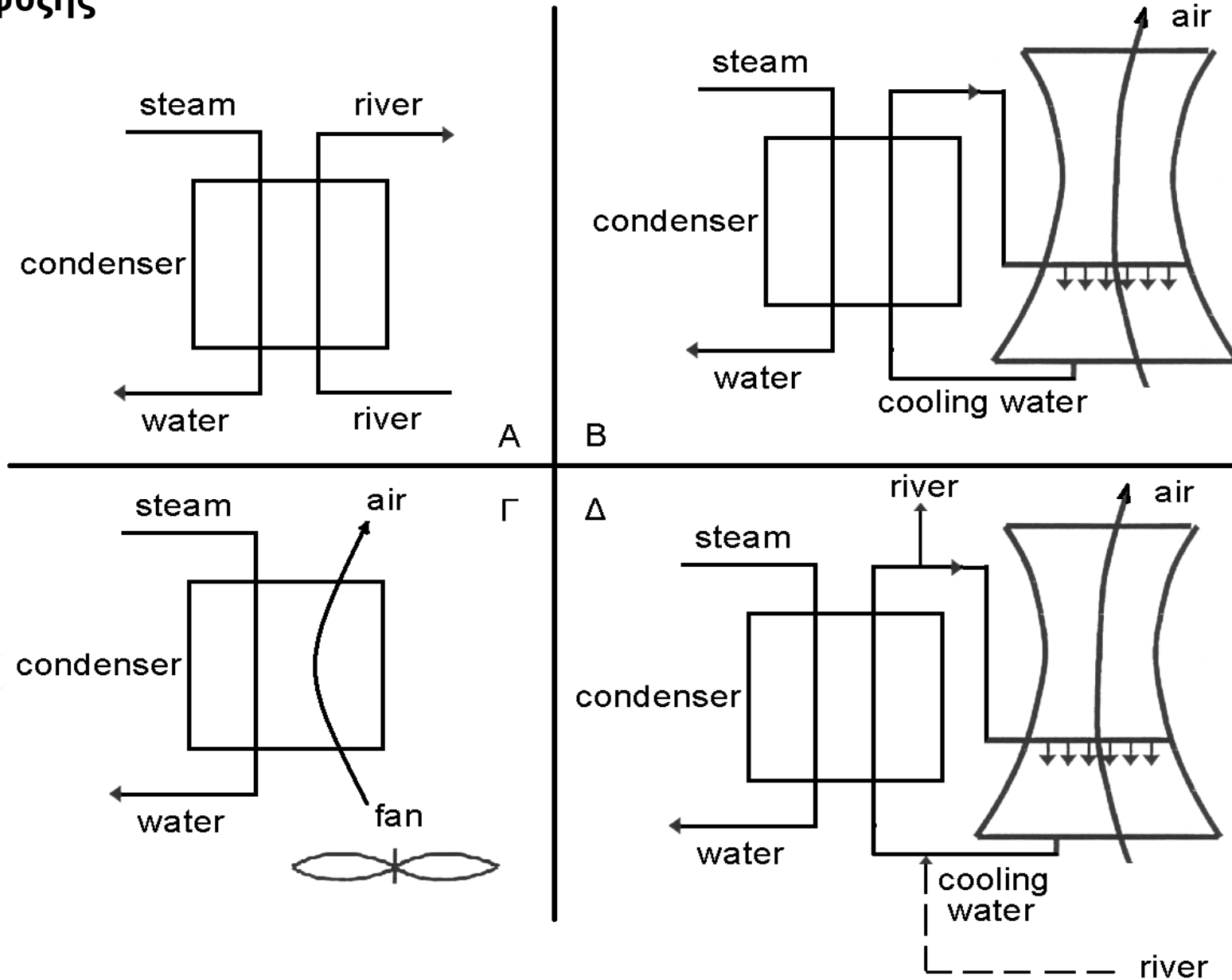
- η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού μέσου,
- η αύξηση της θερμοκρασίας ψυκτικού μέσου, που εξαρτάται από τη παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου και από το ποσό θερμότητας που πρέπει να αποβάλει ο συμπυκνωτής,
- η διαφορά θερμοκρασίας του κρίσιμου σημείου του συμπυκνωτή (*pinch point*),
- η προκύπτουσα θερμοκρασία και πίεση κορεσμού του ατμού, που είναι πολύ σημαντική γιατί η απόδοση του ατμοστρόβιλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πίεση στην έξοδο.

## Τροφοδοτικές αντλίες

- αντλίες αναρρόφησης (*extraction pumps*) που ακολουθούνται από
- τροφοδοτικές αντλίες (*feed pumps*)

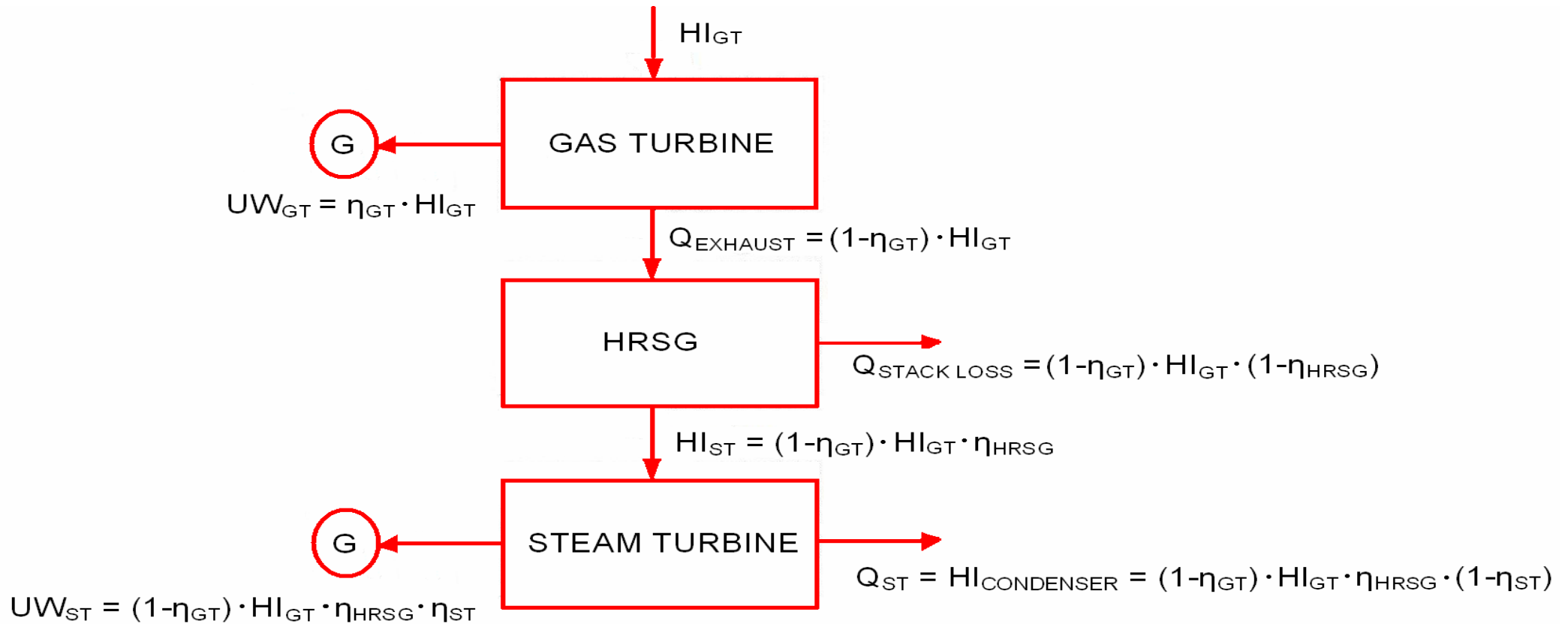
# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

## Συστήματα ψύξης



# Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

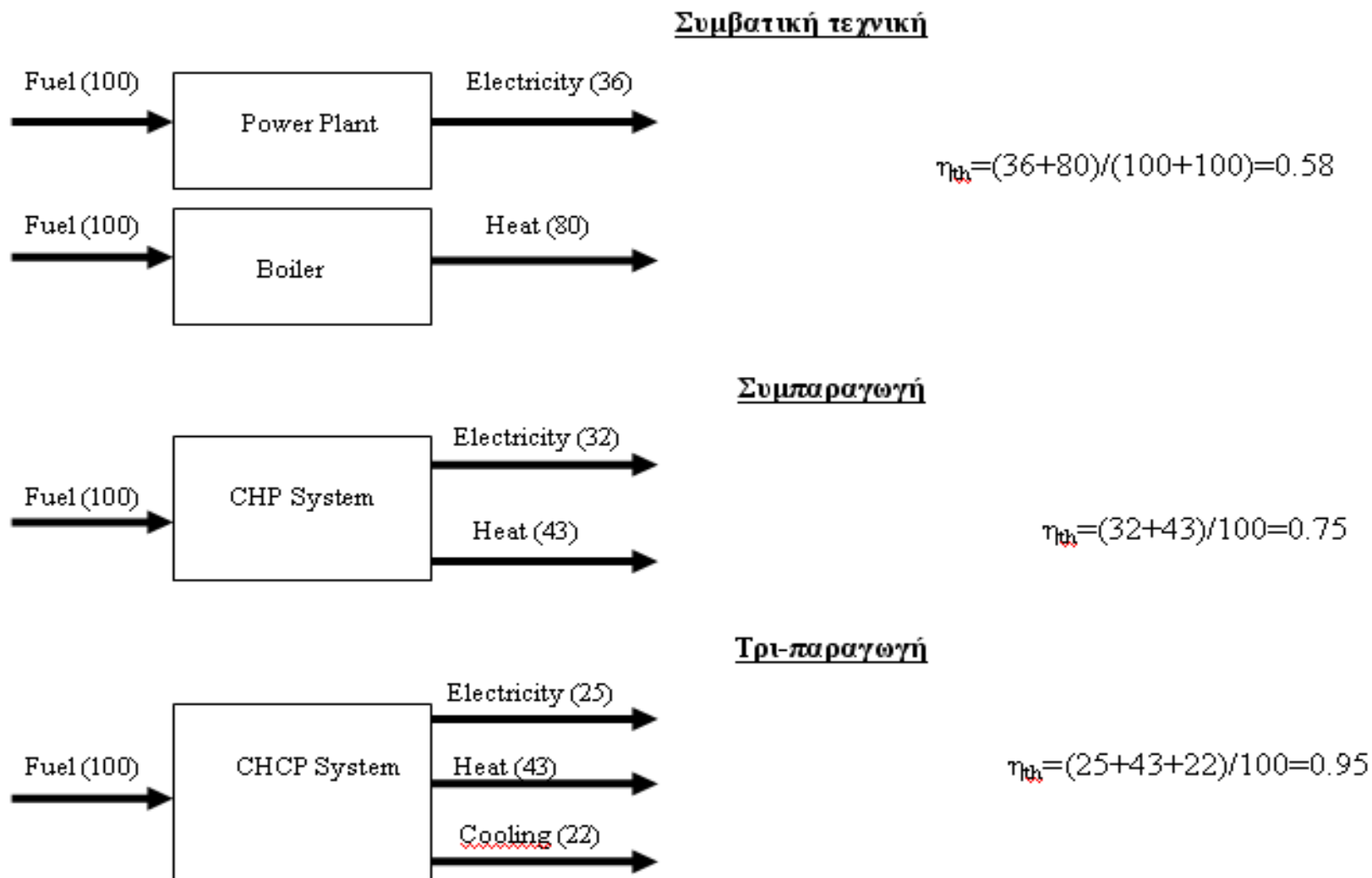
Γενική μέθοδος μελέτης των επιδόσεων του συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης



## Ιδανικοί Θερμοδυναμικοί Κύκλοι Παραγωγής Ισχύος με Ατμό

Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού και Θέρμανσης, ΣΗΘ ή

Συμπαγωγή, (για την Αγγλία *Combined Heat and Power*, CHP για τις ΗΠΑ: *Cogeneration*).



### Τηλεθέρμανση (*District Heating*) και Τηλεψύξη (*District Cooling*)

#### Επιπλέον:

- Συνεχής παροχή ζεστού νερού οικιακής χρήσης (μέσω οικιακού θερμικού εναλλάκτη).
- Λιώσιμο του χιονιού στους δρόμους της πόλης τον Χειμώνα.
- Κατάργηση του εποχιακού οικιακού ανεφοδιασμού με καύσιμα
- Κατάργηση διατήρησης αποθέματος καυσίμων στις κατοικίες.
- Σχετική ανεξαρτητοποίηση της τιμολόγησης από τις μεγάλες και συνεχείς διακυμάνσεις των τιμών του πετρελαίου.
- Αξιόπιστη και εύκολη πληρωμή της παροχής θέρμανσης (ή και κλιματισμού) μέσω μηνιαίων λογαριασμών.

#### Προϋποθέσεις εγκατάστασης συμπαραγωγής σε κατοικημένες περιοχές:

- επιλογή τεχνολογίας με χαμηλές εκπομπές ρύπων,
- προσεκτική επιλογή του τόπου εγκατάστασης,
- τοποθέτηση εξοπλισμού ελέγχου και περιορισμού των εκπεμπόμενων ρύπων,
- ελαστική έδραση και ηχητική μόνωση του συστήματος,
- κατασκευή καπνοδόχου υψηλότερης των γειτονικών κτιρίων,
- εγκατάσταση μέσων συλλογής και αποκομιδής των στερεών και υγρών καταλοίπων.



### Συστήματα «κορυφής» (*topping systems*)

- Συστήματα αμμοστροβίλων.
- Συστήματα αεριοστροβίλου ανοικτού ή κλειστού κύκλου.
- Συστήματα συνδυασμένου κύκλου.
- Συστήματα με εμβολοφόρο μηχανή εσωτερικής καύσης.
- Κύκλοι βάσης *Rankine* με οργανικά ρευστά.
- Κυψέλες καυσίμου.
- Μηχανές *Stirling*.

### Συστήματα «βάσης» (*bottoming systems*)

Τρόποι λειτουργίας (*modes*) ενός συστήματος συμπαραγωγής

- Κάλυψη του θερμικού φορτίου (*heat match*)
- Κάλυψη του θερμικού φορτίου βάσης
- Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου (*electricity match*)
- Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου βάσης
- Μικτός τρόπος
- Αυτόνομη λειτουργία

**Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού, Θέρμανσης και Ψύξης ΣΗΘΨ, ή Τρι-παραγωγή, (για την Αγγλία *Combined Heat, Cooling and Power, CHCP* για τις ΗΠΑ: *Tri-generation*).**

**Εφαρμογές Συμπαραγωγής/Τρι-παραγωγής**

- Βιομηχανικός τομέας (βιομηχανίες χημικών διεργασιών, τροφίμων κ.α.)
- Εμπορικός - κτιριακός τομέας
- Εθνικό σύστημα ηλεκτρισμού
- Αγροτικός τομέας