



# **[119] Θερμοδυναμική Ι**

**Θερμοδυναμικοί κύκλοι  
παραγωγής ισχύος με ατμό**

***καθηγητής Γ. Σκόδρας***

# Περιεχόμενα...

*Η διάλεξη που ακολουθεί βασίζεται στα συγγράμματα:*

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

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



# Περιεχόμενα...

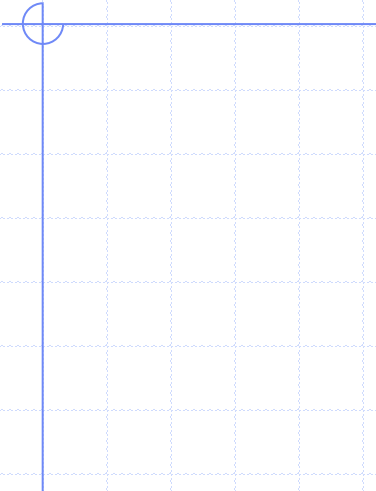
- ❑ **Ορισμοί**
- ❑ **Ιδανικό υγρό και ατμός**
- ❑ **Ενθαλπία και εντροπία μίγματος νερού / ατμού**
- ❑ **Κύκλοι παραγωγής ισχύος με ατμό**
  - ✓ Κύκλος ατμού Carnot
  - ✓ Κύκλος Rankine
  - ✓ Διαμορφώσεις κύκλου Rankine
- ❑ **Διαμορφώσεις κύκλου Rankine**
- ❑ **Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής**



# Περιεχόμενα...

- ❑ **Ηλεκτροπαραγωγή συνδυασμένου κύκλου**
  - ✓ Αρχές συνδυασμένου κύκλου
  - ✓ Διαμορφώσεις συνδυασμένων κύκλων
  - ✓ Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου
  - ✓ Υπολογισμός στο σημείο σχεδιασμού CCP μονής πίεσης
- ❑ **Διαμορφώσεις συνδυασμένων κύκλων**
- ❑ **Συμπαγωγή**
- ❑ **Τεχνικές συμπαγωγής (co-generation)**
  - ✓ Η έννοια της συμπαγωγής
  - ✓ Σύγχρονες τεχνικές συμπαγωγής
  - ✓ Τρόποι λειτουργίας των συστημάτων συμπαγωγής
- ❑ **Τρι-παραγωγή (tri-generation)**
- ❑ **Εφαρμογές συμπαγωγής / τρι-παραγωγής**





***Ορισμοί...***



# Ορισμοί...

- ❑ Το νερό και οι ιδιότητες του θεωρείται ότι είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας και, επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό υγρό
- ❑ Οι ιδιότητες του νερού θεωρείται ότι εξαρτώνται ελάχιστα από την πίεση, είναι δηλαδή πρακτικά **ασυμπίεστο**
- ❑ **Παραδοχή**: Θεωρείται ότι οι ιδιότητες του νερού είναι ανεξάρτητες από την πίεση και είναι αυτές του κορεσμένου υγρού
- ❑ Τα παραπάνω **ΔΕΝ** ισχύουν για τον ατμό, και δεν μπορεί να γίνει καμία απλουστευτική παραδοχή για τις ιδιότητες του ατμού, οπότε χρησιμοποιούνται οι πραγματικές ιδιότητες



# Ορισμοί...

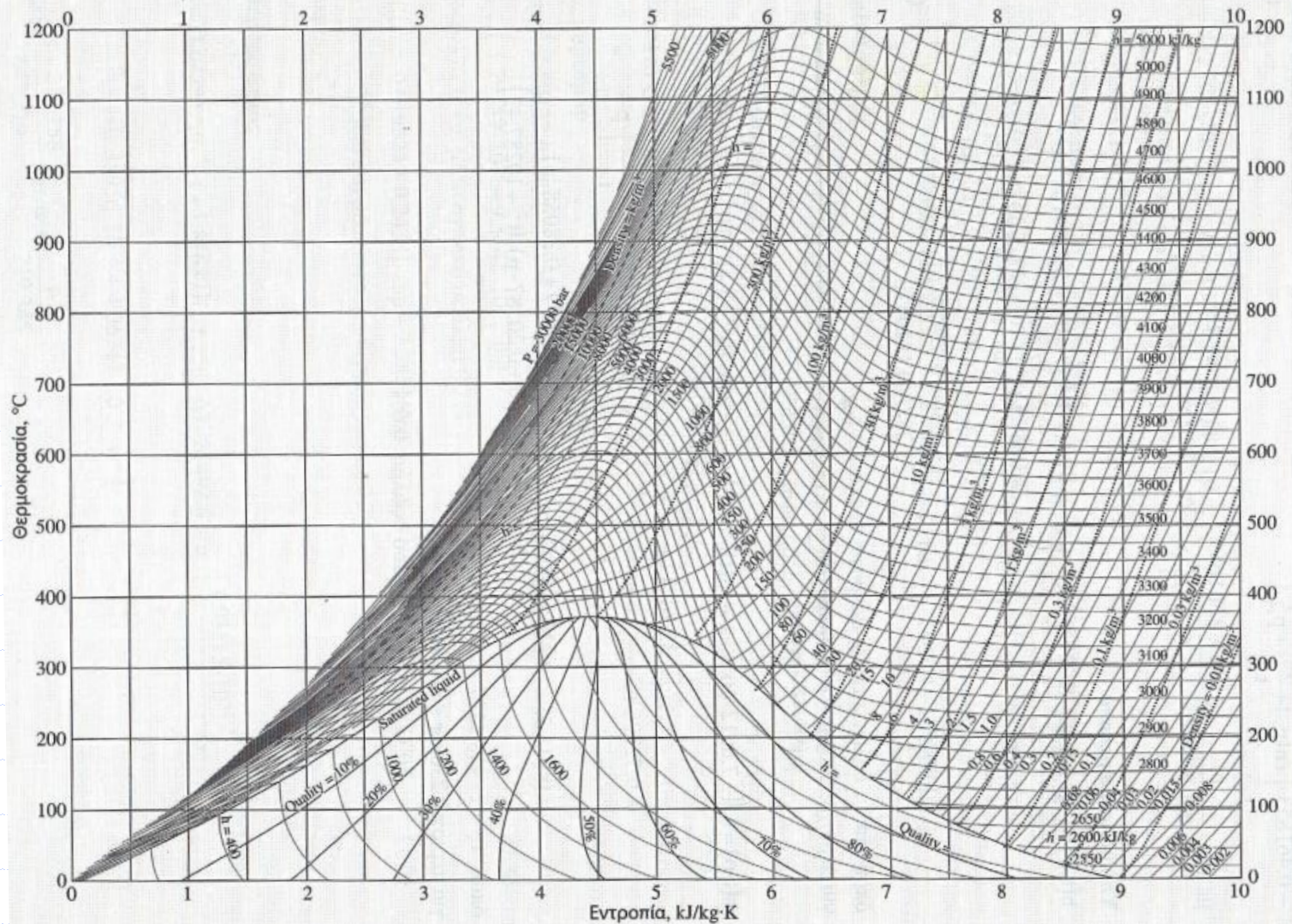
Ο υπολογισμός των πραγματικών ιδιοτήτων του νερού και του ατμού γίνεται με τρεις τρόπους:

- Χρήση διαγραμμάτων
- Χρήση πινάκων
- Χρήση σχέσεων ιδιοτήτων υγρού – ατμού



# Ορισμοί...

## ☐ Χρήση διαγραμμάτων





# Χρήση πινάκων

		Specific Volume (m <sup>3</sup> /kg)		Internal Energy (kJ/kg)			Enthalpy (kJ/kg)			Entropy (kJ/(kg · K))		
Temp.	Sat. press.	Sat. Liquid	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor	Sat. Liquid	Evap.	Sat. Vapor
t (°C)	P <sub>sat</sub> (kPa)	v <sub>f</sub>	v <sub>g</sub>	u <sub>f</sub>	u <sub>fg</sub>	u <sub>g</sub>	h <sub>f</sub>	h <sub>fg</sub>	h <sub>g</sub>	s <sub>f</sub>	s <sub>fg</sub>	s <sub>g</sub>
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

# Ορισμοί...

## □ Χρήση σχέσεων ιδιοτήτων υγρού – ατμού

- ✓ **Κορεσμένο υγρό** (και υπόψυκτο υγρό στην ίδια θερμοκρασία, θεωρώντας ιδανικό υγρό)

$$h_f(t) = \left( \left( \left( \left( \left( \left( \left( 2.788 \cdot 10^{-19} \cdot t - 3.987 \cdot 10^{-16} \right) \cdot t + 2.39894 \cdot 10^{-13} \right) \cdot t - \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \left. \left. \left. \left. \left. \left. \left. - 7.857 \cdot 10^{-11} \right) \cdot t + 1.521311 \cdot 10^{-8} \right) \cdot t - 1.76274 \cdot 10^{-6} \right) \cdot t + \right. \right. \right. \right. \right. \left. \left. \left. \left. \left. \left. + 1.208711 \cdot 10^{-4} \right) \cdot t - 4.45397 \cdot 10^{-3} \right) \cdot t + 4.25348 \right) \cdot t \right.$$

για  $0^\circ\text{C} < t < 370^\circ\text{C}$  και μέσο σχετικό σφάλμα 0.6%

$$s_f(t) = \left( \left( \left( \left( \left( \left( 8.73065 \cdot 10^{-13} \cdot t - 7.07805 \cdot 10^{-10} \right) \cdot t + 2.341782 \cdot 10^{-7} \right) \cdot t - \right. \right. \right. \right. \right. \left. \left. \left. \left. \left. \left. - 4.794256 \cdot 10^{-5} \right) \cdot t + 1.619232 \cdot 10^{-2} \right) \cdot t - 8.387074 \cdot 10^{-3} \right) \cdot t \right.$$

για  $0^\circ\text{C} < t < 370^\circ\text{C}$  και μέσο σχετικό σφάλμα 0.2%



# Ορισμοί...

## □ Χρήση σχέσεων ιδιοτήτων υγρού – ατμού

### ✓ Κορεσμένος ατμός

$$h_g(t) = \left( (-7.35167 \cdot 10^{-6} \cdot t - 2.33298 \cdot 10^{-3}) \cdot t + 2.43725 \right) \cdot t + 2491.695 + \frac{6349.4}{t - 387.449}$$

για  $0^\circ\text{C} < t < 370^\circ\text{C}$  και μέσο σχετικό σφάλμα 0.2%

$$s_g(t) = \left( (-1.18467 \cdot 10^{-7} \cdot t - 7.9544 \cdot 10^{-5}) \cdot t - 0.024623 \right) \cdot t + 9.13$$

για  $0^\circ\text{C} < t < 370^\circ\text{C}$  και μέσο σχετικό σφάλμα 0.4%



# Ορισμοί...

- Χρήση σχέσεων ιδιοτήτων υγρού – ατμού
  - ✓ Σχέσεις κορεσμού

$$p(t) = \exp\left(-5.09132 + t \cdot \left(0.0718934 + t \cdot \left(-2.72751 \cdot 10^{-4} + t \cdot \left(7.65835 \cdot 10^{-7} + t \cdot \left(-1.29359 \cdot 10^{-9} + 9.5642 \cdot 10^{-13}\right)\right)\right)\right)\right)$$

για  $0^{\circ}\text{C} < t < 370^{\circ}\text{C}$  και μέσο σχετικό σφάλμα 0.2%

$$t(p) = \left(\left(\left(\ln p \cdot 0.019523 + 0.2438\right) \cdot \ln p + 2.388\right) \cdot \ln p + 27.834\right) \cdot \ln p + 99.69$$

για  $0.01\text{bar} < p < 220\text{bar}$  και μέσο σφάλμα θερμοκρασίας  $0.2^{\circ}\text{C}$   
όπου  $\exp(x) = e^x$ .



# Ορισμοί...

## □ Χρήση σχέσεων ιδιοτήτων υγρού – ατμού

### ✓ Υπέρθερμος ατμός

$$h(t, p) = (3.04331 \cdot 10^{-4} \cdot t + 1.81687) \cdot t + 2503.63 - 21492.63 \cdot w \cdot \left( \frac{1.93115 \cdot 10^{-2}}{v^3} \right) + \\ + \frac{w^2}{v^{14.7866}} \cdot (1.35956 \cdot 10^{-2} + 4.06747 \cdot 10^{-3} \cdot w^2)$$

$$\text{όπου } v = \frac{t + 276.158}{647.719} \text{ και } w = \frac{p}{219.345}$$

περιοχές:  $0.01 \text{ bar} < p < 210 \text{ bar}$

κορεσμός:  $t < 800^\circ \text{C}$  και μέσο σχετικό σφάλμα 0.1%

$$s(t, p) = ((0.907643 \cdot t_r - 3.64635) \cdot t_r + 6.57334) \cdot t_r + 2.13856 - \\ - 0.461853 \cdot \left( \ln(p_r) + \frac{p_r}{t_{r4}} + p_{r4}^3 \right)$$

$$\text{με } p_r = \frac{p}{219.1936}, t_r = \frac{t + 271.8659}{645.9763}, t_{r4} = t_r^4, p_{r4} = \frac{p_r \cdot t_r}{t_r^4}$$

# Ορισμοί...

## □ Χρήση σχέσεων ιδιοτήτων υγρού – ατμού

### ✓ Υπερκρίσιμο ρευστό

$$h(t,p) = \left( \left( -1.8622 \cdot 10^{-8} + 3.043 \cdot 10^{-11} \cdot p \right) \cdot p \cdot t - 1.355 \cdot 10^{-3} + 2.039 \cdot 10^{-5} \cdot p - \right. \\ \left. - 3.097 \cdot 10^{-8} \cdot p^2 \right) \cdot t + 3.3248 + \frac{143.847}{p} \cdot t + 611.736 + 0.15214 \cdot p + \\ + (378.551 - 0.1047 \cdot p) \cdot \tan^{-1} \left( \frac{t - (304.56 + 0.32424 \cdot p)}{-35.288 + 0.18294 \cdot p} \right)$$

όπου  $\tan^{-1}$  : δηλώνει την αντίστροφη εφαπτομένη,

για περιοχή:  $230\text{bar} < p < 400\text{bar}$

$50^\circ\text{C} < t < 700^\circ\text{C}$ , -μέσο σφάλμα: 0.5%.

$$s(t,p) = \left( \left( -7.0012 \cdot 10^{-11} \cdot t + 8.018 \cdot 10^{-8} \right) \cdot t - 3.1969 \cdot 10^{-5} \right) \cdot t + 1.5312 \cdot 10^{-2} \cdot t + \\ + 0.52206 + \frac{\left( -32.30743 + \frac{530.2522}{t} \right)}{t} + \left( -1.15516 \cdot 10^{-3} + \frac{5 \cdot 10^{-2}}{t} \right) \cdot p + \\ + (8841.56 - 14.5497 \cdot p) \cdot \tan^{-1} \left( \frac{t - (285.9479 + 0.38058 \cdot p)}{(-40.9966 + 0.20387 \cdot p) \cdot (t_x^2 + 10287.42)} \right)$$

όπου  $t_x = t - 418.5297$

για περιοχή:  $230\text{bar} < p < 400\text{bar}$

$50^\circ\text{C} < t < 600^\circ\text{C}$ , -μέσο σφάλμα: 0.6%.

# Ορισμοί...

- ❑ Η **ενθαλπία** ανά μονάδα μάζας  $h$ , είναι το ποσό της ολικής θερμοδυναμικής ενέργειας που περιέχεται σε ένα υγρό ή ατμό ανά μονάδα μάζας
- ❑ Είναι καταστατική ιδιότητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει όλες τις άλλες ιδιότητες του νερού ή του ατμού
- ❑ Είναι διαφορετική για την υγρή και την αέρια (ατμός) φάση στην ίδια θερμοκρασία και πίεση
- ❑ Η ενθαλπία του μίγματος (ως γραμμική ιδιότητα) είναι το άθροισμα της ενθαλπίας της υγρής φάσης και της φάσης του ατμού:

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

Φάση ατμού →      Υγρή φάση

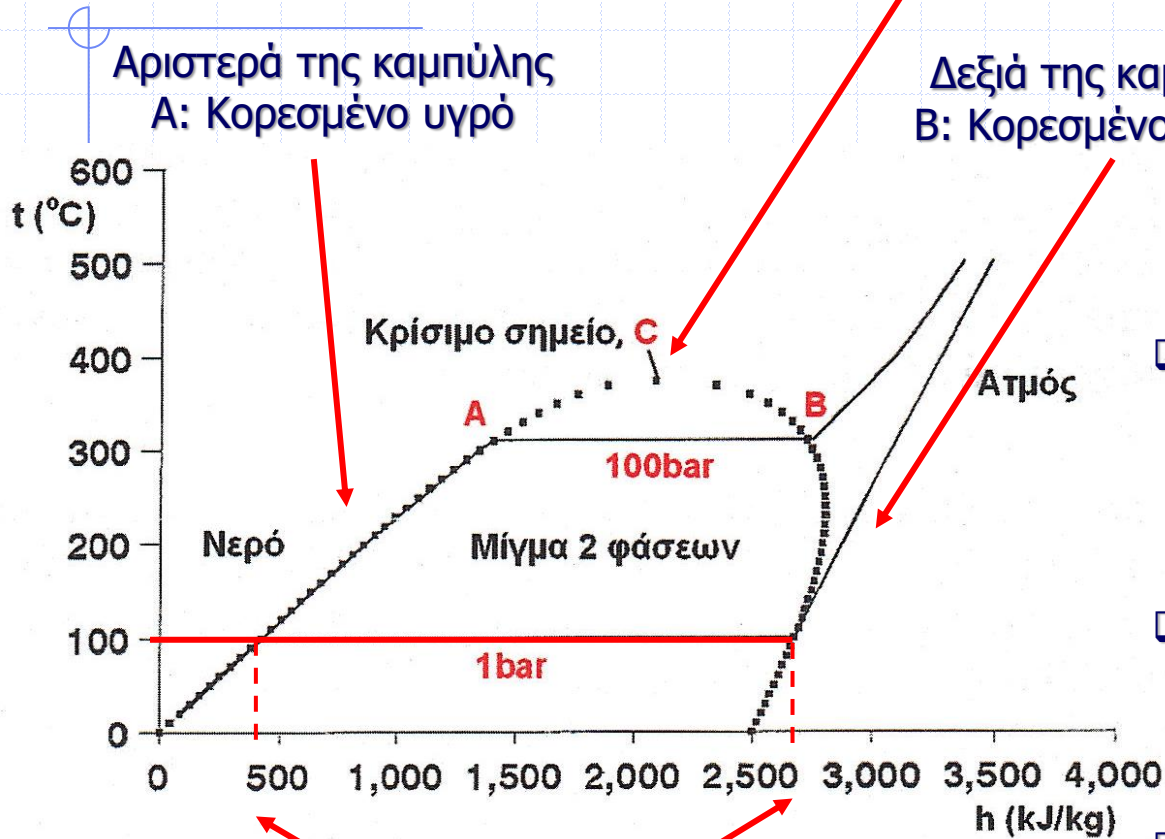
$$\Rightarrow h_{\text{mix}} = h_{\text{sat,water}} + x \cdot h_{\text{vaporization}} \Rightarrow h_{\text{mix}} = h_f + x \cdot h_{fg}$$

- ❑ Όπου  $x$  είναι η ποιότητα του ατμού [ $x = 0$  (100% υγρό),  $x = 1$  (100% ατμός)]



# Ορισμοί...

Τα τμήματα A και B τέμνονται  
στο κρίσιμο σημείο C



Αριστερά της καμπύλης  
A: Κορεσμένο υγρό

Δεξιά της καμπύλης  
B: Κορεσμένος ατμός

- ❑ Εκκινώντας από συνθήκες περιβάλλοντος (15°C και 1 bar) νερό θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση 1 bar και παραμένει υγρό μέχρι τους 100°C
- ❑ Εξατμίζεται σε μια σταθερή θερμοκρασία (100°C), ενώ ο ατμός μπορεί να υπερθερμανθεί μέχρι οποιαδήποτε θερμοκρασία
- ❑ Σε υψηλότερη πίεση (100 bar) το νερό εξατμίζεται σε υψηλότερη θερμοκρασία

Στην ίδια θερμοκρασία ο κορεσμένος ατμός έχει πολύ μεγαλύτερη ενθαλπία από το κορεσμένο υγρό



# Ορισμοί...

- ❑ Η **εντροπία** ανά μονάδα μάζας  $s$  είναι το ποσό της μικροσκοπικής αταξίας της μονάδας του υγρού ή του ατμού
- ❑ Σε μη ιδανικές συνθήκες είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και την πίεσης και είναι καταστατική ιδιότητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει όλες τις άλλες ιδιότητες του νερού ή του ατμού
- ❑ Είναι διαφορετική για την υγρή και την αέρια (ατμός) φάση στην ίδια θερμοκρασία και πίεση
- ❑ Όταν συνυπάρχουν δύο φάσεις, η ενθαλπία του μίγματος (ως γραμμική ιδιότητα) είναι το άθροισμα της εντροπίας της υγρής φάσης και της φάσης του ατμού:

**Φάση  
ατμού**

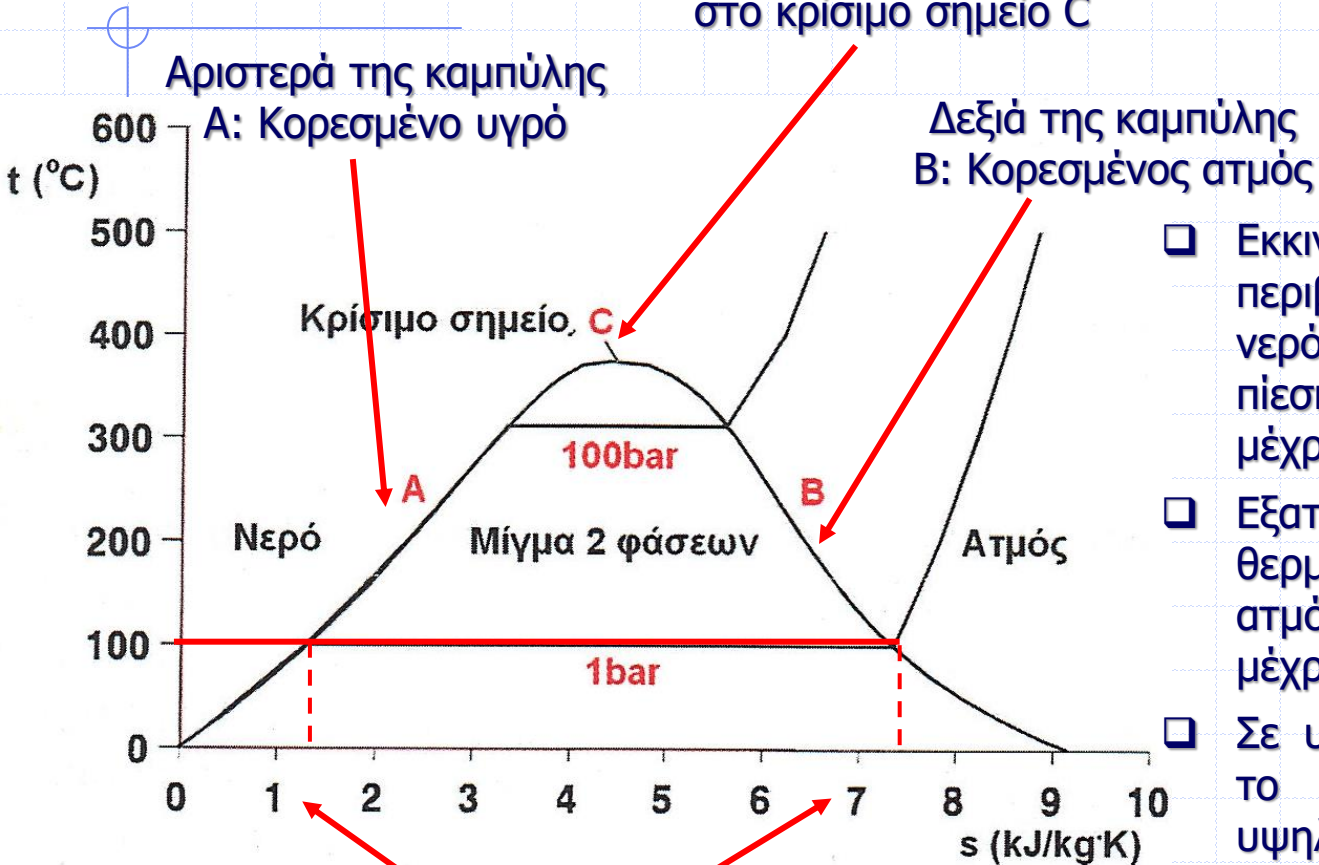
$$s_{\text{mix}} = X \cdot s_{\text{sat,steam}} + (1 - X) \cdot s_{\text{sat,water}} \Rightarrow$$

**Υγρή  
φάση**

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

# Ορισμοί...

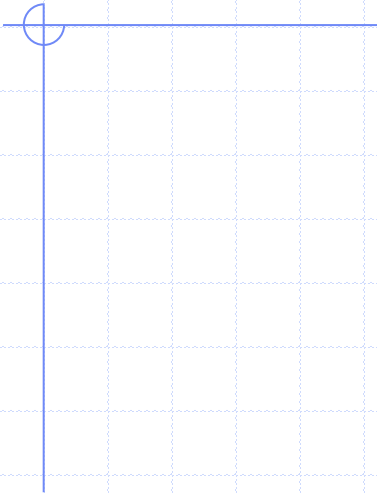
Τα τμήματα A και B τέμνονται  
στο κρίσιμο σημείο C



- ❑ Εκκινώντας από συνθήκες περιβάλλοντος (15°C και 1 bar) νερό θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση 1 bar και παραμένει υγρό μέχρι τους 100°C
- ❑ Εξατμίζεται σε μια σταθερή θερμοκρασία (100°C), ενώ ο ατμός μπορεί να υπερθερμανθεί μέχρι οποιαδήποτε θερμοκρασία
- ❑ Σε υψηλότερη πίεση (100 bar) το νερό εξατμίζεται σε υψηλότερη θερμοκρασία

Στην ίδια θερμοκρασία ο κορεσμένος ατμός έχει πολύ μεγαλύτερη εντροπία από το κορεσμένο υγρό





***Κύκλοι ισχύος με ατμό...***



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- ❑ Μελετώνται ιδανικοί κύκλοι παραγωγής ισχύος με ατμό – το ρευστό λειτουργίας εξατμίζεται και συμπυκνώνεται διαδοχικά
- ❑ Ο υδρατμός ή ατμός νερού ή ατμός (steam) αποτελεί το πλέον συνηθισμένο ρευστό λειτουργίας που χρησιμοποιείται στους κύκλους παραγωγής ισχύος
- ❑ Διαθέτει πλήθος επιθυμητών θερμοδυναμικών αλλά και διαχειριστικών χαρακτηριστικών, πχ. υψηλή διαθεσιμότητα, χαμηλό κόστος, υψηλή ενθαλπία εξάτμισης κλπ.



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

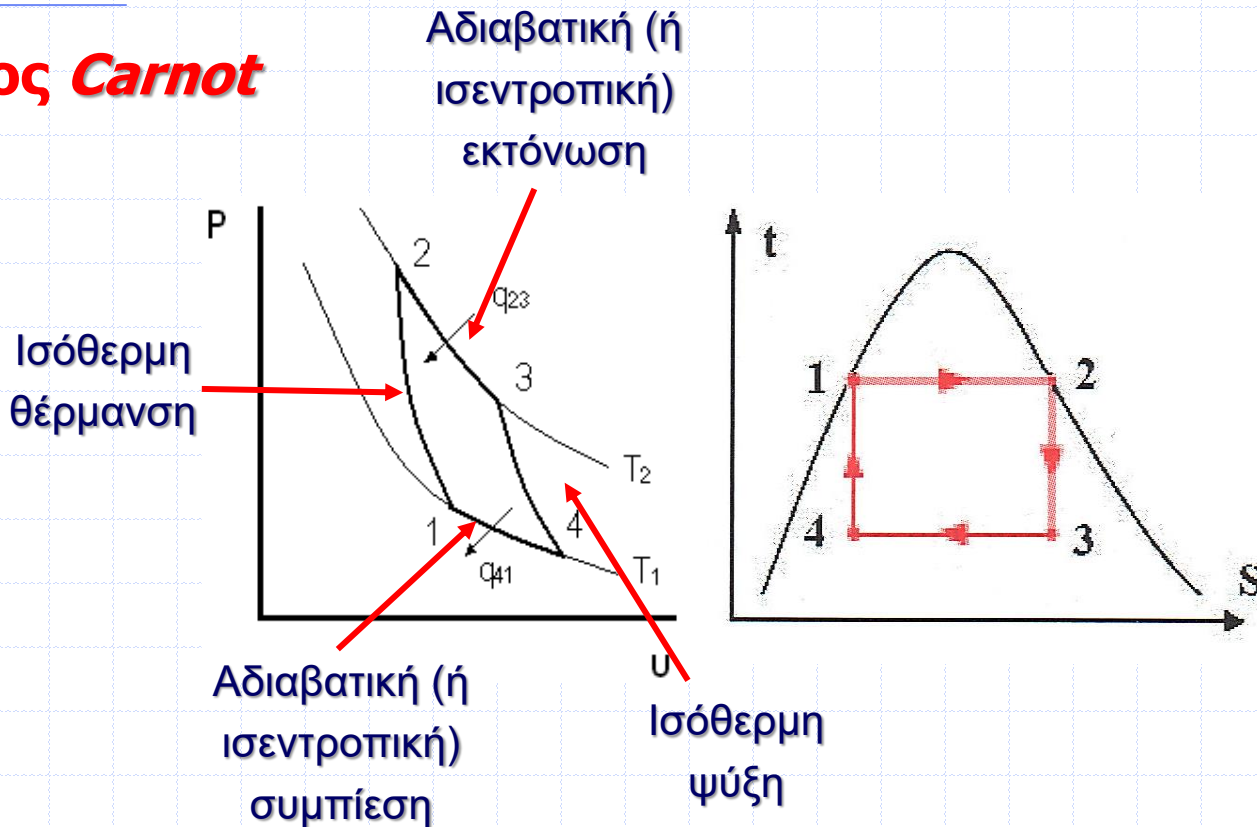
## Κύκλος *Carnot*

- ❑ Ο **κύκλος ατμού Carnot** είναι κύκλος με σταθεροποιημένη ροή (ανοιχτό σύστημα) και αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές μεταβολές – διεργασίες:
  - ✓ **Ισόθερμη θέρμανση** του νερού σε λέβητα **(1 – 2)**
  - ✓ **Ισεντροπική** (αδιαβατική) εκτόνωση σε στρόβιλο **(2 – 3)**
  - ✓ **Ισόθερμη ψύξη** (συμπύκνωση) του ατμού του μίγματος ατμού – νερού **(3 – 4)**
  - ✓ **Ισεντροπική** (αδιαβατική) συμπίεση (θέρμανση) του νερού μέσα σε συμπιεστή ως την αρχική κατάσταση **(4 – 1)**
- ❑ Όλες οι διεργασίες μεταφοράς θερμότητας πραγματοποιούνται υπό σταθερή θερμοκρασία, ενώ η παραγωγή και κατανάλωση ισχύος υπό σταθερή εντροπία



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

## Κύκλος *Carnot*



- Στον κύκλο Carnot όλες οι διαδικασίες μεταφοράς θερμότητας γίνονται υπό σταθερή θερμοκρασία, ενώ η παραγωγή και η κατανάλωση έργου υπό σταθερή εντροπία



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- Ο κύκλος Carnot παρουσιάζει τον υψηλότερο συντελεστή θερμικής απόδοσης για δεδομένη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία:

$$\eta = \left| \frac{W}{Q_H} \right| = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης  $\eta$  μιας θερμικής μηχανής Carnot

Θερμοκρασία σε Kelvin

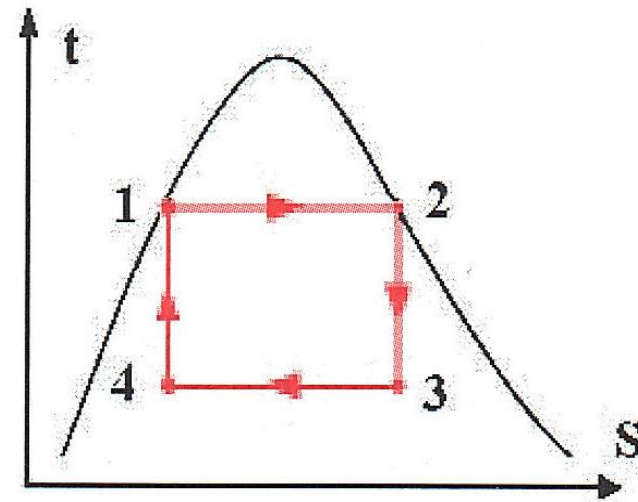
- Για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση πρέπει η ελάχιστη θερμοκρασία (θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής) να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία (θερμοκρασίας της θερμής δεξαμενής) πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

Ο κύκλος ατμού Carnot παρουσιάζει τεχνικά προβλήματα και γι' αυτό δεν χρησιμοποιείται στην πράξη:

- ❑ Οι μεταβολές 1 – 2 και 3 – 4 είναι δυνατόν να προσεγγισθούν ικανοποιητικά σε πραγματικούς λέβητες και συμπυκνωτές
- ❑ Όμως περιορίζοντας τις μεταβολές μετάδοσης θερμότητας σε διαφασικά συστήματα περιορίζεται αυστηρά η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον κύκλο (κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία του νερού ( $373,95^{\circ}\text{C}$ ))
- ❑ Ο περιορισμός της μέγιστης θερμοκρασίας περιορίζει την θερμική απόδοση του κύκλου



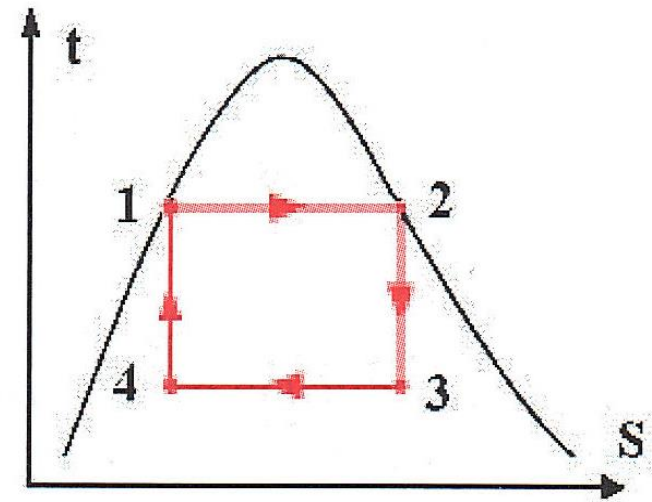
$$T_C = 373,95^{\circ}\text{C}$$
$$P_C = 217,7 \text{ atm}$$





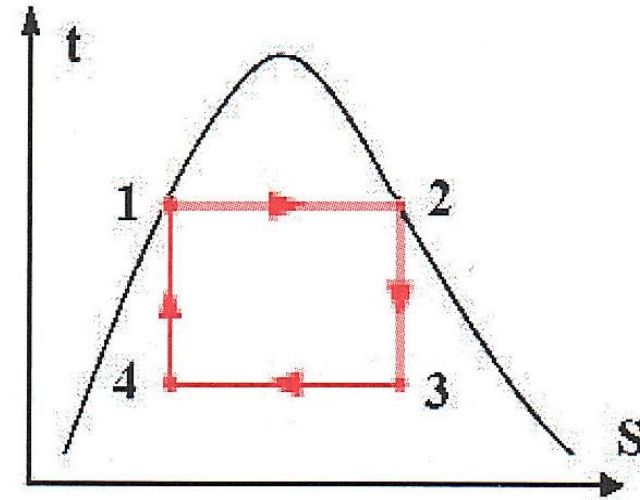
# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- ❑ Κατά την μεταβολή 2 – 3, όπως φαίνεται στο διάγραμμα η ποιότητα του ατμού μειώνεται
- ❑ Ο στρόβιλος λειτουργεί με ατμό χαμηλής ποιότητας, δηλαδή με υψηλό ποσοστό υγρασίας, που προκαλεί διάβρωση του στροβίλου
- ❑ Οι υδρατμοί με ποιότητα κάτω από ~90% δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την λειτουργία μονάδων παραγωγής ισχύος



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- ❑ Η μεταβολή ισεντροπικής συμπίεσης (4 – 1), προκαλεί συμπίεση του μίγματος υγρού – ατμού στην κατάσταση του κορεσμένου υγρού
- ❑ Η διεργασία αυτή παρουσιάζει τρία προβλήματα:
  - ✓ Δεν είναι εύκολο να ελεγχθεί με ακρίβεια το σημείο 4, δηλαδή η επιθυμητή αναλογία υγρού–ατμού καθώς δεν ελέγχεται με ακρίβεια η διεργασία συμπύκνωσης 3 – 4
  - ✓ Δεν είναι πρακτικός ο σχεδιασμός ενός συμπιεστή που να διαχειρίζεται δύο φάσεις
  - ✓ Η συμπίεση δεν γίνεται στην υγρή φάση μόνο, με συνέπεια να απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη ισχύς



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

## Κύκλος Rankine

- ❑ Ο **κύκλος Rankine** ή **κύκλος με υπερθέρμανση**, χρησιμοποιείται για να αποφευχθούν τα προβλήματα του κύκλου Carnot
- ❑ Η συμπίεση πραγματοποιείται μόνο στην υγρή φάση και συνεπώς με κατανάλωση πολύ μικρότερου ποσού ισχύος
- ❑ Η έναρξη της εκτόνωσης γίνεται με υπέρθερμο ατμό ώστε στις βαθμίδες του ατμοστροβίλου η εκτόνωση να γίνεται με ατμό υψηλής ποιότητας
- ❑ Η χρήση υπέρθερμου ατμού βελτιώνει την απόδοση του κύκλου, επειδή αυξάνει τη μέση θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η εισαγωγή θερμότητας
- ❑ Ο κύκλος ατμού Rankine χαρακτηρίζεται από την υπερθέρμανση του ατμού στον λέβητα (σημείο 3) και την πλήρη συμπύκνωση του (σημείο 1)

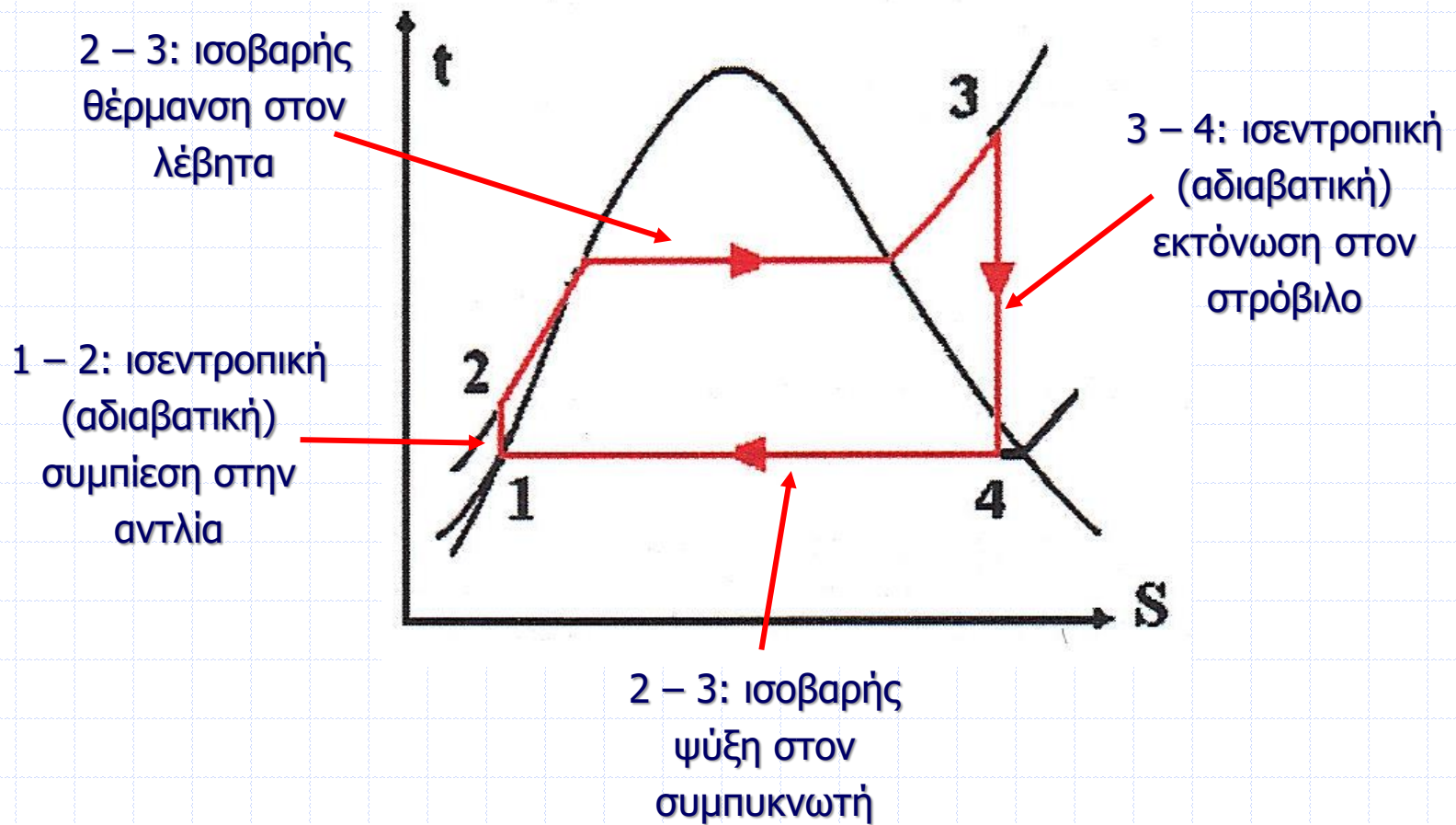


# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- ❑ Ο ιδανικός **κύκλος ατμού Rankine** αποτελείται από τέσσερις αντιστρεπτές μεταβολές – διεργασίες:
  - ✓ **1 – 2 Ισεντροπική** (αδιαβατική) συμπίεση στην αντλία
  - ✓ **2 – 3 Ισοβαρής** (σταθερή πίεση) προσθήκη θερμότητας στον λέβητα
  - ✓ **3 – 4 Ισεντροπική** (αδιαβατική) εκτόνωση σε στρόβιλο
  - ✓ **4 – 1 Ισοβαρής** (σταθερή πίεση) απόρριψη θερμότητας στο συμπυκνωτή
- ❑ Όλες οι διεργασίες μεταφοράς θερμότητας πραγματοποιούνται υπό σταθερή πίεση, ενώ η παραγωγή και κατανάλωση ισχύος υπό σταθερή εντροπία



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

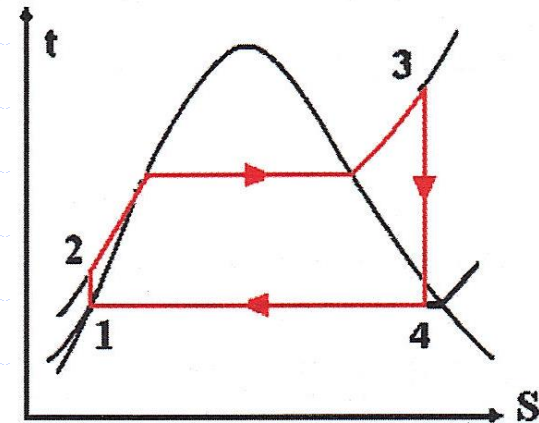


# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

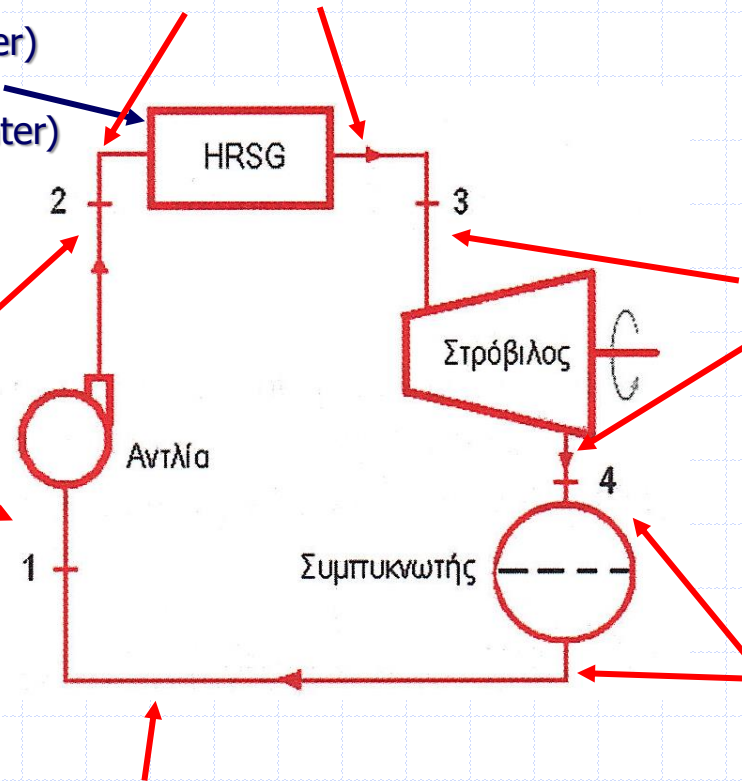
Γεννήτρια ατμού, HRSG (λέβητας) που είναι εναλλάκτης πολλαπλών σταδίων αποτελούμενος από:

- ✓ Προθερμαντήρα (economizer)
- ✓ Εξατμιστήρα (evaporator)
- ✓ Υπερθερμαντήρα (superheater)

Το κορεσμένο νερό εισέρχεται (2) στον HRSG και εξέρχεται ως υπέρθερμος ατμός (3)



Το κορεσμένο νερό εισέρχεται (1) στην αντλία και συμπιέζεται ισεντροπικά (2) στην πίεση του HRSG



Αδιαβατική (ή ισεντροπική) εκτόνωση του υπέρθερμου ατμού στον στρόβιλο, παράγοντας έργο (περιστροφή του άξονα της ηλεκτρογεννήτριας)

Μίγμα κορεσμένου υγρού – ατμού με υψηλή ποιότητα ατμού εισέρχεται στον συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνεται υπό σταθερή πίεση

Κορεσμένο υγρού



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

## Κύκλος Rankine

- Οι μεταβολές της κινητικής και δυναμικής ενέργειας του ατμού είναι συνήθως πολύ μικρές σε σχέση με τους όρους του έργου και της θερμότητας που μεταφέρονται, και θεωρούνται αμελητέες
- Τότε ισχύει η εξίσωση ενέργειας της σταθεροποιημένης ροής ανά μονάδα μάζας ατμού, χωρίς τους όρους μεταβολής της κινητικής και δυναμικής ενέργειας

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_{in} \left( h_{in} + \frac{\vec{V}_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_{out} \left( h_{out} + \frac{\vec{V}_{out}^2}{2} + gz_{out} \right)$$

- Ο ατμοπαραγωγός (HRSG) και ο συμπυκνωτής δεν παράγουν έργο, ενώ η αντλία και ο στρόβιλος λειτουργούν ισεντροπικά (αδιαβατικά)



# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- Η διατήρηση ενέργειας για κάθε συσκευή, θεωρώντας μικρές ταχύτητες και μεταβολές του ύψους, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

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

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

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

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

- Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine ορίζεται από την σχέση:

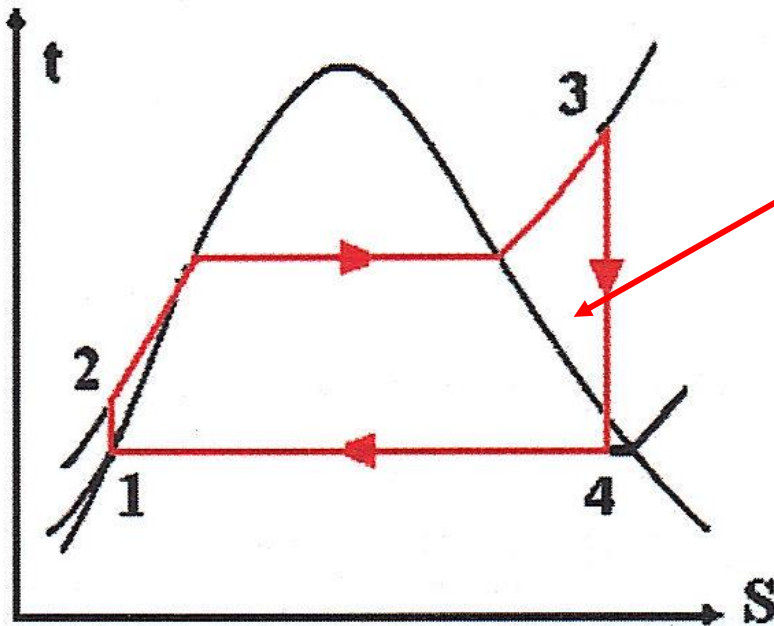
$$\eta_{\text{th}} = \frac{UW}{HI_{\text{HRSG}}} = \frac{EW_{\text{ST}} + CW_{\text{pump}}}{HI_{\text{HRSG}}} = \frac{HI_{\text{HRSG}} + HI_{\text{cond}}}{HI_{\text{HRSG}}} = 1 + \frac{HI_{\text{cond}}}{HI_{\text{HRSG}}}$$

Αρνητικές ποσότητες



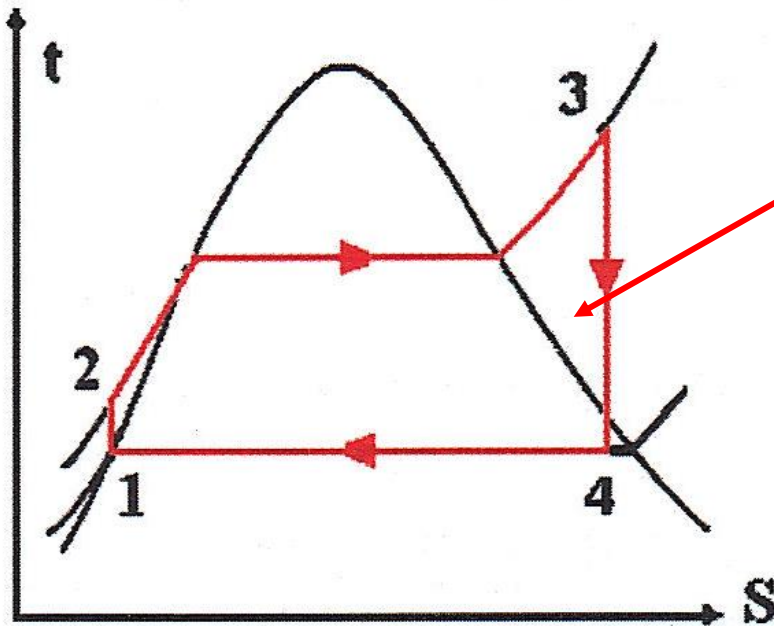


# Κύκλοι ισχύος με ατμό...



- Η θερμική απόδοση παριστάνεται γραφικά από τον λόγο της επιφάνειας που περικλείεται από τον κύκλο προς την επιφάνεια κάτω από την μεταβολή προσθήκης ενέργειας
- Εναλλακτικά από την διαφορά των μηκών 3 – 4 και 1 – 2, γιατί πρόκειται για ισεντροπικές μεταβολές και μόνο σ' αυτές παράγεται ή καταναλώνεται έργο

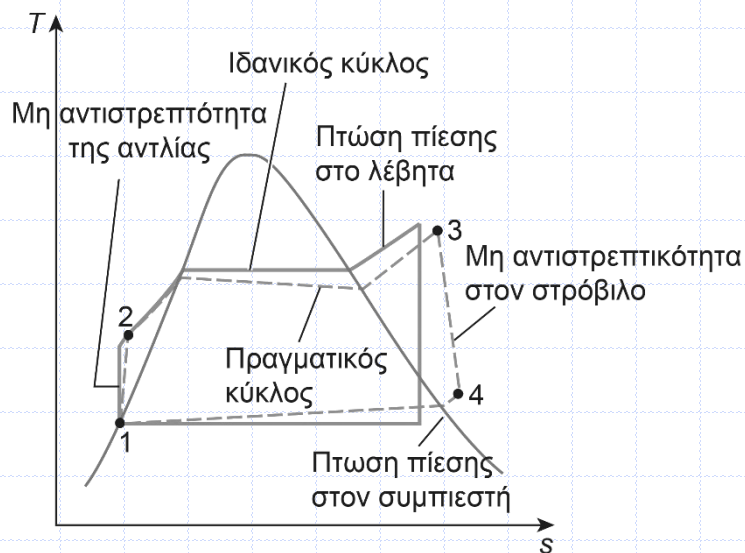
# Κύκλοι ισχύος με ατμό...



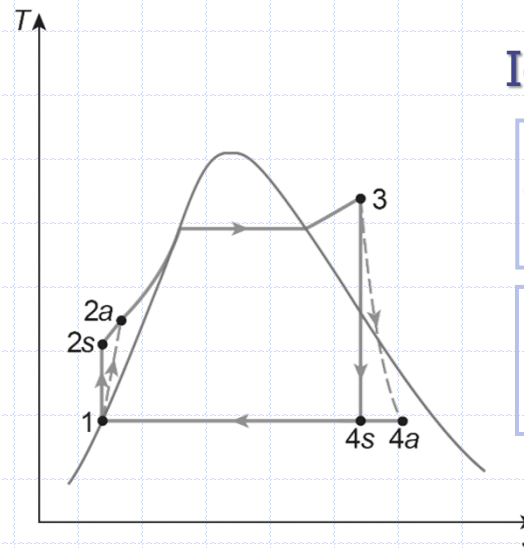
- Η θερμική απόδοση παριστάνεται γραφικά από τον λόγο της επιφάνειας που περικλείεται από τον κύκλο προς την επιφάνεια κάτω από την μεταβολή προσθήκης ενέργειας
- Εναλλακτικά από την διαφορά των μηκών 3 – 4 και 1 – 2, γιατί πρόκειται για ισεντροπικές μεταβολές και μόνο σ' αυτές παράγεται ή καταναλώνεται έργο

# Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- ❑ Ο πραγματικός κύκλος ατμού διαφέρει από τον ιδανικό κύκλο Rankine, λόγω των αναντιστρεπτοτήτων των διαφόρων στοιχείων που το αποτελούν
- ❑ Η **τριβή των ρευστών** και οι **απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον** αποτελούν δύο συνήθεις πηγές αναντιστρεπτοτήτων



Απόκλιση του πραγματικού κύκλου ατμού από τον ιδανικό κύκλο Rankine



Επίδραση των αναντιστρεπτοτήτων της αντλίας και του ατμοστρόβιλου στον ιδανικό κύκλο Rankine

Ισεντροπικές αποδόσεις

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

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

# ***Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...***



# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

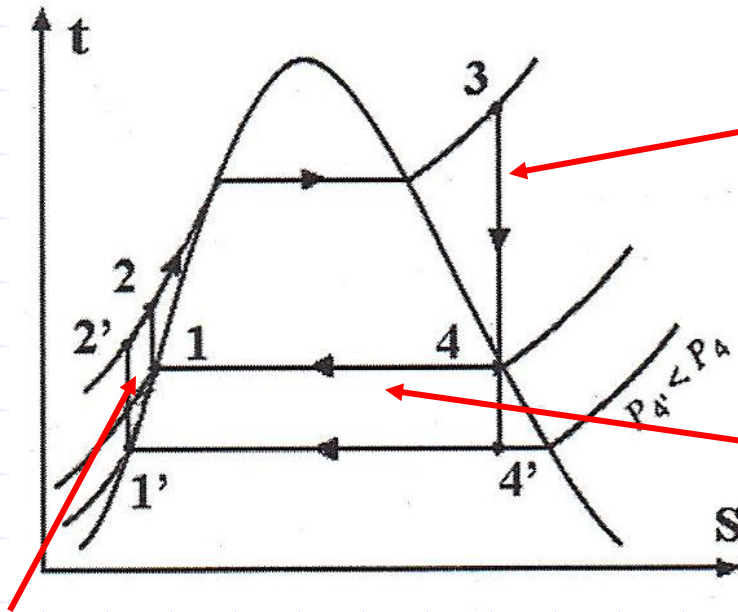
- Η συμπεριφορά του πραγματικού κύκλου Rankine παραγωγής ισχύος με ατμό, διαφέρει από αυτή του ιδανικού κύκλου, εξαιτίας των αναντιστρεπτοτήτων που εμφανίζονται στις διάφορες συσκευές, όπως:
  - ✓ Η τριβή του ρευστού
  - ✓ Οι ανεπιθύμητες απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον
- Οι τροποποιήσεις του κύκλου Rankine στοχεύουν
  - ✓ Στην αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου, μέσω της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας μεταφοράς θερμότητας από τον ατμοπαραγωγό (HRSG) στο εργαζόμενο μέσο
  - ✓ Την μείωση της μέσης θερμοκρασίας, στην απόρριψη θερμότητας από το εργαζόμενο μέσο στον συμπυκνωτή
- Η βασική ιδέα πίσω από κάθε τροποποίηση για την αύξηση της θερμικής απόδοσης ενός κύκλου ισχύος είναι η ίδια: *αύξηση της μέσης θερμοκρασίας πρόσδοσης θερμότητας στο λέβητα, ή μείωση της μέσης θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας στο συμπυκνωτή*



# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

□ Πρακτικά υπάρχουν έξι (6) τρόποι για την επίτευξη των ανωτέρω, σε απλό ιδανικό κύκλο Rankine

## □ Μείωση της πίεσης του συμπυκνωτή



□ Στην θερμοκρασία κορεσμού, στην πίεση του συμπυκνωτή, ο υδρατμός είναι κορεσμένο μίγμα

□ Μειώνοντας την πίεση του συμπυκνωτή, μειώνεται και η θερμοκρασία του υδρατμού, και, άρα και η θερμοκρασία στην οποία γίνεται απόρριψη θερμότητας

Η περιοχή (1'2'2144'1') παριστάνει την αύξηση του ωφέλιμου έργου εξόδου, λόγω της μείωσης της πίεσης του συμπυκνωτή (από  $P_4$  σε  $P'_4$ )

Η απαιτούμενη προσθήκη θερμότητας (περιοχή 1'2'211') είναι πολύ μικρή

Αποτέλεσμα της μείωσης της πίεσης του συμπυκνωτή είναι η αύξηση της θερμικής απόδοσης του κύκλου



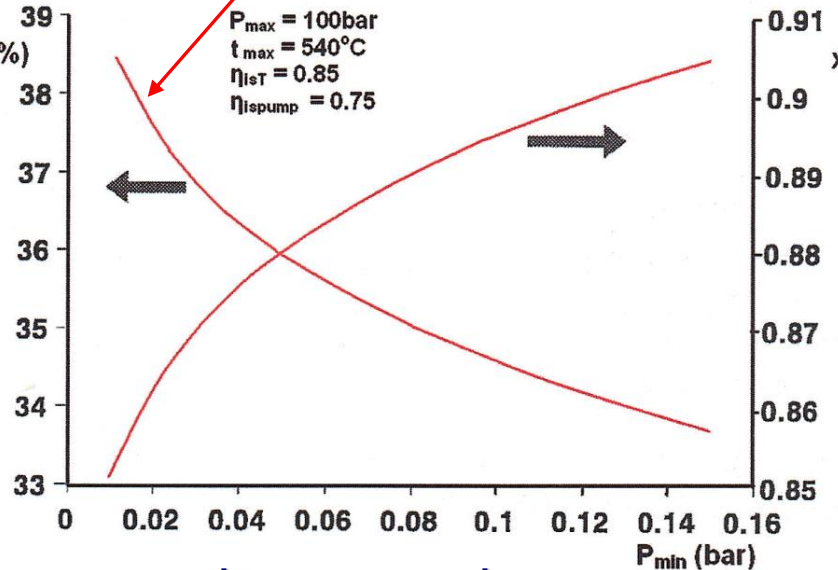
# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

Η καμπύλη είναι υπερβολή

- Μειώνοντας την πίεση του συμπυκνωτή, μειώνεται η θερμοκρασία του συμπυκνωτή, οπότε αυξάνεται η απόδοση του κύκλου ατμού

- Η παράμετρος αυτή συνδέεται με τις συνθήκες του περιβάλλοντος

- Η πίεση του ατμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη διαθεσιμότητα του μέσου ψύξης και την επιλεγμένη τεχνολογία ψύξης



- Δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα συστήματα ψύξης των κύκλων ατμού
- Σε χαμηλές πιέσεις, η απόδοση του κύκλου και η ποιότητα του απορριπτόμενου ατμού είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην μείωση της πίεσης

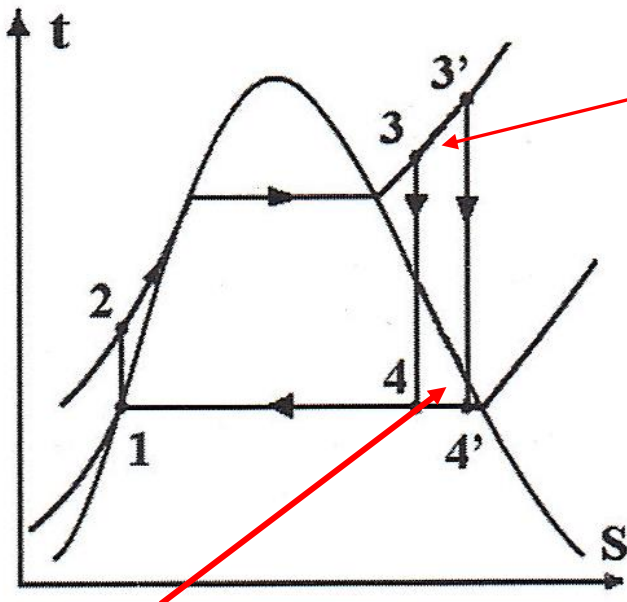
Επίδραση της μείωσης της πίεσης του συμπυκνωτή στην απόδοση του κύκλου

- Οι συμπυκνωτές λειτουργούν αρκετά κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση, με όριο τα 0,05 bar
- Πιθανά προβλήματα (α) εισροή αέρα και (β) αύξηση της υγρασίας στις τελευταίες βαθμίδες του στροβίλου
- Στην πράξη, οι πιέσεις των συμπυκνωτών κυμαίνονται από 0,035 bar, με την άμεση ψύξη στις Σκανδιναβικές χώρες, μέχρι 0,120 bar, με ξηρά ψύξη στις θερμές χώρες



# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

## □ Υψηλότερη θερμοκρασία υπερθέρμανσης του ατμού



Η περιοχή (343'4'43) παριστάνει την αύξηση του ωφέλιμου έργου εξόδου, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του ατμοπαραγωγού (από  $T_3$  σε  $T'_3$ )

- Με την αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης (από το 3 στο 3') αυξάνεται η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας στον κύκλο, οπότε αυξάνει η απόδοση του κύκλου
- Η θερμοκρασία υπερθέρμανσης παίζει τον ίδιο ρόλο με τη θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο (TET) του αεριοστρόβιλου
- Χωρίς να αυξηθεί η πίεση στον ατμοπαραγωγό (HRSG) είναι δυνατόν να αυξηθεί η θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας στον ατμό
- Η συνολική περιοχή κάτω από την καμπύλη 3-3' μέχρι τον άξονα S, παριστάνει την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου

□ Αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης είναι η αύξηση της θερμικής απόδοσης του κύκλου

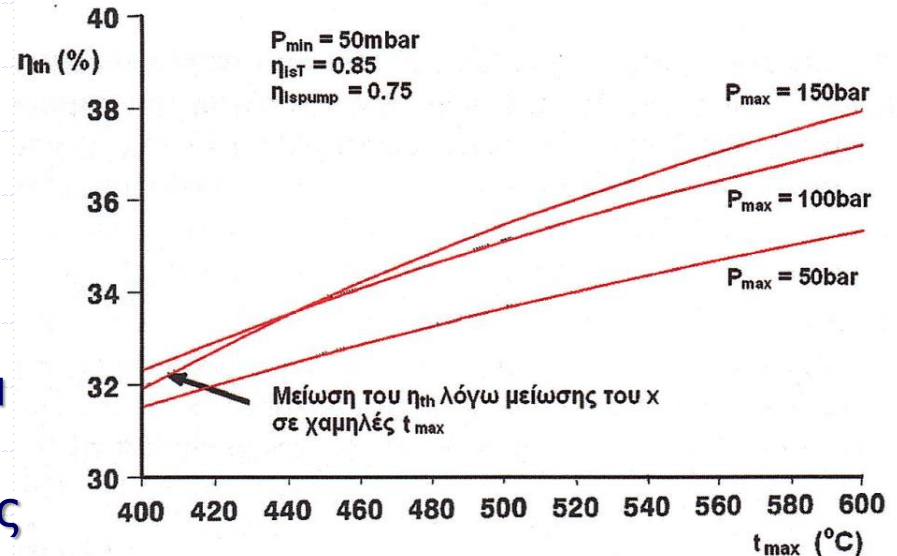
□ Επιπλέον μειώνεται η υγρασία του ατμού





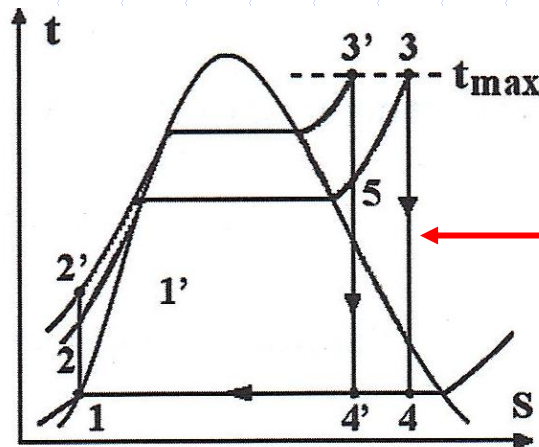
# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- Ιδανικά, η θερμοκρασία υπερθέρμανσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη
- Τα τελευταία 30 χρόνια η θερμοκρασία περιορίζεται στους  $\sim 540^{\circ}\text{C}$  ( $1.100^{\circ}\text{F}$ ), που είναι ένα κοινό όριο ερπυσμού για τους φερριτικούς χάλυβες για χρόνους των  $\sim 100.000$  h (30 – 40 έτη)
- Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες υπερθέρμανσης πρέπει να χρησιμοποιούνται ωστενιτικοί χάλυβες ή χάλυβες με υψηλό περιεχόμενο σε Ni–Cr–Mo–Mn, ή μη σιδηρούχα κράματα

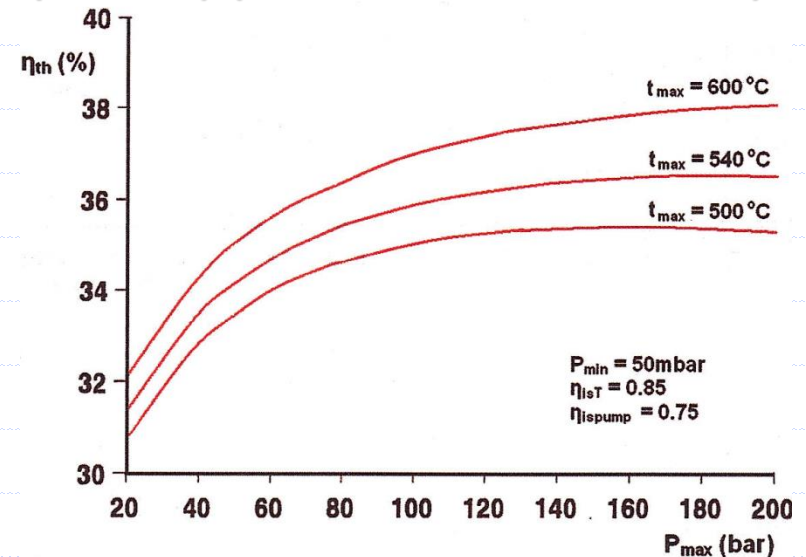


# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- ❑ **Αύξηση της πίεσης του ατμοπαραγωγού (HRSG)**
- ❑ Η αύξηση της πίεσης οδηγεί πάντα σε αύξηση της απόδοσης του κύκλου, καθώς αυξάνει την θερμοκρασία κορεσμού, οπότε αυξάνει η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας στον ατμοπαραγωγό
- ❑ Είναι δύσκολο να ελεγχθούν κύκλοι ατμού με πιέσεις με πιέσεις πάνω από 170 – 180 bar, επειδή όσο προσεγγίζεται το κρίσιμο σημείο είναι δύσκολη η διάκριση μεταξύ του υγρού και του ατμού
- ❑ Η χρήση ή όχι υπερ-κρίσιμων συνθηκών εξαρτάται από το κόστος κατασκευής και συντήρησης



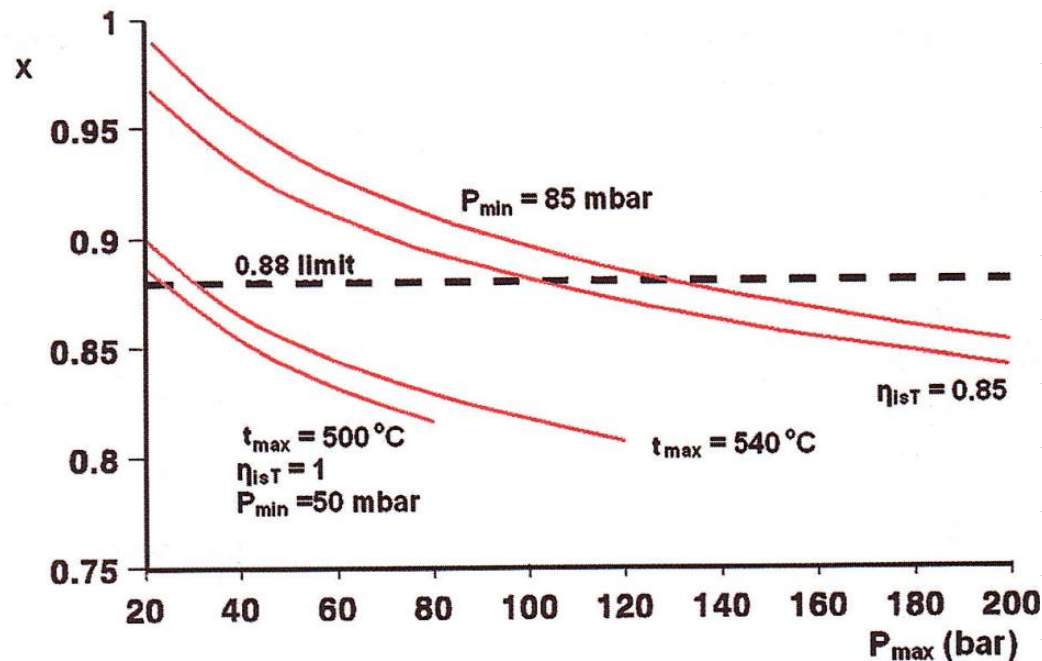
Η μείωση της θερμοκρασίας στον ατμοστρόβιλο μετατοπίζει τον κύκλο προς τα αριστερά και αυξάνεται η υγρασία στην έξοδο του στροβίλου (απαιτείται αναθέρμανση ατμού)



# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

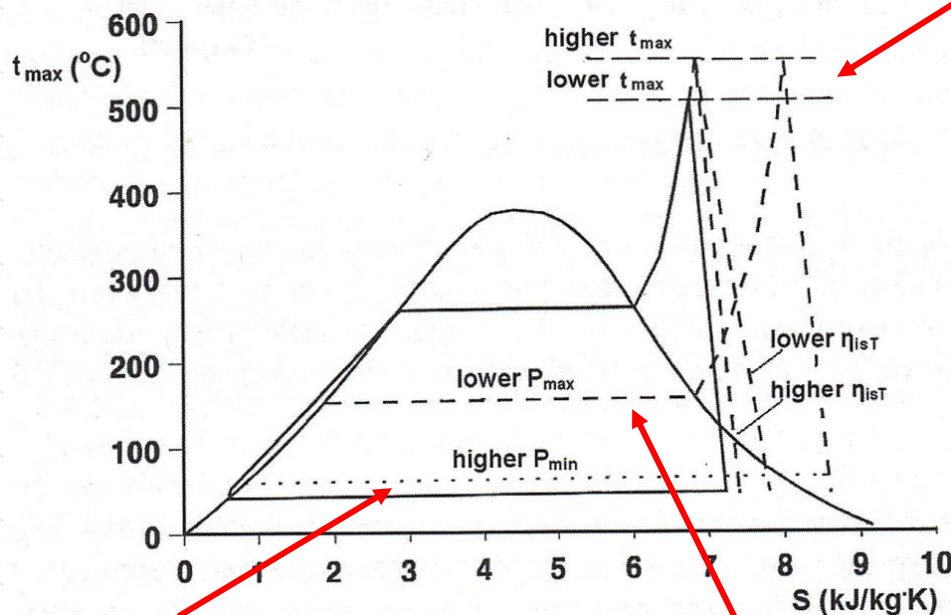
## □ Αναθέμανση

- Η ποιότητα του ατμού στην έξοδο του ατμοστροβίλου είναι πολύ σημαντική, γιατί η υψηλή υγρασία προκαλεί διάβρωση και, επιπλέον, το κλάσμα της ροής που είναι σε υγρή φάση δεν παράγει έργο, καθώς διέρχεται από τον ατμοστροβίλο
- Συνήθως, το ποσοστό της υγρασίας στην μάζα του ατμού περιορίζεται σε 12% ή 15%, που αντιστοιχεί σε ποιότητα ατμού από  $x = 0,85$  ως  $x = 0,88$



# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- Ενέργειες βελτίωσης της ποιότητας του ατμού στην έξοδο του ατμοστροβίλου



Αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης, (απαιτούνται ανθεκτικά υλικά)

Μείωση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του ατμοστροβίλου, (δεν ενδείκνυται γιατί η ισχύς του ατμοστροβίλου είναι ευθέως ανάλογη με την ισεντροπική απόδοση)

Αύξηση της πίεσης του συμπυκνωτή, (όμως μειώνεται η απόδοση του κύκλου)

Μείωση της μέγιστης πίεσης του κύκλου, (όμως μειώνεται η απόδοση του κύκλου)

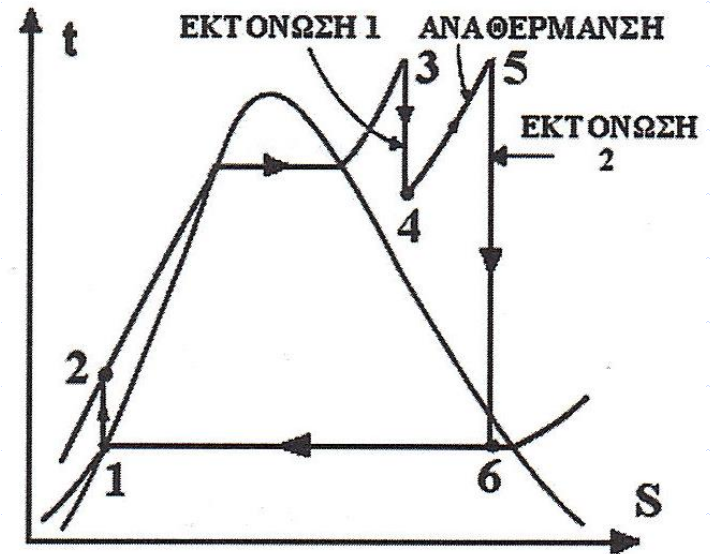


# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- Το πρόβλημα της ποιότητας του ατμού αντιμετωπίζεται με εκτόνωση του ατμού σε δύο στάδια, και ενδιάμεση αναθέρμανση
- Για έναν κύκλο με αναθέρμανση, η συνολική προσθήκη θερμότητας και το συνολικό έργο εξόδου των στροβίλων είναι:

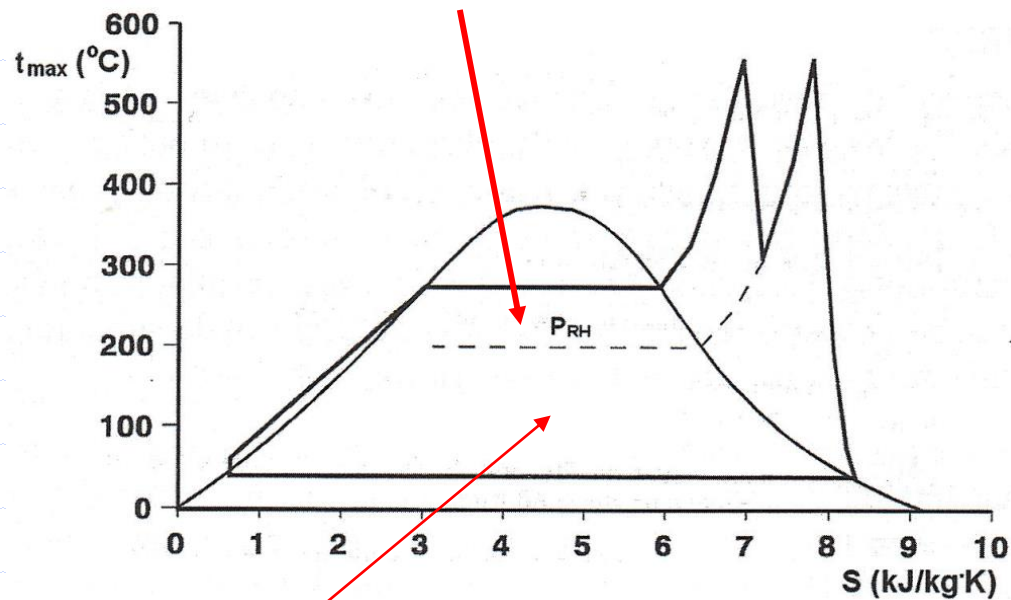
$$HI_{HRSG} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

$$EW_{ST} = - [(h_4 - h_3) + (h_6 - h_5)]$$



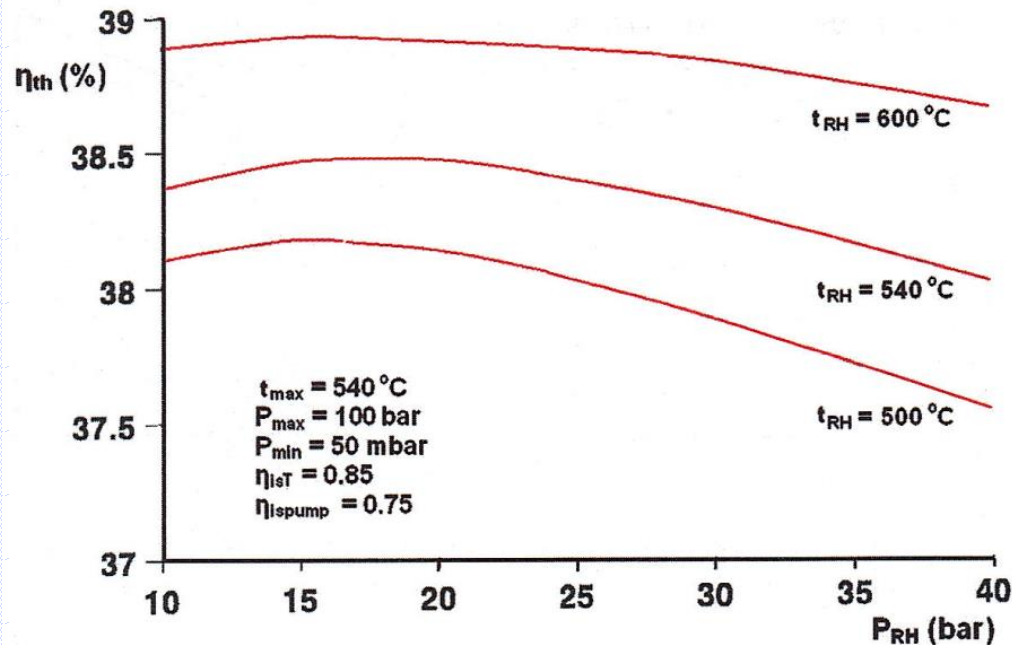
# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- Στον κύκλο με αναθέρμανση, ο ατμός εκτονώνεται σε μια ενδιάμεση πίεση, την **πίεση αναθέρμανσης  $P_{RH}$**  και έπειτα επιστρέφει στον HRSG πριν εκτονωθεί μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή



- Η αναθέρμανση αυξάνει:
  - ✓ Το ωφέλιμο έργο  $UW$  (το εμβαδόν του κύκλου στο διάγραμμα T-S)
  - ✓ Την μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας
  - ✓ Την ποιότητα του ατμού

# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

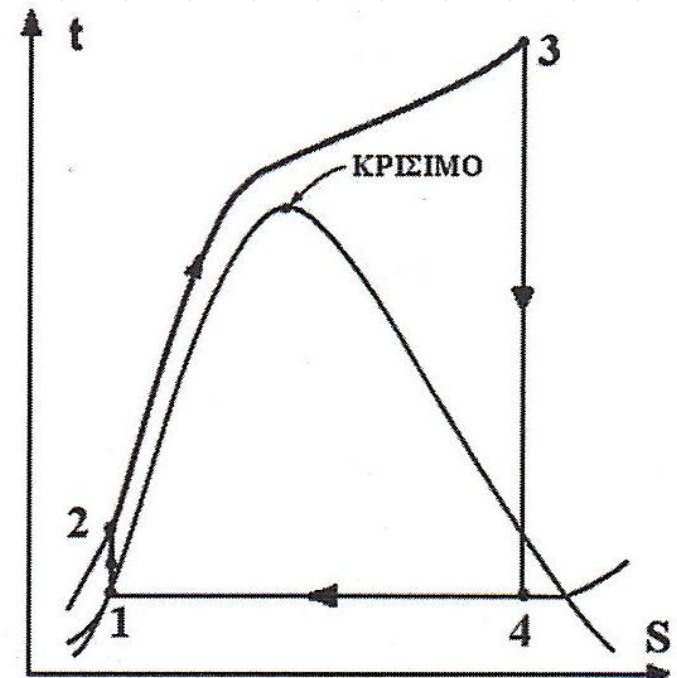


- Η επίδραση της θερμοκρασίας αναθέρμανσης είναι ίδια με εκείνη της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης (χρησιμοποιούνται υλικά ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες)
- Η απόδοση του κύκλου παρουσιάζει μέγιστο, για δεδομένη θερμοκρασία αναθέρμανσης (συνήθως 20 – 25% της μέγιστης πίεσης κύκλου)

# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

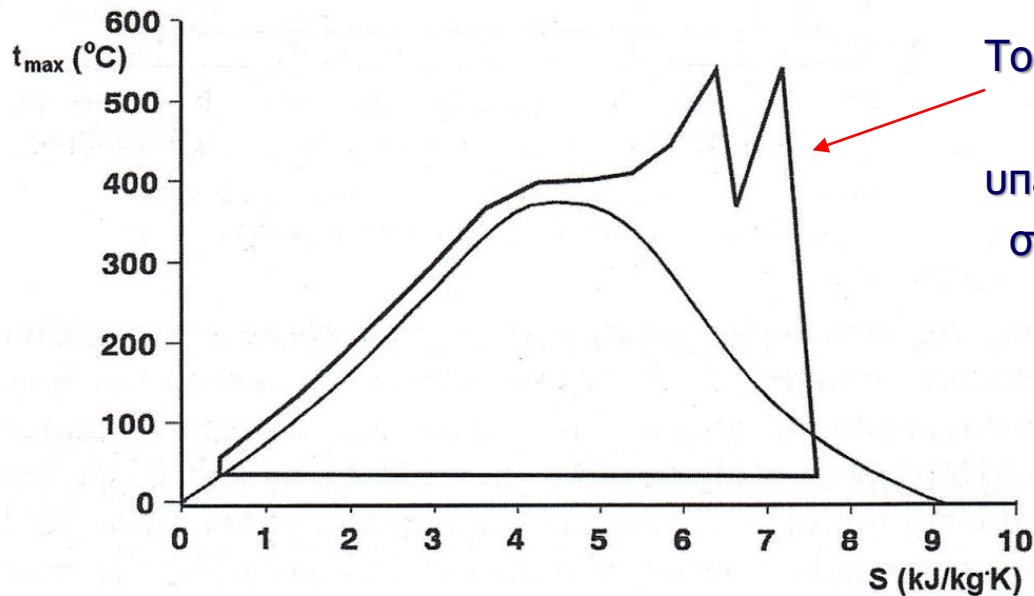
## □ Υπερκρίσιμη HRSG

- Εναλλακτική δυνατότητα είναι η λειτουργία με υδρατμό σε υπερκρίσιμες πιέσεις ( $P > 30\text{MPa}$ )
- Με την χρήση της αναθέρμανσης είναι δυνατόν να αυξηθεί η πίεση του κύκλου σε υπερκρίσιμες συνθήκες ατμού ( $> 220\text{ bar}$ ) χωρίς κανένα πρόβλημα ποιότητας ατμού στην έξοδο
- Η απόδοση των υπερκρίσιμων κύκλων είναι 2% - 3% υψηλότερη από τους αντίστοιχους υποκρίσιμους





# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

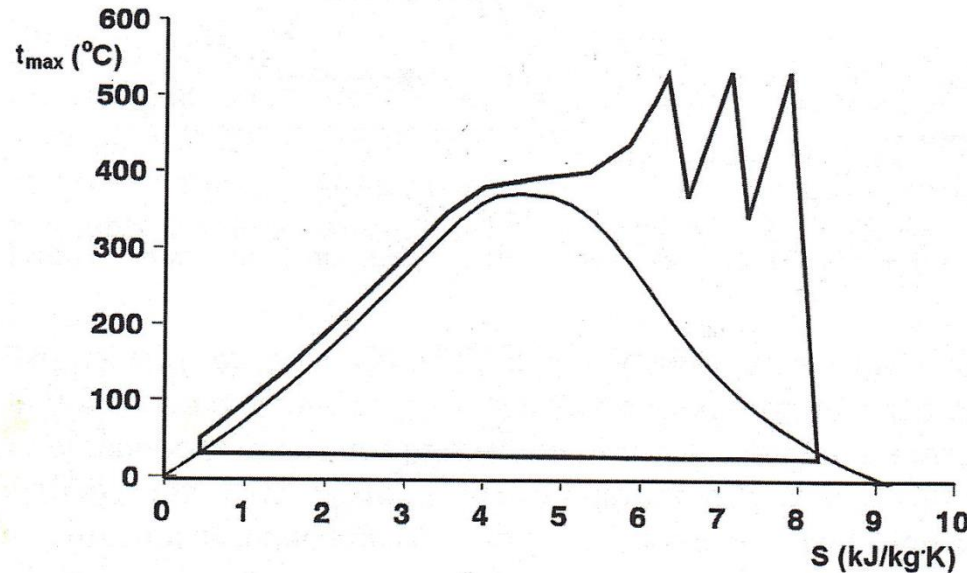


Το υπερκρίσιμο ρευστό θερμαίνεται μέχρι την θερμοκρασία υπερθέρμανσης, χωρίς να υπόκειται σε οποιαδήποτε απότομη αλλαγή φάσης

- ❑ Η HRSG που χρησιμοποιείται σε ένα τέτοιο κύκλο, λόγω της απουσίας μιας καθορισμένης με σαφήνεια αλλαγής φάσης μεταξύ υγρού – ατμού, δεν έχει τύμπανο (drum) και ονομάζεται μιας διέλευσης HRSG (once through HRSG), που σημαίνει ότι το ρευστό απλά ρέει σε αυλούς από την είσοδο προς την έξοδο
- ❑ Η τεχνολογία απλής αναθέρμανσης βελτιώνει την απόδοση του κύκλου κατά 4% – 5%



# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...



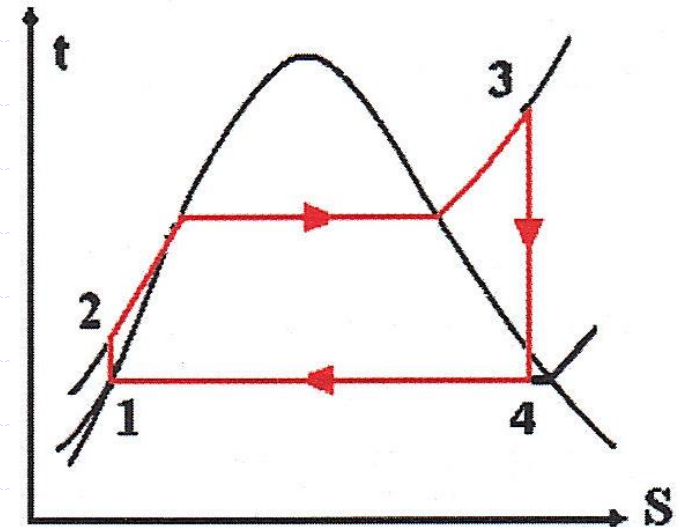
- ❑ Κρίνεται σκόπιμη η χρήση μέχρι δύο σταδίων αναθέρμανσης (διπλή αναθέρμανση)
- ❑ Η δεύτερη αναθέρμανση είναι υποδεέστερη ως προς την πρώτη, αναφορικά με την απόδοση, την ποιότητα ατμού και του ειδικού όγκου
- ❑ Η επιλογή διπλής αναθέρμανσης είναι οικονομικά βιώσιμη μόνο σε σταθμούς παραγωγής φορτίων βάσης
- ❑ Περισσότερα των δύο σταδίων θα αύξαναν υπερβολικά το κόστος



# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

## □ Αναγέννηση (προθέρμανση)

- Κατά την διάρκεια της μεταβολής 2 – 3 στο τμήμα που βρίσκεται στην περιοχή του κορεσμένου νερού, η θερμότητα προστίθεται στο μέσο λειτουργίας σε σχετική χαμηλή θερμοκρασία, γεγονός που προκαλεί μείωση της μέσης θερμοκρασίας στην οποία προστίθεται θερμότητα και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται
- Συνεπώς, πρέπει να αυξηθεί η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας που εγκαταλείπει την αντλία, πριν εισέλθει στην HRSG (αναγέννηση)
- Μια πρακτική διεργασία αναγέννησης, σε μονάδες παραγωγής ισχύος με ατμό, επιτυγχάνεται αφαιρώντας ατμό από το στρόβιλο από διαφορετικά σημεία (απομάστευση), για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας



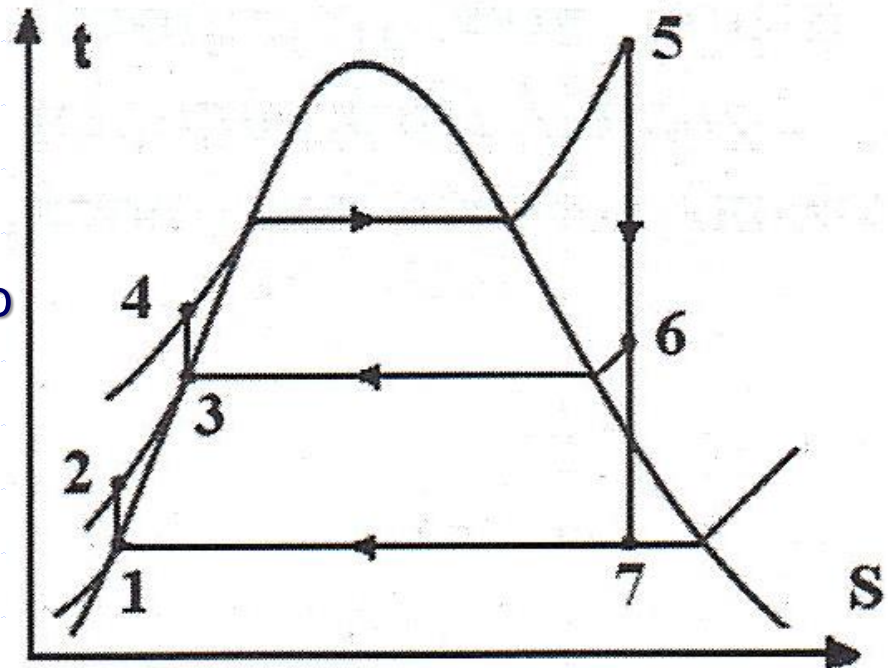
# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- ❑ Η αναγέννηση βελτιώνει τόσο την απόδοση, και επιπλέον:
  - ✓ Παρέχει ικανοποιητικά μέσα εξαέρωσης του νερού τροφοδοσίας (απομάκρυνση του αέρα) για να αποφευχθεί η διάβρωση
  - ✓ Βοηθά στον έλεγχο της μεγάλης ογκομετρικής παροχής του ατμού στα τελικά στάδια (βαθμίδες) του ατμοστροβίλου
  
- ❑ Ο θερμαντήρας του νερού τροφοδοσίας είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας με την βοήθεια του οποίου η θερμότητα μεταφέρεται από τον ατμό στο νερό τροφοδοσίας είτε αναμιγνύοντας τα ρεύματα ροής των δύο ρευστών (ανοιχτοί θερμαντήρες) είτε χωρίς ανάμιξη (κλειστοί θερμαντήρες)



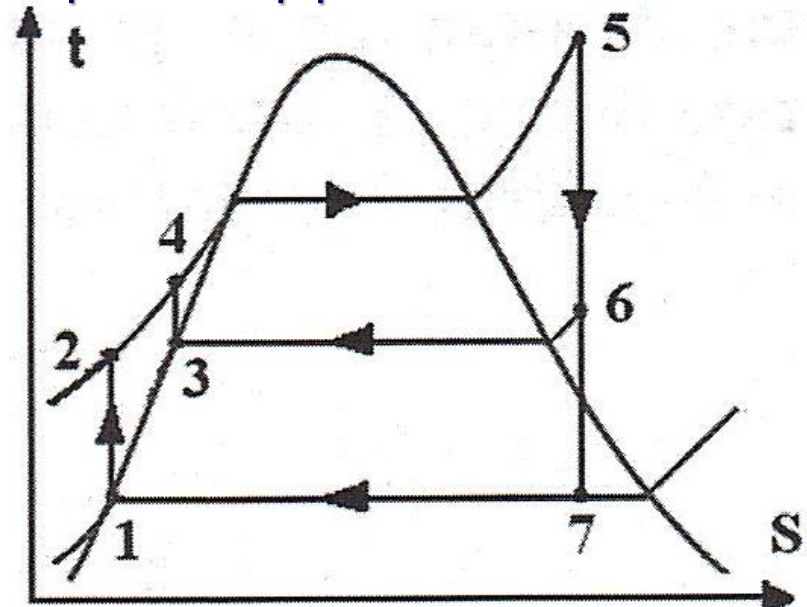
# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- ❑ Ο ανοιχτός θερμοανταλλάκτης του νερού τροφοδοσίας αποτελείται από ένα θάλαμο ανάμιξης στον οποίο ο ατμός που εξάγεται (απομαστεύεται) από το στρόβιλο αναμιγνύεται με το νερό τροφοδοσίας που εξέρχεται από την αντλία
- ❑ Στην ιδανική περίπτωση το μίγμα εγκαταλείπει τον θερμοανταλλάκτη ως κορεσμένο υγρό στην πίεση του θερμοανταλλάκτη
- ❑ Οι ανοιχτοί θερμοανταλλάκτες είναι απλοί, φθηνοί και παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας, και φέρνουν το νερό τροφοδοσίας στην κατάσταση κορεσμού



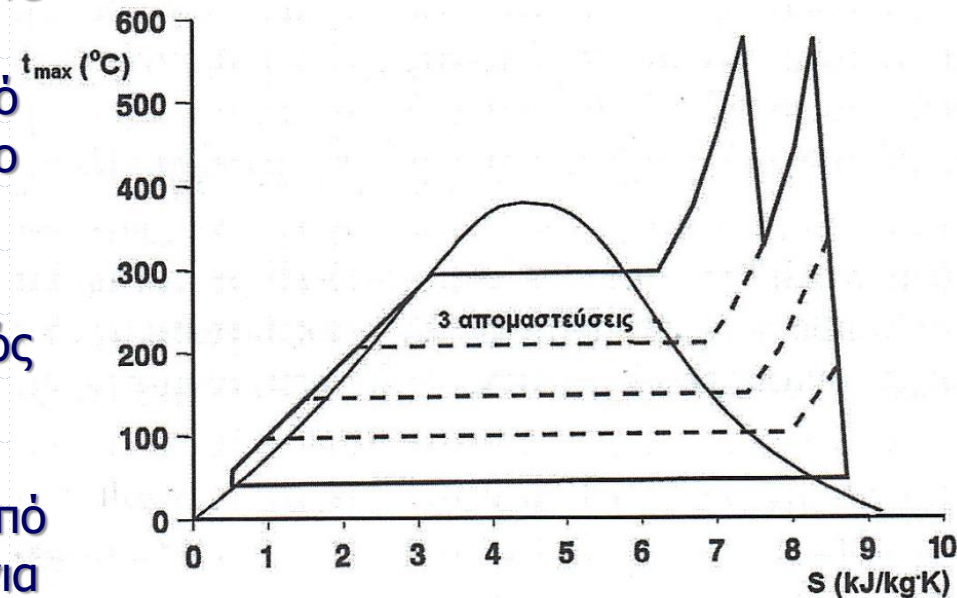
# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- ❑ Στον κλειστό θερμοαντήρα η θερμότητα μεταφέρεται από τον ατμό που εξέρχεται στο τον στρόβιλο στο νερό τροφοδοσίας, χωρίς να λαμβάνει χώρα ανάμιξη
- ❑ Στην περίπτωση αυτή τα δύο ρεύματα μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές πιέσεις
- ❑ Οι κλειστοί θερμοαντήρες είναι περισσότερο πολύπλοκοι, εξαιτίας του εσωτερικού δικτύου σωληνώσεων και άρα πιο ακριβοί
- ❑ Η μεταφορά θερμότητας είναι λιγότερο αποτελεσματική, καθώς τα ρεύματα δεν έρχονται σε επαφή
- ❑ Δεν απαιτούν ο καθένας ξεχωριστή αντλία και μπορούν να βρίσκονται σε διαφορετικές πιέσεις
- ❑ Η κύρια αιτία της αναντιστρεπτότητας (και άρα η μείωση της απόδοσης) βρίσκεται στην θέρμανση του νερού μέχρι την θερμοκρασία κορεσμού



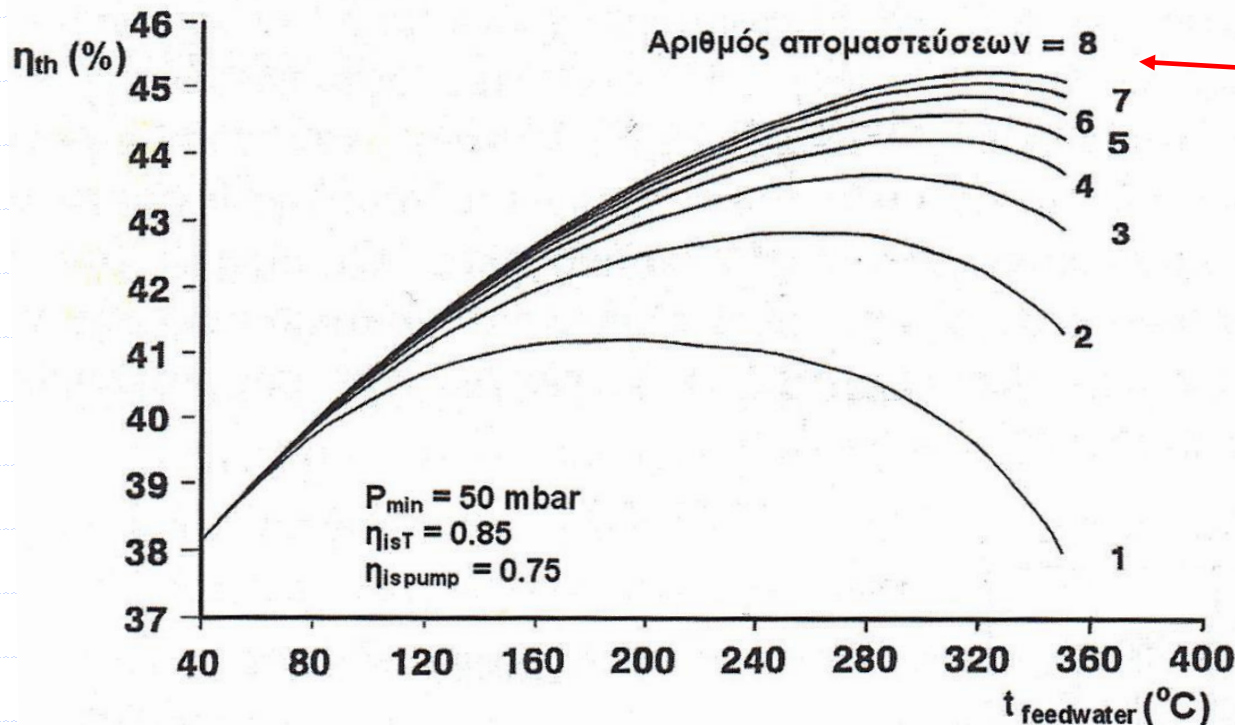
# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- Η αναγέννηση είναι μια διαδικασία με την οποία η θέρμανση του νερού μέχρι τη θερμοκρασία κορεσμού γίνεται εσωτερικά στον κύκλο, με τη βοήθεια απομάστευσης ατμού από τον ατμοστρόβιλο
- Κάθε μια από τις απομαστεύσεις είτε αναμιγνύεται με το νερό, είτε ανταλλάσσει θερμότητα με το νερό ώστε να θερμανθεί μέχρι το σημείο κορεσμού, χωρίς την προσθήκη εξωτερικής θερμότητας
- Προφανώς υπάρχει λιγότερος ατμός διαθέσιμος για τα στάδια χαμηλής πίεσης (LP) του ατμοστροβίλου, όμως η απώλεια αντισταθμίζεται από την εξοικονόμηση των καυσίμων για τη θέρμανση του νερού
- Το καθαρό αποτέλεσμα είναι η αύξηση του βαθμού απόδοσης πολλών εκατοστιαίων μονάδων



# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- Στην πράξη, ο αριθμός των απομαστεύσεων στους συμβατικούς κύκλους ατμού είναι 6 ως 8
- Στους υπερκρίσιμους κύκλους υψηλής απόδοσης μπορεί να φθάσει μέχρι 10, ώστε το νερό να προθερμαίνεται στους 300°C, πριν εισέλθει στην HRSG



Η αύξηση του αριθμού απομαστεύσεων αυξάνει την απόδοση του κύκλου





# Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- Η αναγέννηση οδηγεί σε:
  - ✓ Αύξηση της απόδοσης του κύκλου
  - ✓ Μείωση του ειδικού όγκου (μικρότερη ωφέλιμη ισχύς που παράγεται ανά kg της εισόδου του ατμοστροβίλου)
  - ✓ Μείωση του φορτίου του συμπυκνωτή (δεν πηγαίνει όλος ο ατμός στον συμπυκνωτή)
  
- Η απομάστευση ατμού και η αναγέννηση χρησιμοποιούνται μόνο σε εγκαταστάσεις απλών εργοστασίων ατμοπαραγωγής



***Ανάλυση κύκλων ατμού  
με βάση το 2<sup>ο</sup>  
Θερμοδυναμικό αξίωμα...***



# Ανάλυση κύκλων ατμού με βάση το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό αξίωμα...

Καταστροφή της εξέργειας υπό σταθεροποιημένη ροή

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

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

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

$$x_{\text{dest}} = T_0 \left( \frac{q_{\text{out}}}{T_L} - \frac{q_{\text{in}}}{T_H} \right) \quad (\text{kJ/kg}) \quad \text{Καταστροφή εξέργειας σε κύκλο μεταξύ δύο θερμοδοχείων}$$

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

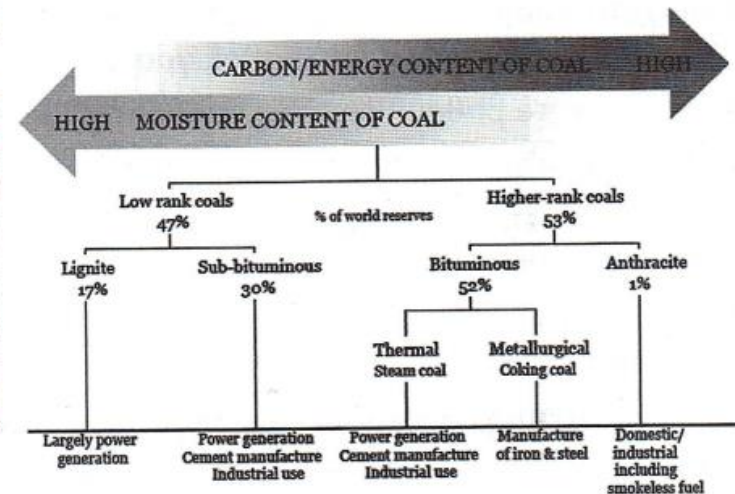
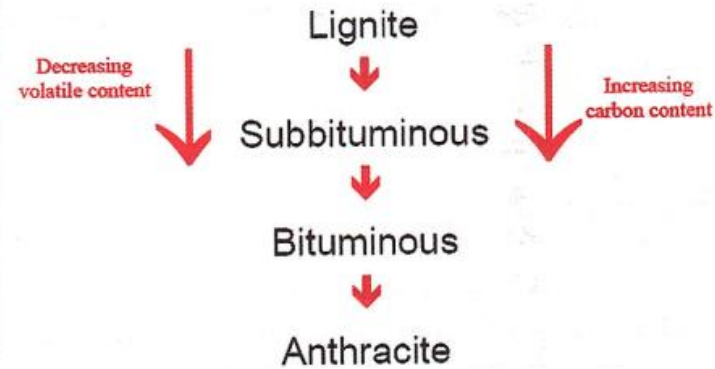
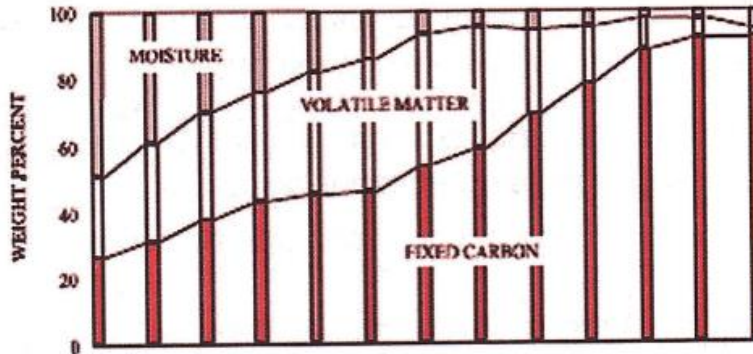
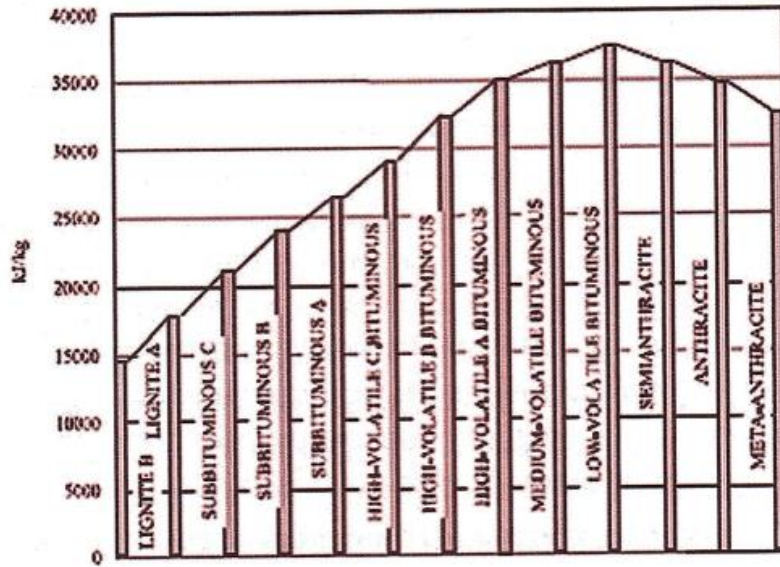
Η ανάλυση ενός κύκλου ατμού βάσει του 2<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού αξιώματος αποκαλύπτει τα σημεία αναντιστρεπτοτήτων και διευκολύνει τη βελτίωση του



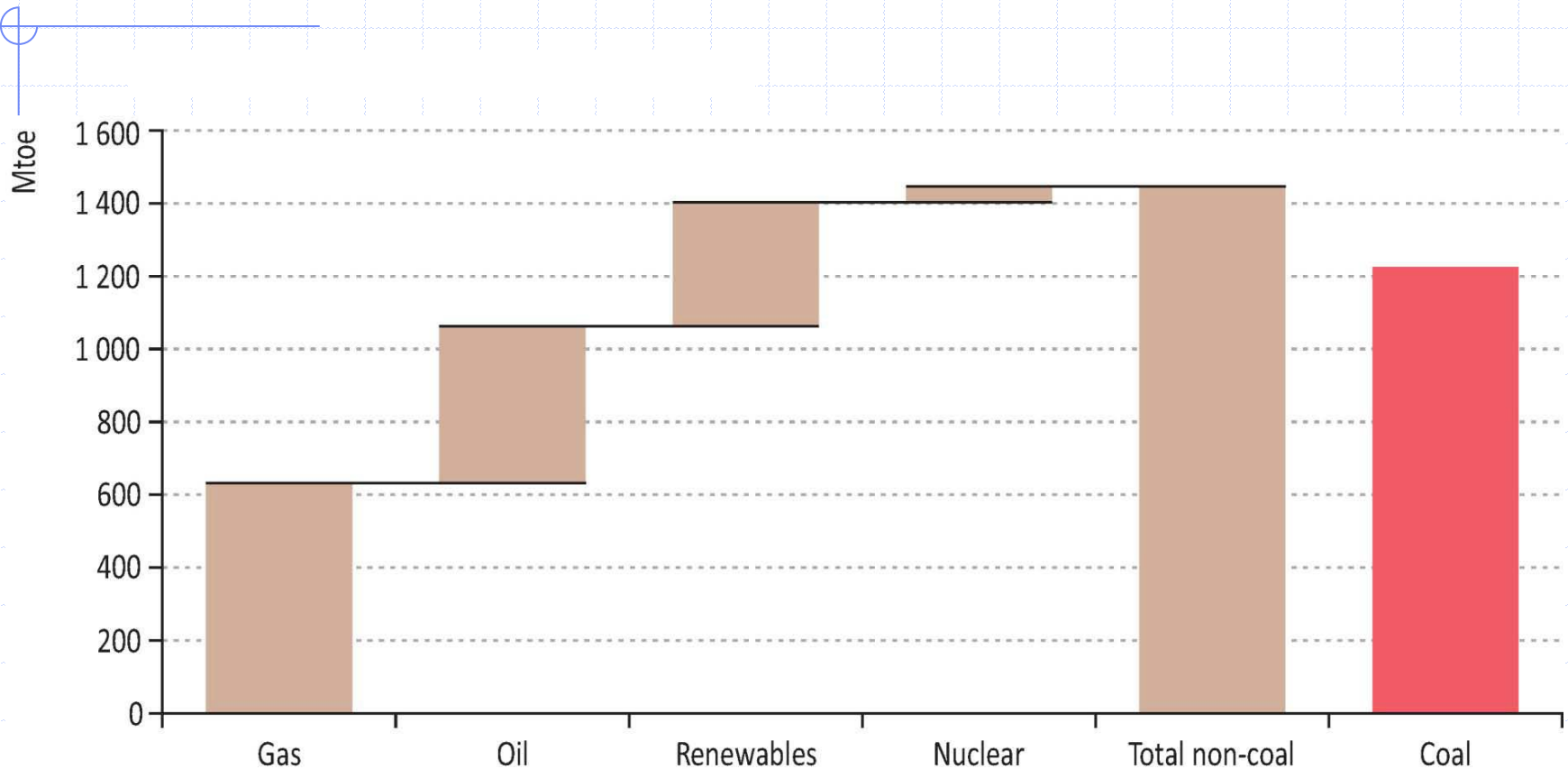
# ***Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...***



# Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...



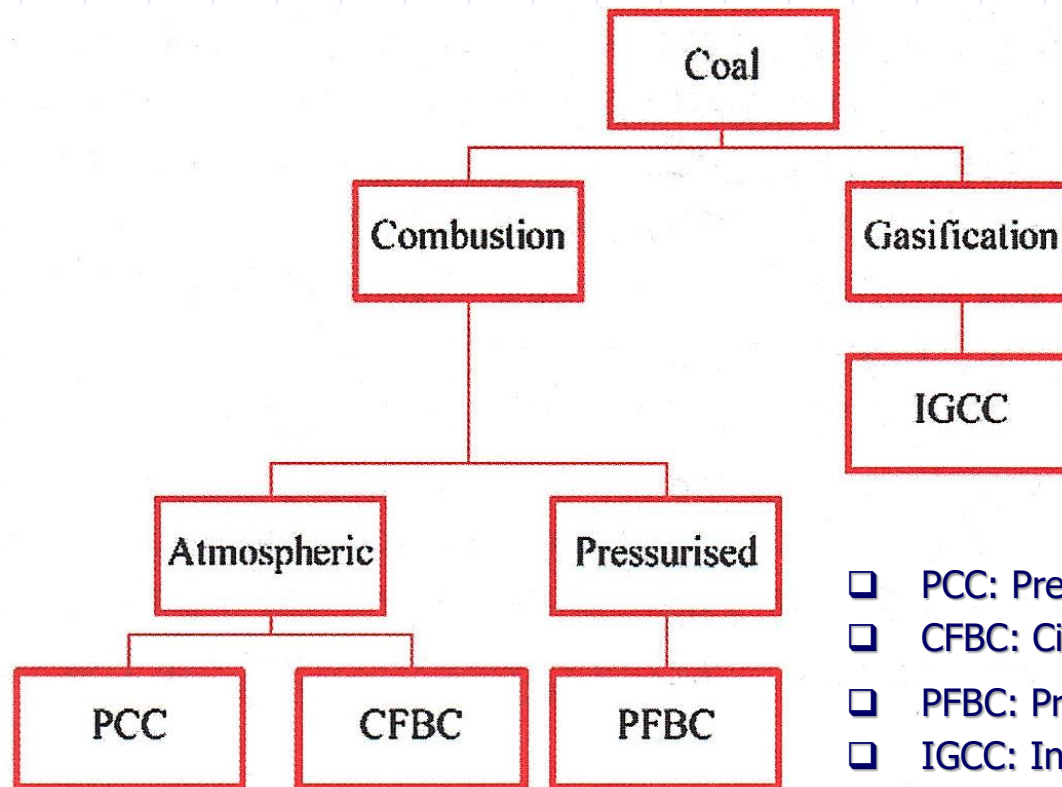
# Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...



Νέοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, ανά καύσιμο, την 1<sup>η</sup> δεκαετία του 21<sup>ου</sup> αιώνα

# Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...

- Υπάρχουν διάφορες τεχνικές αξιοποίησης του άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας



- PCC: Pressurized Coal Combustion
- CFBC: Circulating Fluidized Bed Combustion
- PFBC: Pressurized Fluidized Bed Combustion
- IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle



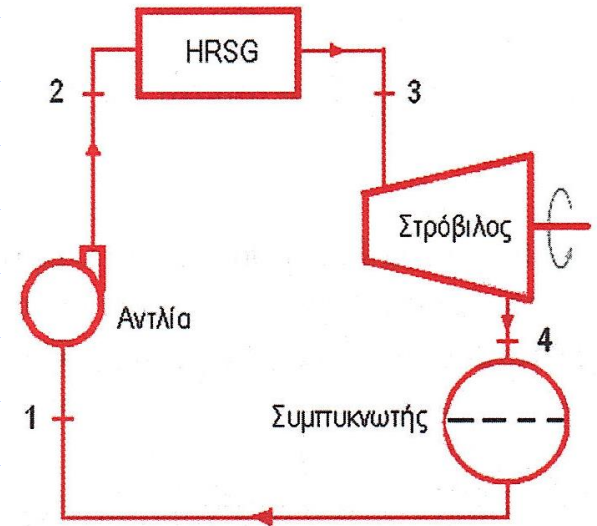
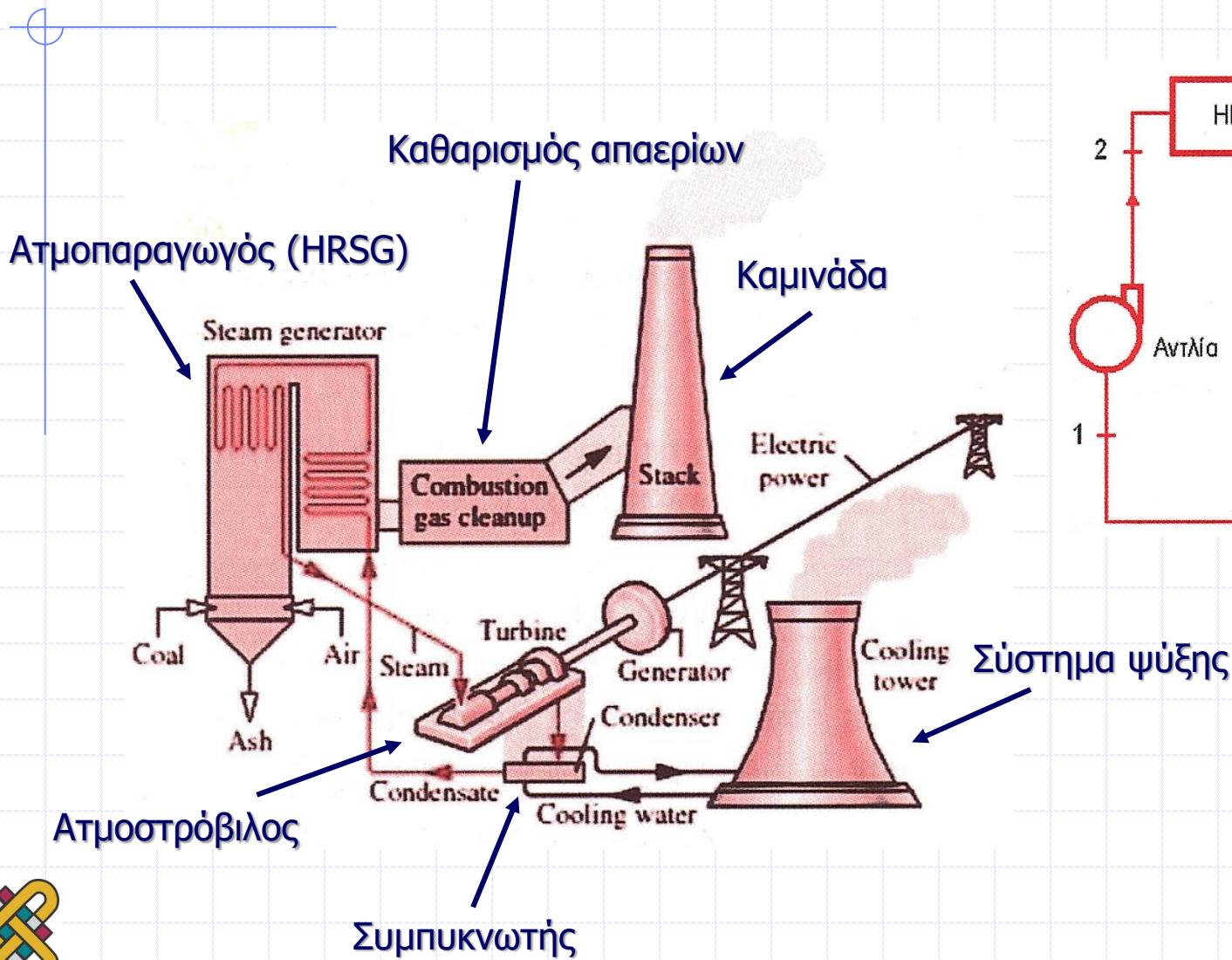
# Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...

- ❑ Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί λειτουργούν σύμφωνα με τον κύκλο **Rankine**, ή κύκλο ατμού, τα βασικά χαρακτηριστικά του οποίου είναι:
  - ✓ Το εργαζόμενο μέσο είναι νερό / ατμός
  - ✓ Κατά την διάρκεια του κύκλου το εργαζόμενο μέσο αλλάζει φάση
  - ✓ Η συμπίεση του εργαζόμενου μέσου γίνεται όταν βρίσκεται στην υγρή φάση
  - ✓ Το εργαζόμενο μέσο κινείται, στην πράξη, σε σχεδόν κλειστό κύκλο
  - ✓ Η θερμότητα που παράγεται από την καύση προσδίδεται στο νερό υπό πίεση
  - ✓ Ο υψηλής πίεσης ατμός εκτονώνεται σε έναν ατμοστρόβιλο, όπου μέρος της ενέργειας του μετατρέπεται σε μηχανικό έργο περιστροφής





# Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...



# Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...

- ❑ Ο συντελεστής θερμικής απόδοσης ( $n_{ST}$ ) των ανθρακικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ποικίλει, ανάλογα και με το καύσιμο
- ❑ Οι πλέον εξελιγμένοι [με καύσιμο πισσούχο (βιτουμινικό) άνθρακα] έχουν βαθμό απόδοσης 45 – 47%
- ❑ Στους παλαιότερους σταθμούς η απόδοση είναι περίπου 30%
- ❑ Παγκοσμίως εκτιμάται ότι ανέρχεται, κατά μέσο όρο στο 34-35%
- ❑ Υψηλός συντελεστής απόδοσης συνεπάγεται μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ανά kWh<sub>e</sub> παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
- ❑ Η εγκατάσταση και λειτουργία συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> περιορίζει την απόδοση, λόγω αύξησης της ιδιοκατανάλωσης



# Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...

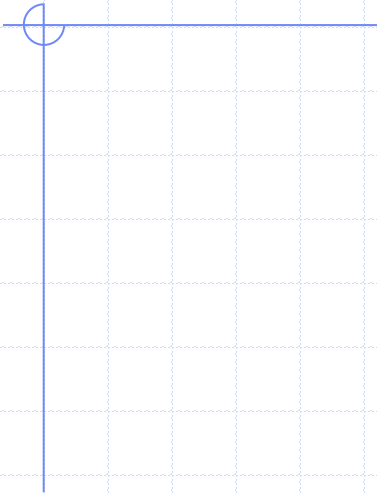
- Υπάρχει μια σειρά από σχεδιαστικές μεταβλητές που επηρεάζουν τον συντελεστή απόδοσης:
  - ✓ **Πίεση ατμού**: Σε συμβατικούς υποκρίσιμους (sub-critical) σταθμούς είναι 160-170 bar, σε υπερκρίσιμους (super-critical) είναι ~ 250 bar, ενώ ultra-super-critical φθάνει στα 250-350 bar (πολύ υψηλός βαθμός απόδοσης)
  - ✓ **Θερμοκρασία ατμού**: Σε συμβατικούς υποκρίσιμους σταθμούς είναι 530-560°C, στους υπερκρίσιμους 580-615°C, ενώ στους ultra-super-critical ακόμη και 700°C
  - ✓ **Αριθμός αναθερμάνσεων**: Συνήθως μία ή δύο
  - ✓ **Αριθμός προθερμάνσεων νερού τροφοδοσίας (αναγέννηση)**: Μέχρι και δέκα (10) οπότε η θερμοκρασία προθέρμανσης φθάνει ως 350°C
  - ✓ **Προξήρανση άνθρακα** (περιορισμένη επίδραση)
  - ✓ **Πίεση λειτουργίας συμπυκνωτή**
  - ✓ **Δυνατότητα μεταβολής της πίεσης ατμού**: Βελτιστοποίηση της λειτουργίας σε μερικό φορτίο
  - ✓ **Χρησιμοποιούμενα υλικά**: Είναι συνάρτηση του ύψους επένδυσης, που αυξάνει σημαντικά με τη χρήση ακριβών κραμάτων Ni ή φερρικού χάλυβα (για θερμοκρασίες μέχρι 650°C)



# Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...

- Υπάρχει μια σειρά από διαθέσιμες τεχνικές βελτίωσης των ενεργειακών χαρακτηριστικών και των περιβαλλοντικών επιδόσεων των σταθμών:
  - ✓ Καθαρισμός επιφανειών εναλλαγής θερμότητας (και βελτιστοποίηση της λειτουργίας των εκκαπνιστών)
  - ✓ Στεγανοποίηση του λέβητα
  - ✓ Βελτιστοποίηση της προθέρμανσης αέρα
  - ✓ Πρόσθετη αξιοποίησης της θερμότητας των απαερίων (απαιτεί αποθείωση)
  - ✓ Αναδιάταξη επιφανειών εναλλαγής θερμότητας (σε περιπτώσεις εκτεταμένων ανακατασκευών)
  - ✓ Μείωση των απωλειών των ανεμιστήρων (βελτιστοποίηση ελέγχου λειτουργίας)
  - ✓ Βελτιστοποίηση ατμοστροβίλου (παρεμβάσεις στις βαθμίδες, βελτίωση πτερύγων)
  - ✓ Βελτιστοποίηση λειτουργίας πύργου ψύξης (μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και της αντίθλιψης)
  - ✓ Προξήρανση άνθρακα (βελτίωση καύσης, μείωση της θερμοκρασίας των απαερίων)
  - ✓ Ανάκτηση θερμότητας απαερίων
  - ✓ Αυτόματος έλεγχος (Automated control, computer-based)





***Συνδυασμένοι κύκλοι...***

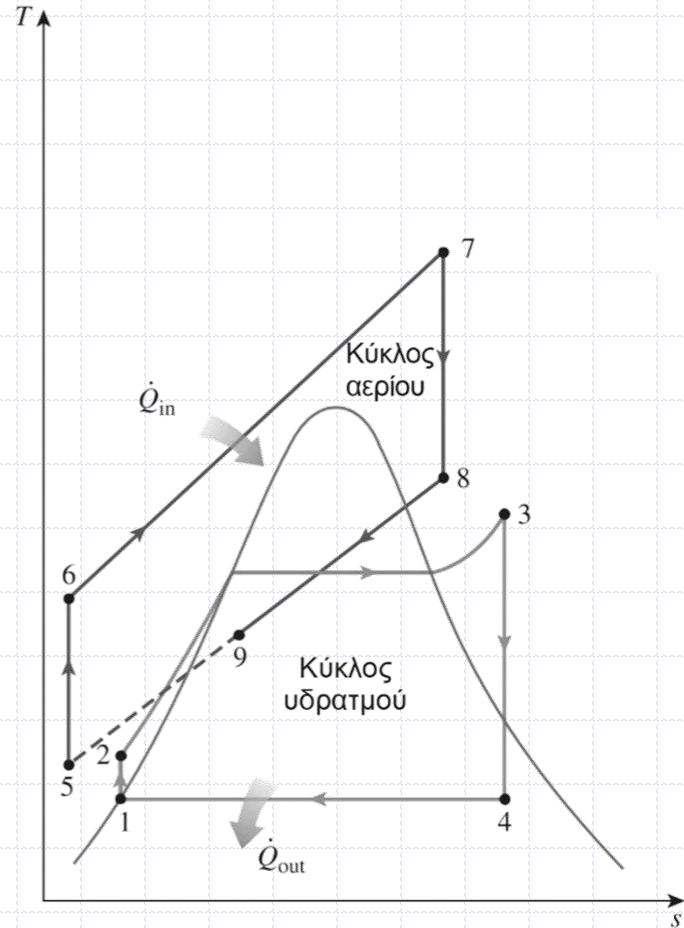
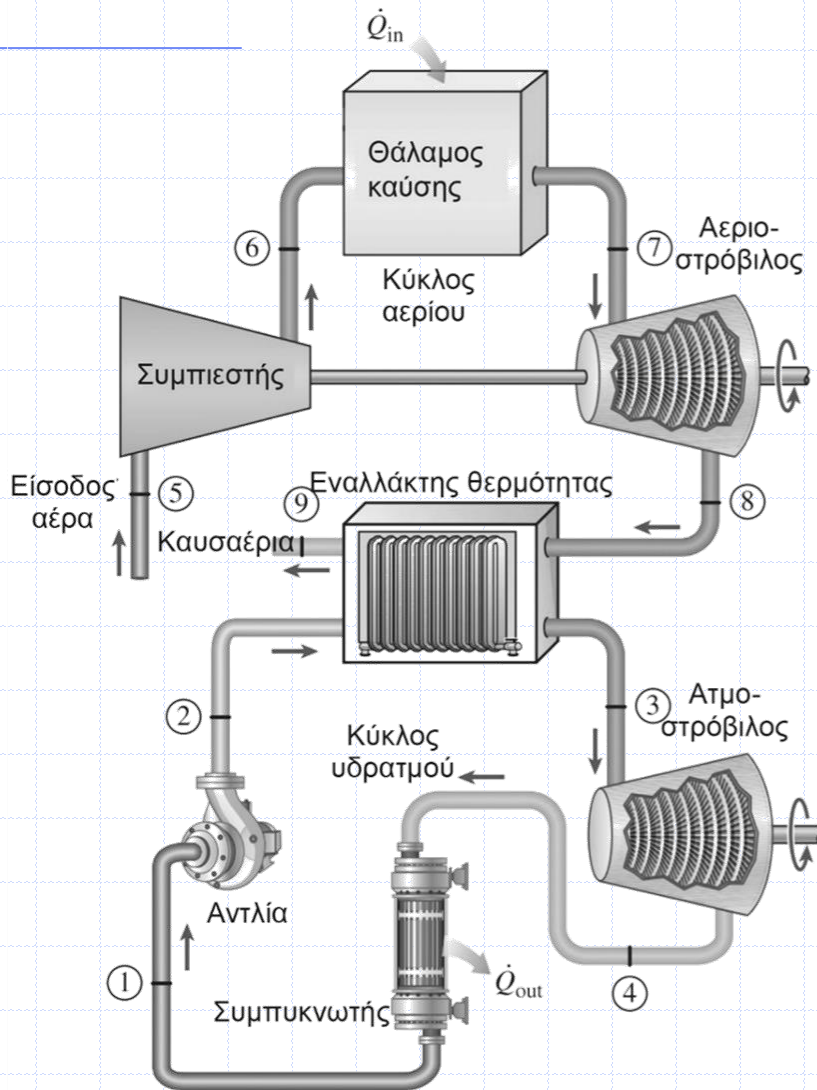


# Συνδυασμένοι κύκλοι...

- ❑ Η αυξανόμενη ζήτηση για υψηλότερες θερμικές αποδόσεις έχει οδηγήσει σε αρκετά καινοτόμες τροποποιήσεις στους συμβατικούς ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς
- ❑ Μια δημοφιλής τροποποίηση ενσωματώνει έναν κύκλο αερίου που τροφοδοτεί με θερμότητα έναν κύκλο ατμού και καλείται **συνδυασμένος κύκλος**
- ❑ Ο συνδυασμένος κύκλος που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον αφορά στην συνδυασμένη λειτουργία ενός κύκλου αεροστροβίλου (Brayton) κι ενός κύκλου ατμού (Rankine). Αυτός ο συνδυασμός παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τη μεμονωμένη λειτουργία καθενός από τους επιμέρους κύκλους
- ❑ Αυτός ο συνδυασμός ενσωματώνεται τα πολύ επιθυμητά χαρακτηριστικά των αεροστροβίλων υψηλών θερμοκρασιών και της χρήσης των καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας ως πηγή θερμότητας για τον κύκλο ατμού. Αυτός είναι ο συνδυασμένος κύκλος αερίου – ατμού
- ❑ Η ανάπτυξη των αεροστροβίλων έχει καταστήσει το συνδυασμένο κύκλο μια πολύ ελκυστική οικονομικά λύση
- ❑ Ο συνδυασμένος κύκλος αυξάνει την απόδοση χωρίς να αυξάνει σημαντικά το αρχικό κόστος. Επομένως, πλέον των νέων μονάδων συνδυασμένου κύκλου, πολλές περισσότερες υφιστάμενες μονάδες ατμού ή αεροστροβίλου μετατρέπονται σε συνδυασμένους κύκλους
- ❑ Οι συνδυασμένοι κύκλοι επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης άνω του 55%

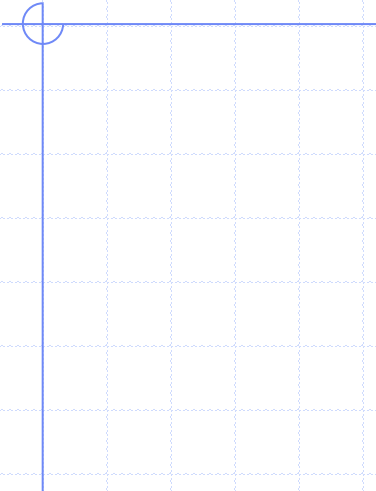


# Συνδυασμένοι κύκλοι...



Συνδυασμένος κύκλος αεριοστροβίλου - ατμού





# ***Ηλεκτροπαραγωγή συνδυασμένου κύκλου...***





# Ηλεκτροπαραγωγή συνδυασμένου κύκλου...

- ❑ Ο όρος "**συνδυασμένος κύκλος**" (combined cycle) είναι ο συνδυασμός των δύο κύκλων ισχύος, ενός κύκλου αερίου (πχ. Brayton) και ενός κύκλου ατμού (πχ. Rankine)
- ❑ Οι κύκλοι ισχύος μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ή συνδυασμένα, και έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά:
  - ✓ Ο κύκλος αερίου είναι κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (με μέγιστη TET = 1.200°C ως 1.600°C για βιομηχανικούς αεριοστροβίλους), ενώ απορρίπτεται θερμότητα μέσω των καυσαερίων σε θερμοκρασίας της τάξης των 500°C με 700°C
  - ✓ Ο κύκλος ατμού είναι κύκλος χαμηλής θερμοκρασίας (με μέγιστη θερμοκρασία περίπου 550°C) ενώ απορρίπτεται θερμότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος
- ❑ Επομένως, η θερμότητα που απορρίπτεται από τον κύκλο αερίου χρησιμοποιείται ως θερμότητα εισαγωγής στον κύκλο ατμού, χωρίς πρόσθετη εισαγωγή θερμότητας, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση του συνδυασμένου κύκλου



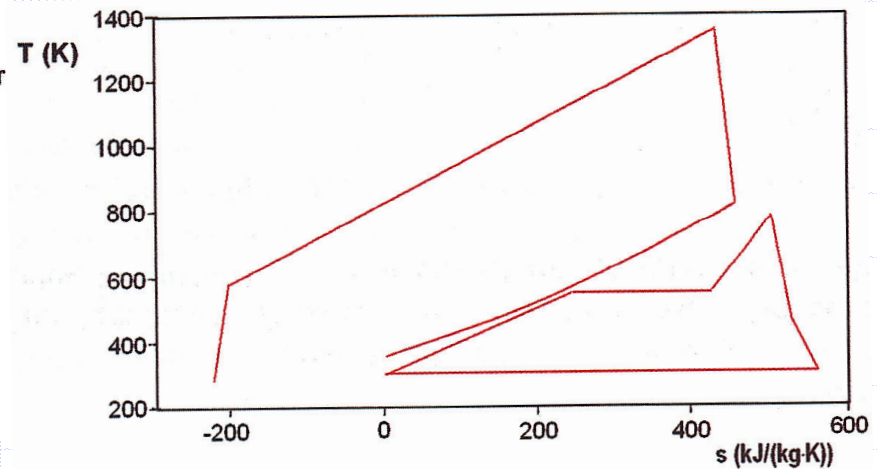
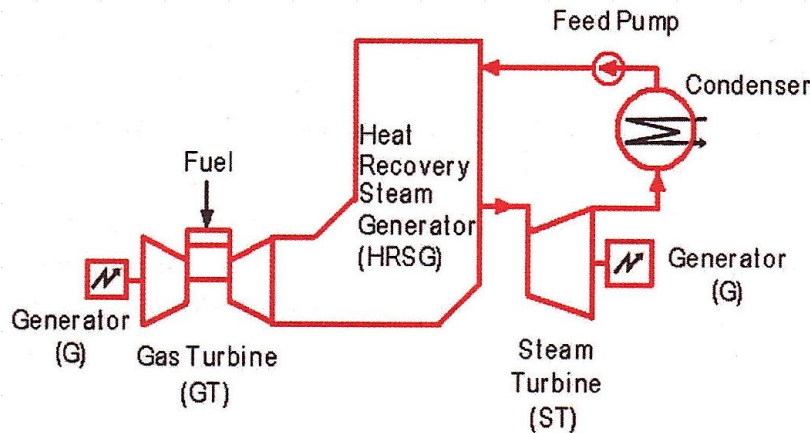
# Ηλεκτροπαραγωγή συνδυασμένου κύκλου...

- ❑ Ο συνδυασμός ενός κύκλου αερίου με έναν κύκλο ατμού έχει επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά των δύο επιμέρους κύκλων ισχύος
- ❑ Οι αεριοστρόβιλοι που είναι σχεδιασμένοι για να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμένο κύκλο είναι εντελώς διαφορετικοί από τους αεριοστροβίλους που λειτουργούν αυτοτελώς σε ανοιχτό κύκλο.
- ❑ Αντίστοιχα, οι κύκλοι ατμού που χρησιμοποιούνται στους συνδυασμένους κύκλους, έχουν κατά βάση διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τους κύκλους ατμού που χρησιμοποιούνται στους συμβατικούς σταθμούς άνθρακα ή φυσικού αερίου



# Ηλεκτροπαραγωγή συνδυασμένου κύκλου...

- Στο σχήμα παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη της απλούστερης εγκατάστασης συνδυασμένου κύκλου, και το αντίστοιχο διάγραμμα Mollier (T-s)



- Στόχος μιας μονάδας CCPP είναι η αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων, από την εξαγωγή του αεριοστροβίλου, για την παραγωγή ατμού που κινεί έναν ατμοστρόβιλο



# Ηλεκτροπαραγωγή συνδυασμένου κύκλου...

- Αέρας εισέρχεται στον αεριοστρόβιλο από κατάλληλα διαμορφωμένη εισαγωγή και χρησιμοποιείται, αφού συμπιεστεί, στην καύση, συνήθως, φυσικού αερίου, ενώ τα παραγόμενα καυσαέρια εκτονώνονται στον στρόβιλο παράγοντας έργο
- Μέρος του έργου εκτόνωσης χρησιμοποιείται για να οδηγηθεί ο συμπιεστής, ενώ το υπόλοιπο (ωφέλιμο) έργο οδηγεί την πρώτη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο έχουν θερμικό περιεχόμενο (ανάλογα με τον κύκλο Brayton του στροβίλου), οδηγούνται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής ατμού (*Heat Recovery Steam Generator*), παράγοντας υπέρκορο ατμό ( $P_s > P_\infty$ )
- Ο ατμός οδηγείται σε ατμοστρόβιλο (κύκλος Rankine) για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας, και εξέρχεται με ποιότητα  $\sim 90\%$
- Τελικά συμπυκνώνεται σε πύργους ψύξης και ανακυκλώνεται



# Ηλεκτροπαραγωγή συνδυασμένου κύκλου...

- Η λειτουργία μιας μονάδας CCPP στηρίζεται στον συνδυασμό δύο θερμοδυναμικών κύκλων, που ο ένας λειτουργεί "**επάνω**" (Topping cycle, TC) από τον άλλο, δηλαδή τον "**κάτω**" κύκλο ατμού (Bottoming cycle, BC)
- Συνήθως, ισχύει η ακολουθεί αναλογία παραγωγής ισχύος από τους δύο κύκλους:

$$\frac{U\dot{W}_{TC}}{U\dot{W}_{BC}} = \frac{2}{1}$$

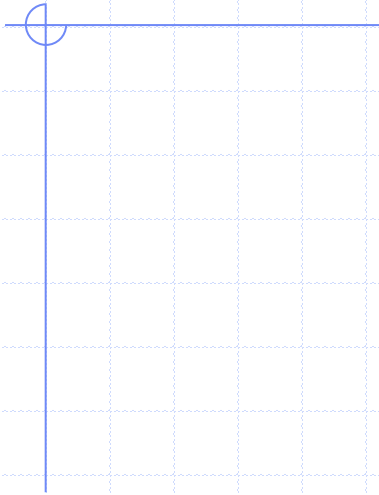


# Ηλεκτροπαραγωγή συνδυασμένου κύκλου...

Τα πλεονεκτήματα του συνδυασμένου κύκλου είναι:

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





***Διαμορφώσεις  
συνδυασμένων κύκλων...***

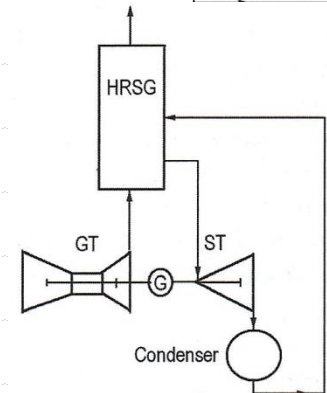
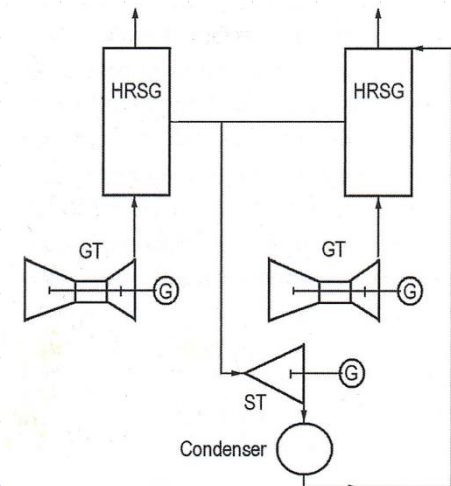


# Διαμορφώσεις συνδυασμένων κύκλων...

□ Μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου μπορεί να έχει πολλές διαμορφώσεις, με βάση κάποια κριτήρια:

**1. Ανάλογα με τον αριθμό των ανεξάρτητων αξόνων που οδηγούν την ή τις γεννήτριες.**

- ✓ Εάν στο σύστημα υπάρχουν περισσότεροι του ενός αεριοστροβίλου, που οδηγούν αντίστοιχες γεννήτριες, που τα καυσαέρια τους οδηγούνται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας για παραγωγή ατμού, που ακολούθως οδηγείται σε ατμοστρόβιλο, τότε είναι σύστημα πολλαπλών αξόνων (multi-shaft CCGT)
- ✓ Εφόσον ο αεριοστρόβιλος, και ο ατμοστρόβιλος είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο άξονα και οδηγούν από κοινού μια γεννήτρια, τότε είναι σύστημα μονού άξονα (single shaft CCGT)





# Διαμορφώσεις συνδυασμένων κύκλων...

- Τα πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης πολλαπλών αξόνων (multi shaft) είναι:
  - ✓ Υπάρχει δυνατότητα πιο ευέλικτης τοποθέτησης των επιμέρους συστημάτων (flexible arrangement)
  - ✓ Μικρότερος χρόνος εγκατάστασης, λόγω σπονδυλωτής κατασκευής (modular construction)
  - ✓ Χρήση μικρότερων γεννητριών
  - ✓ Λειτουργία με απλό κύκλο ατμού
  - ✓ Επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση στο σημείο σχεδιασμού, αλλά και σε μερικό φορτίο



# Διαμορφώσεις συνδυασμένων κύκλων...

- Τα πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης μονού άξονα (single shaft) είναι:
  - ✓ Απαιτούν μικρότερο χώρο, και συνεπώς, έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος ( $\text{MW}/\text{m}^2$ )
  - ✓ Προσφέρουν ελάχιστα καλύτερη αξιοπιστία και διαθεσιμότητα
  - ✓ Οι θερμοκρασίες αναθέρμανσης του κύκλου ατμού ελέγχονται καλύτερα



# Διαμορφώσεις συνδυασμένων κύκλων...

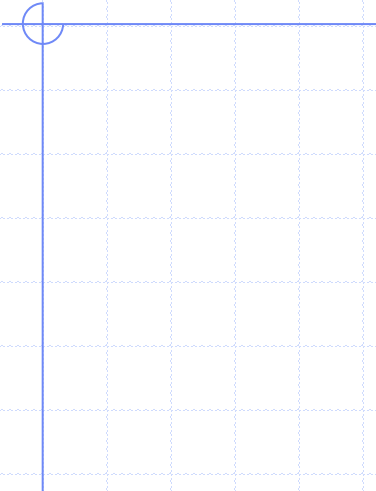
- Εάν ο κύκλος αερίου (GC) διαθέτει **σύστημα αναθέρμανσης** ή αν ο κύκλος ατμού (SC) διαθέτει **συστήματα αναθέρμανσης, αναγέννησης ή πολλαπλών πιέσεων**
  - ✓ Με χρήση κύκλου ατμού διπλής πίεσης επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός απόδοσης, λόγω της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας μετάδοσης θερμότητας στον ατμό
  - ✓ Η πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνει το κόστος της HRSG και του ατμοστροβίλου και απαιτείται ειδική μελέτη τεχνικής και οικονομικής σκοπιμότητας
  - ✓ Κύκλοι διπλής πίεσης τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής στην πράξη, ενώ οι κύκλοι τριπλής πίεσης με αναθέρμανση, που συνδυάζονται με αεριστροβίλους υψηλής θερμοκρασίας εξαγωγής των καυσαερίων ( $\sim 600^{\circ}\text{C}$ ) είναι οι πλέον συμφέροντες οικονομικά



# Διαμορφώσεις συνδυασμένων κύκλων...

- Εάν υπάρχει πρόβλεψη για χρήση πρόσθετου καυσίμου (βοηθητική καύση) στον ατμοπαραγωγό (HRSG)
  - ✓ Χρησιμοποιείται για την αύξηση της ωφέλιμης ισχύος για μικρά χρονικά διαστήματα ή την αποφυγή προβλημάτων ποιότητας ατμού κατά την λειτουργία σε μερικό φορτίο, επιλογή όμως που αυξάνει σημαντικά το κόστος της HRSG που μετατρέπεται σε λέβητα (boiler)
  - ✓ Τα καυσαέρια από την βοηθητική καύση δεν διέρχονται από τον αεριοστρόβιλο, οπότε είναι επιτρεπτή η καύση βαρέων κλασμάτων πετρελαίου (heavy oils) ή/και άνθρακα στον λέβητα (η τελευταία επιλογή δεν προτιμάται λόγω πολυπλοκότητας και κόστους, όμως είναι μια οικονομικά βιώσιμη λύση σε περιπτώσεις υψηλού κόστους του κύριου καυσίμου)





***Κύρια εξαρτήματα  
συνδυασμένου κύκλου...***



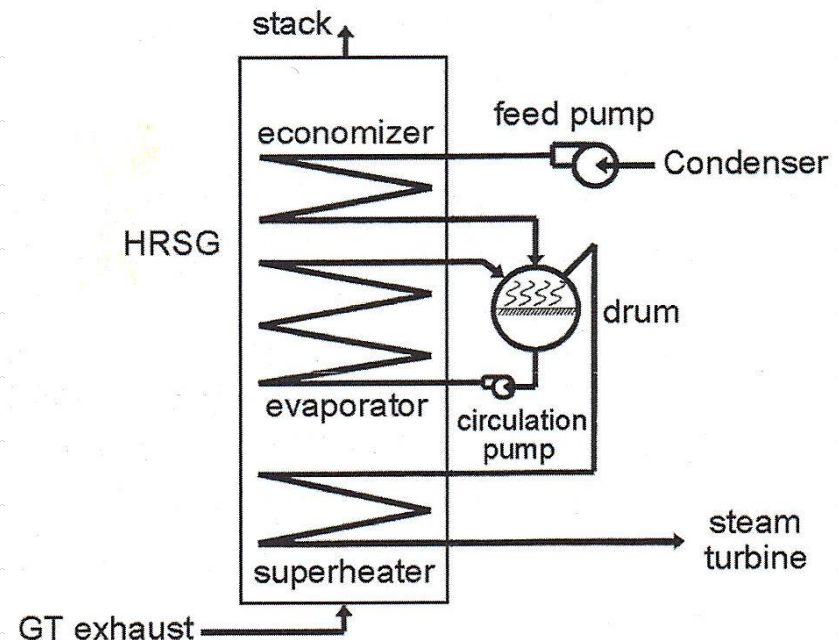
# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...

## □ Αεριοστρόβιλος

- ✓ Παράγει ισχύ για την περιστροφή της γεννήτριας στις 3.000 (50 MHz) ή 3.600 rpm (60 MHz)
- ✓ Τροφοδοτεί με θερμότητα το ατμοστρόβιλο

## □ Γεννήτρια ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής ατμού (HGSR)

- ✓ Εναλλάκτης θερμότητας ή προθερμαντήρας (economizer)
- ✓ Εναλλάκτης εξατμισμού ή εξατμιστήρας (evaporator)
- ✓ Εναλλάκτης υπερθέρμανσης ή υπερθερμαντήρας (superheater)
- ✓ Τύμπανο ατμού (drum), για τον διαχωρισμό της υγρής φάσης από τον ατμό



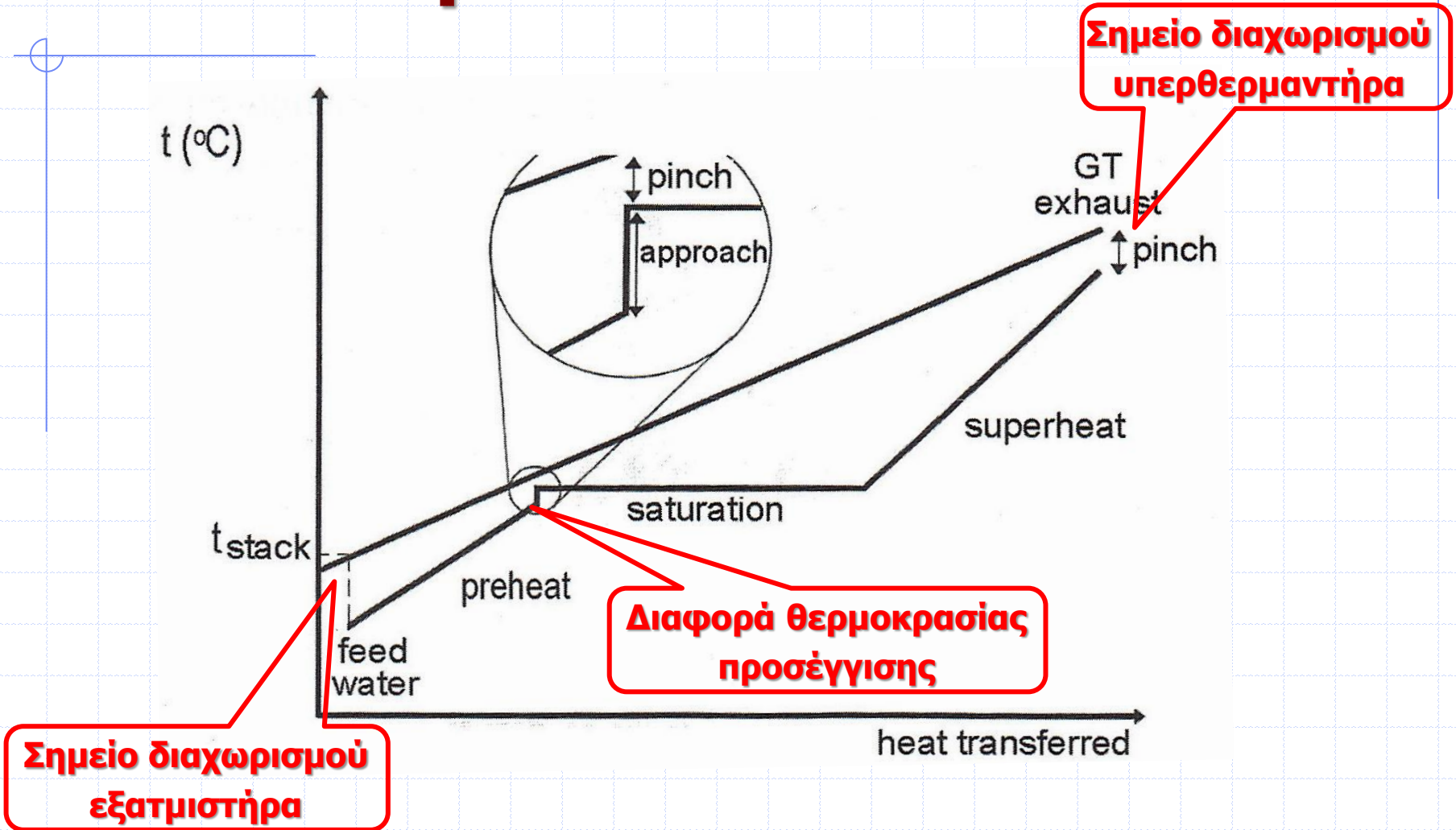
# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...

## □ Παράμετροι λειτουργίας ατμοπαραγωγού (HRSG)

- ✓ Πίεση λειτουργίας
- ✓ Θερμοκρασία νερού τροφοδοσίας
- ✓ Θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού
- ✓ Το “**σημείο διαχωρισμού**” (pinch point) του υπερθερμαντήρα, που είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμών καυσαερίων και της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ )
- ✓ Το “**σημείο διαχωρισμού**” (pinch point) του εξατμιστήρα, που είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των καυσαερίων και του κορεσμένου ατμού στον εξατμιστήρα ( $\sim 10^{\circ}\text{C}$ )
- ✓ Η διαφορά θερμοκρασίας σημείου προσέγγισης (approach point) που είναι η θερμοκρασία κορεσμού στον εξατμιστήρα ή στο τύμπανο μείον την θερμοκρασία του νερού στην έξοδο του εξατμιστήρα (2 ως  $10^{\circ}\text{C}$ )



# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...



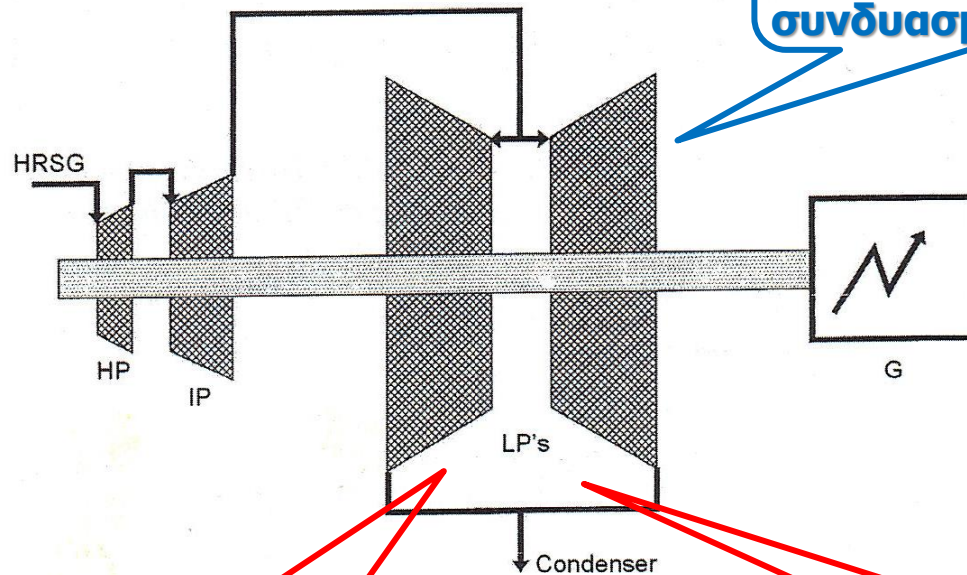


# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...

- **Ατμοστρόβιλος (ST):** Παράγει ισχύ με την εκτόνωση υπέρθερμου ατμού υψηλής πίεσης, αποτελείται από διάφορα τύμπανα (srools) ανάλογα με τον λόγο πίεσης και το περίβλημα και περιστρέφει την γεννήτρια με 3.000 ή 3.600 rpm. Οι κύριες παράμετροι είναι:
  - ✓ Πίεση λειτουργίας
  - ✓ Μέγιστη θερμοκρασία εισόδου
  - ✓ Παροχή μάζας εισόδου
  - ✓ Πίεση εξόδου (back pressure)
  - ✓ Ποιότητα ατμού (x) στην έξοδο ( $\geq 0,88$ )
  - ✓ Εγκάρσια διατομή εξαγωγής (exhaust cross section) και αριθμός τυμπάνων χαμηλής πίεσης (low pressure, LP)



# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...



Τυπική διαμόρφωση  
ατμοστρόβιλου  
συνδυασμένου κύκλου

Κατοπτρική τοποθέτηση  
τυμπάνων και  
περιβλημάτων

Εφοδιασμένος με δίδυμα  
τύμπανα χαμηλής πίεσης  
(LPD)

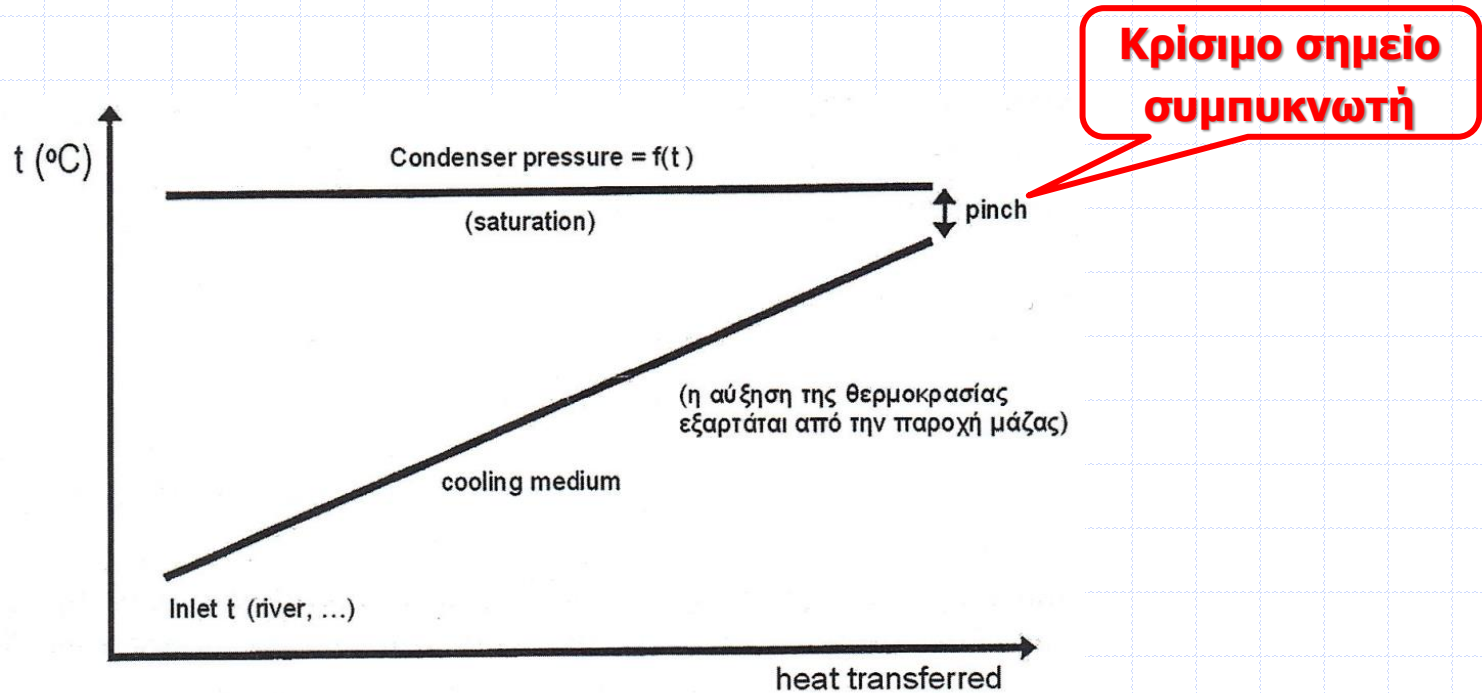


# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...

- **Συμπυκνωτής & τροφοδοτικές αντλίες:** Συμπύκνωση του ατμού στην εξαγωγή του ατμοστροβίλου και αύξηση της πίεσης του υγρού με τις αντλίες αναρρόφησης (extraction pumps) και τις αντλίες τροφοδοσίας (feed pumps). Οι κύριες παράμετροι του συμπυκνωτή είναι:
  - ✓ Θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού μέσου
  - ✓ Αύξηση θερμοκρασίας ψυκτικού (εξαρτάται από την παροχή μάζας και το θερμικό καθήκον του συμπυκνωτή)
  - ✓ Διαφορά θερμοκρασίας του κρίσιμου σημείου (pinch point) του συμπυκνωτή
  - ✓ Η θερμοκρασία και πίεση κορεσμού του ατμού (η απόδοση του ατμοστροβίλου εξαρτάται από την πίεση στην έξοδο)



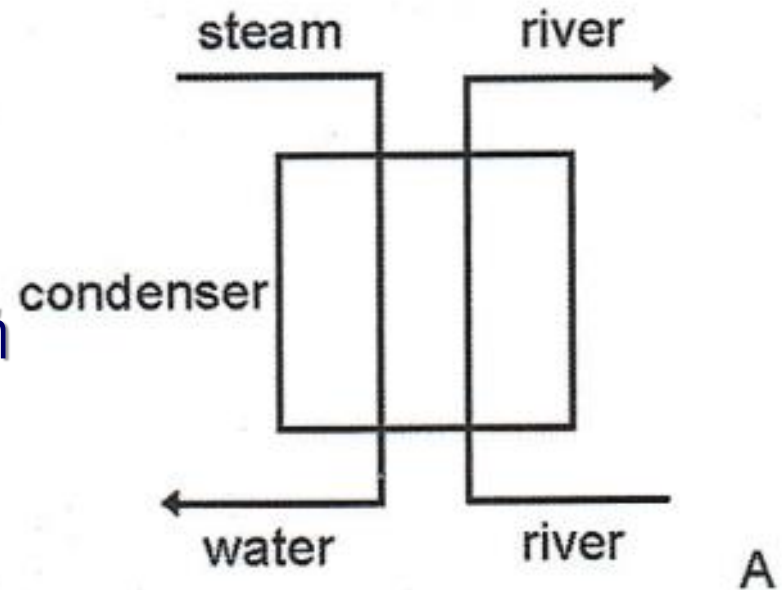
# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...



# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...

## Συστήματα ψύξης

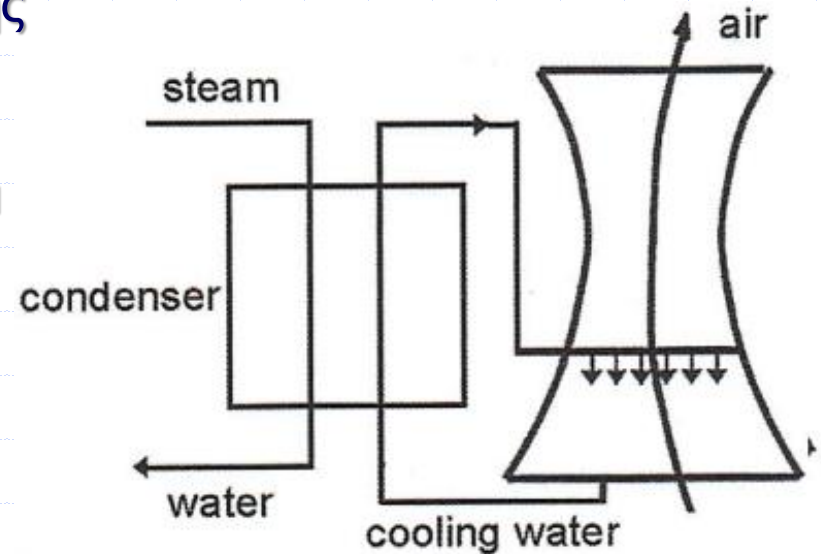
- Άμεση ψύξη με νερό ποταμού ή θαλασσινό νερό. Είναι η απλούστερη διάταξη και χαρακτηρίζεται από:
  - ✓ Προβλήματα επικαθήσεων (fouling) και διαβρώσεων (corrosion)
  - ✓ Μη επιτρεπτή αύξηση της θερμοκρασίας του νερού
  - ✓ Μικρή κατανάλωση ισχύος (αντλίες κυκλοφορίας νερού)
  - ✓ Καλός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, και, συνεπώς, χαμηλή πίεση εξόδου του ατμοστροβίλου



# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...

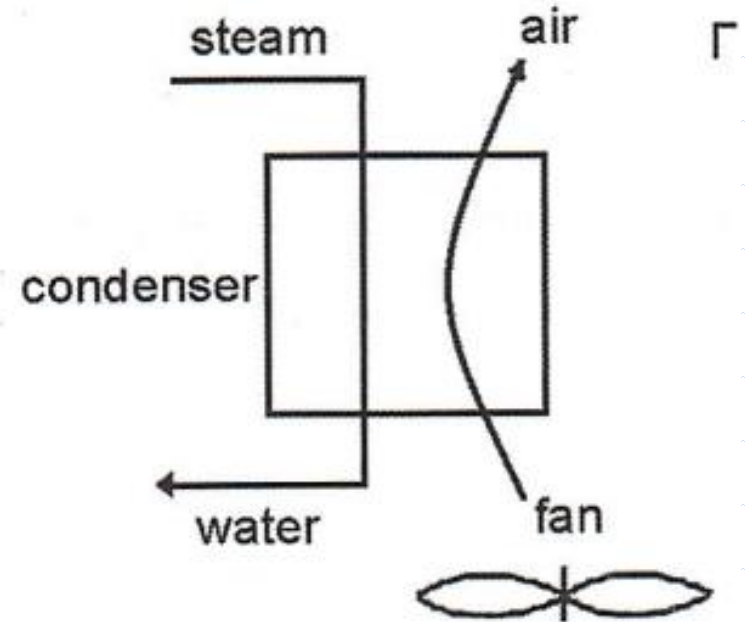
## Συστήματα ψύξης

- **Πύργος ψύξης.** Ο συμπυκνωτής είναι ένας ενδιάμεσος εναλλάκτης μεταξύ του ατμού και του κυκλώματος νερού ψύξης, και υπάρχουν διάφορα είδη πύργων ψύξης:
  - ✓ Άμεσης επαφής – φυσικής ροής, στον οποίο το νερό ρέει ελεύθερα
  - ✓ Άμεσης επαφής – εξαναγκασμένης ροής. Διαθέτει ανεμιστήρες για την ροή του αέρα
  - ✓ Ξηρός πύργος, όπου το νερό ρέει σε σωληνώσεις



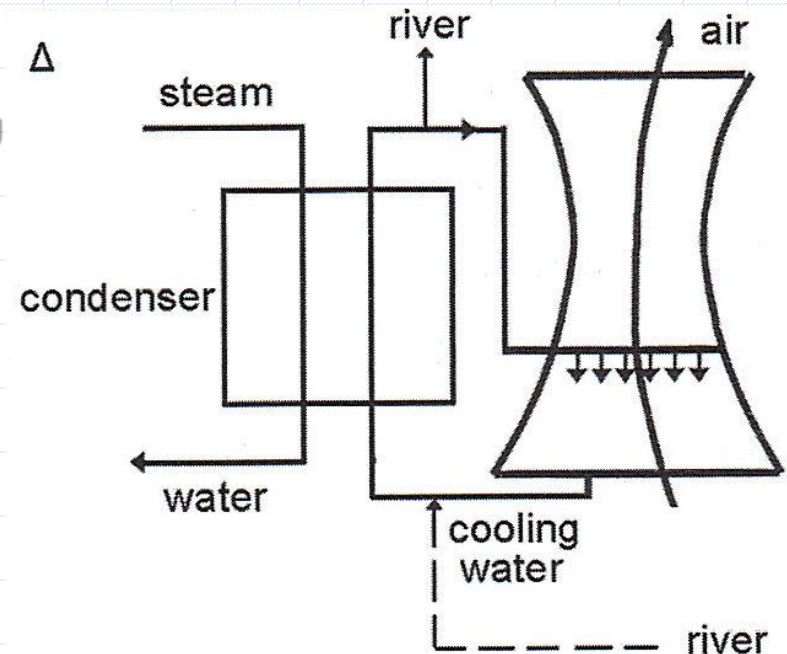
# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...

- ❑ **Αεροσυμπκνωτής (aerocondenser).** Ο συμπκνωτής είναι ένας εναλλάκτης ατμού-αέρα. Ο ατμός ρέει και συμπκνώνεται εντός των αυλών, ενώ οι ανεμιστήρες δημιουργούν εξαναγκασμένη ροή αέρα
- ❑ Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι:
  - ✓ Δεν απαιτείται νερό
  - ✓ Δεν υπάρχει κατανάλωση νερού
  - ✓ Θόρυβος (ανεμιστήρες)
  - ✓ Δεν υπάρχει πύργος ψύξης
  - ✓ Χαμηλός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας και, συνεπώς, σχετικά υψηλή θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του συμπκνούμενου ατμού και του αέρα



# Κύρια εξαρτήματα συνδυασμένου κύκλου...

- **Υβριδικές λύσεις (hybrid solutions).** Συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των προαναφερθεισών λύσεων.
  - ✓ Η πλέον κοινή λύση είναι η συνδυασμένη εφαρμογή πύργου ψύξης (φυσικής ροής) και εναλλάκτη με χρήση νερού ποταμού
  - ✓ Επιτυγχάνεται διαμοιρασμός του θερμικού φορτίου (φορτίο συμπυκνωτή) μεταξύ του πύργου ψύξης και του ποταμού





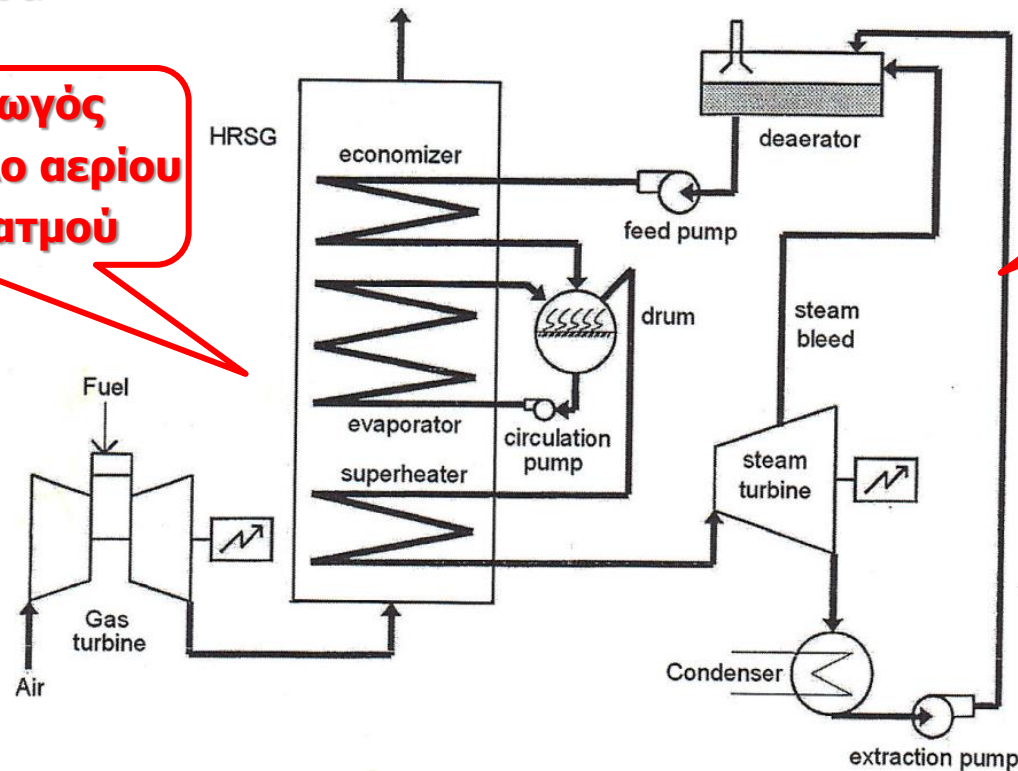
***Υπολογισμός στο σημείο  
σχεδιασμού CCPP μονής  
πίεσης...***



# Υπολογισμός στο σημείο σχεδιασμού CCPP μονής πίεσης...

- Ο συνδυασμένος κύκλος μονής πίεσης (single pressure level combined cycle) είναι η απλούστερη μορφή, και, παρά τις βελτιώσεις, παραμένει στην αγορά

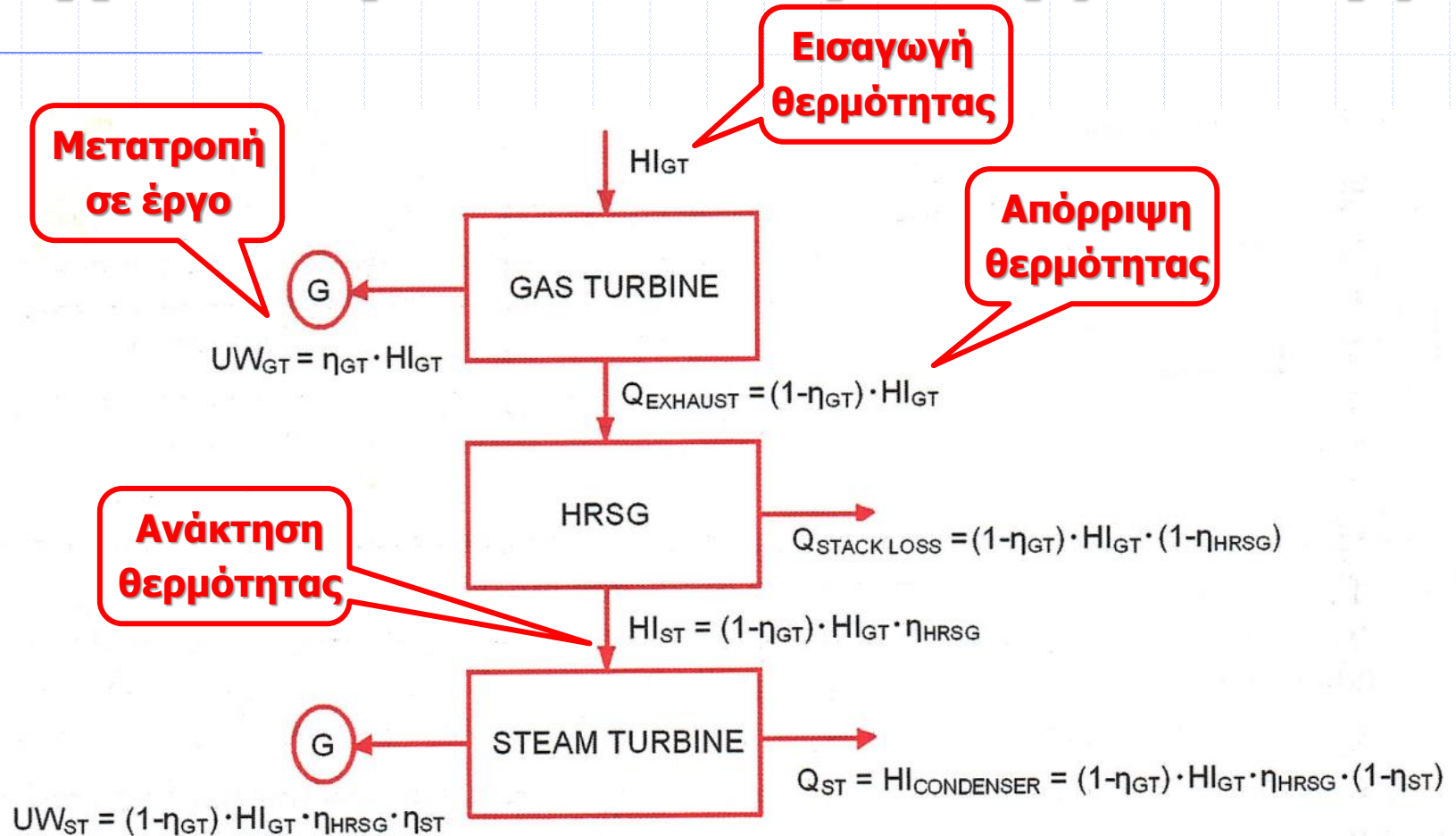
**Ο ατμοπαραγωγός συνδέει τον κύκλο αερίου με τον κύκλο ατμού**



**Συνδυασμένος κύκλος με απλή υπερθέρμανση**

- Η γενική μέθοδος υπολογισμού της απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου μονής πίεσης, ισχύει για όλες τις διατάξεις συνδυασμένου κύκλου

# Υπολογισμός στο σημείο σχεδιασμού CCPP μονής πίεσης...



## □ Απόδοση κύκλου

$$\eta_{CC} = \frac{U_{W_{GT}} + U_{W_{ST}}}{H_{I_{GT}}} \Rightarrow \eta_{CC} = \eta_{GT} + (1 - \eta_{GT}) \cdot \eta_{HRSG} \cdot \eta_{ST}$$

# Υπολογισμός στο σημείο σχεδιασμού CCPP μονής πίεσης...

- Σε προκαταρκτικούς υπολογισμούς συνδυασμένου κύκλου η χρήσιμη παραγόμενη θερμότητα μπορεί να υπολογιστεί, με αποδεκτή ακρίβεια, από την σχέση:

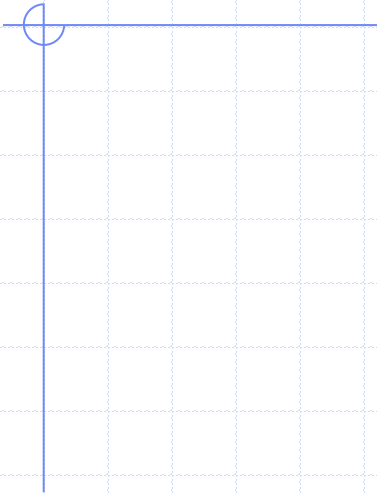
$$C_{GT,gas}(T_{IN}-393)$$

όπου

$C_{GT,gas}$  ειδική θερμότητα των καυσαερίων που εισέρχονται στον HRSG

- ✓ Η **θερμοκρασία καμινάδας** ( $T_S$ ) αντιστοιχεί στο σημείο δρόσου για την αποφυγή συμπυκνώσεων, και είναι  $T_S \geq 120^\circ\text{C}$
- ✓ Η τελική **θερμοκρασία εξαγωγής** (exhaust gas temperature) απαιτείται να είναι  $T_{EXH} \geq T_S$
- ✓ Η **θερμοκρασία εισόδου**  $T_N$  στον HRSG είναι η θερμοκρασία εξαγωγής από τον αεριοστρόβιλο  $T_{EXH}$  μείον την διαφορά θερμοκρασίας υπερθέρμανσης (approach point)





***Συμπαραγωγή...***



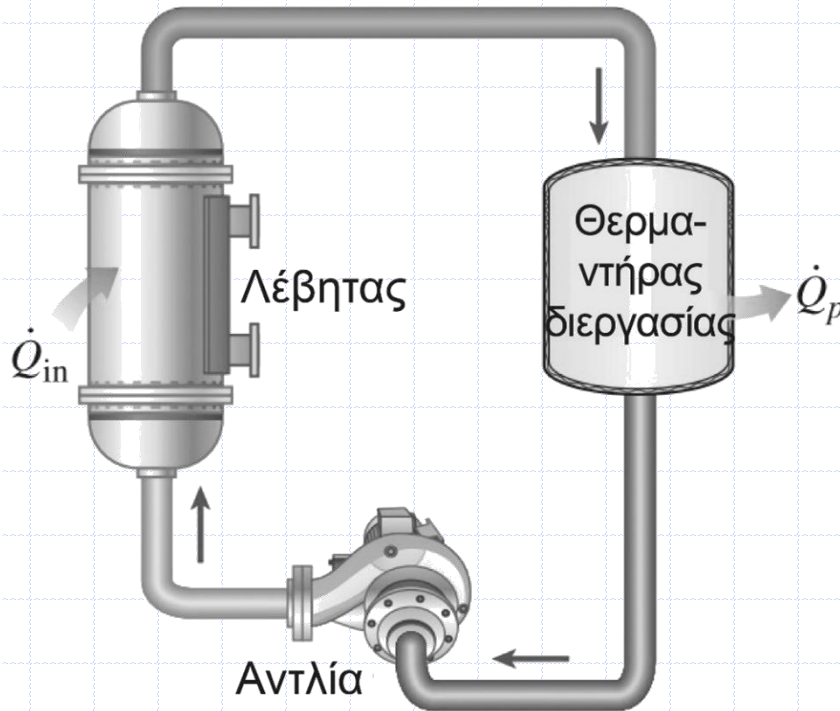
# Συμπαραγωγή...

- ❑ Η **Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας** ή απλώς **Συμπαραγωγή** (CHP ή cogeneration) είναι η συνδυασμένη παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής (μηχανικής) ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας, σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο σύστημα
- ❑ Η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για θέρμανση κτιρίων (τηλε-θέρμανση) ή σε βιομηχανικές διεργασίες
- ❑ Όταν το σύστημα συμπαραγωγής παράγει ταυτόχρονα ηλεκτρική, θερμική και ενέργεια ψύξης, καλείται **Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας και Ψύξης** (CHCP ή tri-generation)
- ❑ Η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται τόσο για την θέρμανση όσο και για την ψύξη σε κτίρια ή στην βιομηχανία (τηλε-θέρμανση, τηλε-ψύξη)



# Συμπαγωγή...

- Πολλές βιομηχανίες απαιτούν ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, που καλείται **θερμότητα διεργασίας**. Η θερμότητα διεργασίας γενικά παρέχεται υπό πίεση μεταξύ 5 atm και 7 atm και θερμοκρασία μεταξύ 150°C και 200°C. Η πηγή ενέργειας είναι γενικά κάποιο καύσιμο (άνθρακας, πετρέλαιο ή Φ.Α.)



- Οι βιομηχανίες που απαιτούν μεγάλα ποσά θερμότητας, συνήθως καταναλώνουν και μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας
- Θα είχε, λοιπόν, ενδιαφέρον να χρησιμοποιήσουμε το υπάρχον δυνητικό έργο για παραγωγή ισχύος και όχι να το απορρίπτουμε.
- Το αποτέλεσμα θα είναι μια μονάδα που θα παράγει ηλεκτρισμό ταυτόχρονα με θερμότητα (μονάδα συμπαγωγής)

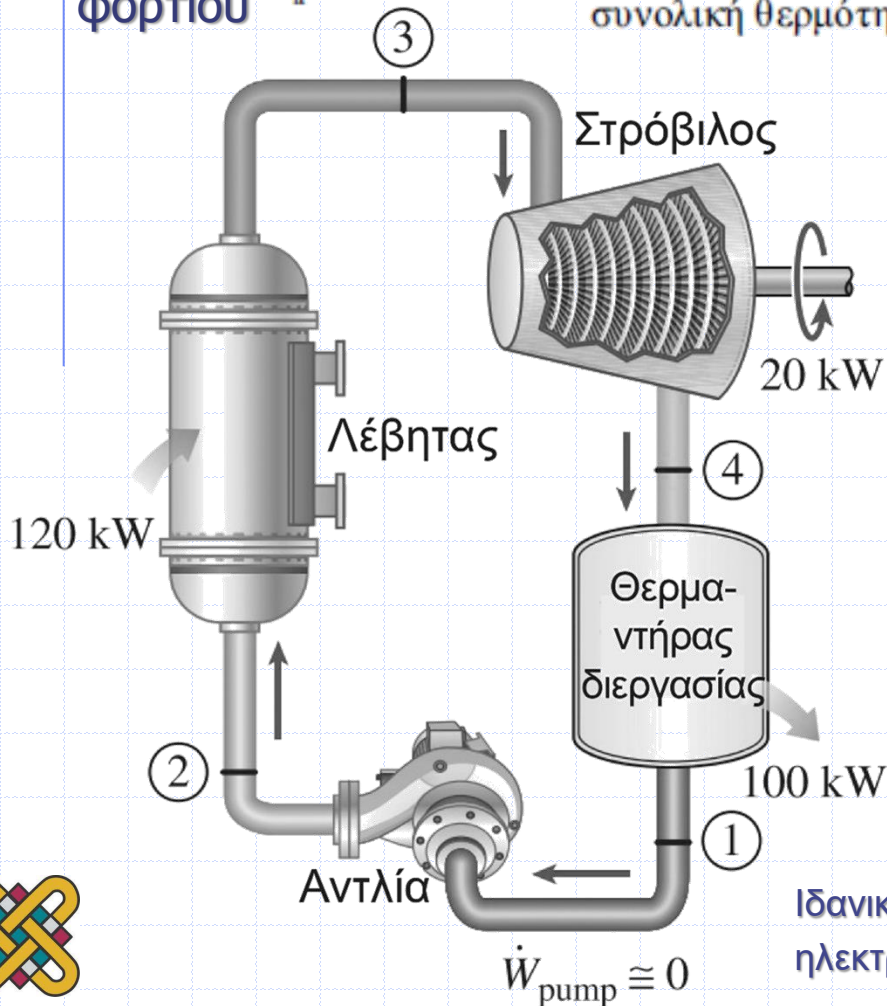


**Συμπαγωγή:** Η παραγωγή περισσότερων της μιας ωφέλιμης μορφής ενέργειας (π.χ. ωφέλιμη θερμότητα & ηλεκτρισμό) από την ίδια πηγή ενέργειας

# Συμπαγωγή...

Συντελεστής φορτίου

$$\varepsilon_u = \frac{\text{καθαρό έργο εξόδου} + \text{αποδιδόμενη θερμότητα διεργασίας}}{\text{συνολική θερμότητα εισόδου}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}} + \dot{Q}_p}{\dot{Q}_{\text{in}}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$



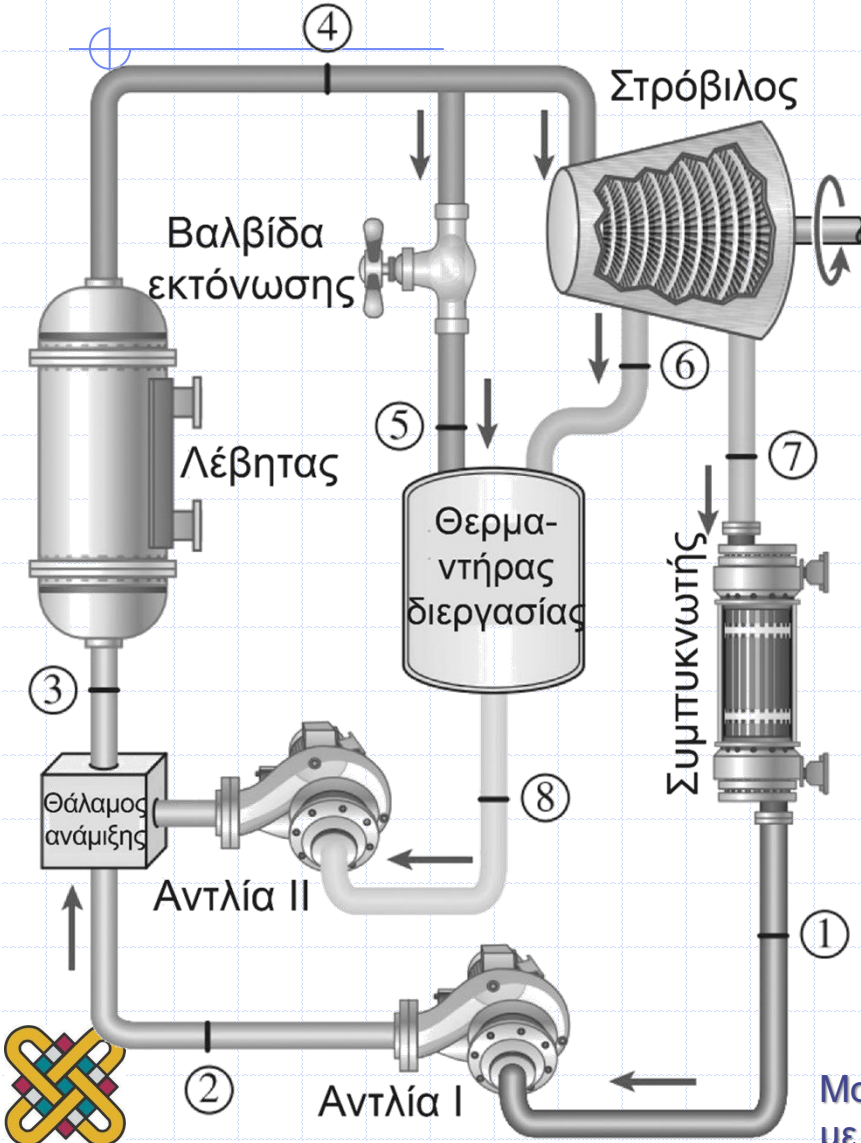
- ❑ Ο συντελεστής φορτίου ενός ιδανικού κύκλου συμπαγωγής είναι 100%.
- ❑ Οι τιμές του συντελεστή φορτίου σε πραγματικούς κύκλους συμπαγωγής είναι της τάξης του 80%.
- ❑ Κάποιοι πιο σύγχρονοι κύκλοι συμπαγωγής χαρακτηρίζονται από ακόμα υψηλότερους συντελεστές φορτίου.

Ιδανική μονάδα συμπαγωγής ηλεκτρισμού & θερμότητας





# Συμπαγωγή...



□ Όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση για θερμότητα διεργασίας, όλος ο ατμός κατευθύνεται προς τους θερμαντήρες διεργασίας και καθόλου προς το συμπυκνωτή ( $m_7 = 0$ ). Έτσι, η απορριπτόμενη θερμότητα μηδενίζεται.

□ Αν αυτό δεν είναι αρκετό, ένα μέρος του ατμού μετά το λέβητα στραγγαλίζεται σε μια εκτονωτική βαλβίδα μέχρι πίεσης  $P_6$  κι οδηγείται στο θερμαντήρα διεργασίας.

□ Η μέγιστη θερμότητα διεργασίας επιτυγχάνεται όταν όλος ο ατμός διοχετεύεται μέσω της εκτονωτικής βαλβίδας ( $m_5 = m_4$ ). Σε αυτήν την περίπτωση, δεν παράγεται καθόλου ισχύς.

□ Όταν δεν υπάρχει ζήτηση θερμότητας διεργασίας, όλος ο ατμός οδηγείται στον ατμοστρόβιλο και μετά στο συμπυκνωτή ( $m_5 = m_6 = 0$ ) κι η συμπαγωγή λειτουργεί σαν ένα απλό ατμοηλεκτρικό κύκλωμα.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_7(h_7 - h_1)$$

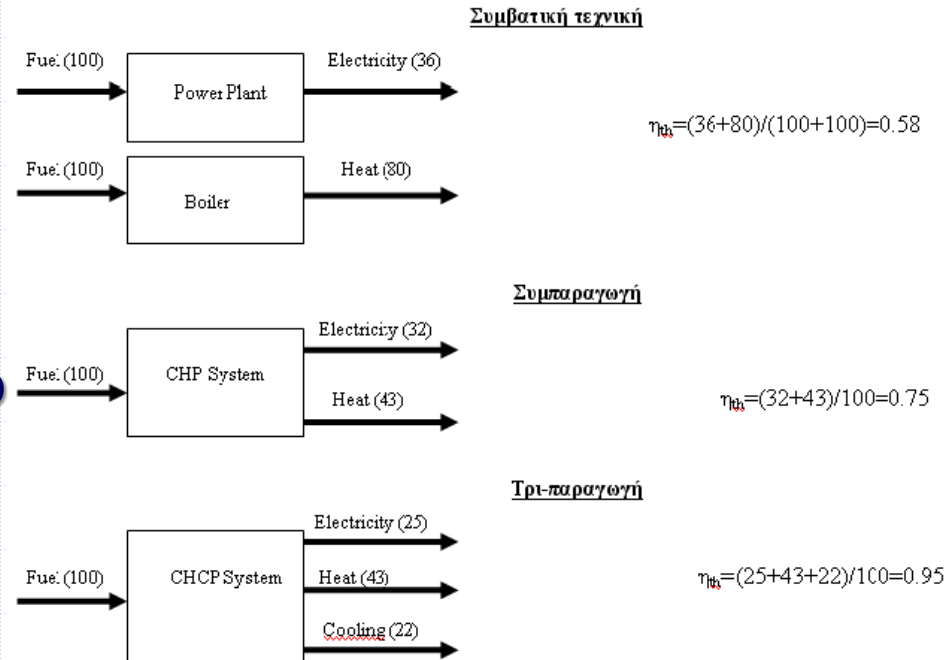
$$\dot{Q}_p = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_8 h_8$$

$$\dot{W}_{turb} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5)(h_4 - h_6) + \dot{m}_7(h_6 - h_7)$$

Μονάδα συμπαγωγής  
με ρυθμιζόμενα φορτία

# Συμπαραγωγή...

- ❑ Σε έναν συμβατικό θερμοηλεκτρικό σταθμό, μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται στο περιβάλλον, είτε μέσω ψυκτικών κυκλωμάτων, είτε μέσω των καυσαερίων
- ❑ Η τεχνολογία ΣΗΘ αξιοποιεί το μεγαλύτερο μέρος της απορριπτόμενης θερμότητας
- ❑ Η συνολική απόδοση των ολοκληρωμένων συστημάτων να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των μεμονωμένων συστημάτων



# Συμπαγωγή...

- ❑ Αποδοτικότερα είναι τα ΣΗΘ (απόδοση  $>80\%$ ) είναι εκείνα που καλύπτουν μεγάλη θερμική ζήτηση με ταυτόχρονη παραγωγή σχετικά μικρότερης ηλεκτρικής ισχύος
- ❑ Η αύξηση της θερμοκρασίας της ανακτώμενης θερμότητας αυξάνει τον λόγο της παραγόμενης ισχύος προς την θερμότητα
- ❑ Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει καθοριστικά την οικονομικότητα των ΣΗΘ, καθώς είναι τεχνικά ευκολότερη η διάθεση της
- ❑ Η αυξημένη απόδοση των ΣΗΘ, οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων, τόσο κατά την ηλεκτροπαραγωγή, όσο και κατά την εξόρυξη ορυκτών καυσίμων
- ❑ Οι ΣΗΘ έχουν αυξημένη αξιοπιστία και διαθεσιμότητα καθώς έχουν μειωμένες ανάγκες συντήρησης



# Συμπαγωγή...

- ❑ Τα πλεονεκτήματα των ΣΗΘ που συνέβαλλαν στην διείσδυση τους είναι:
  - ✓ Συνεχής παροχή ζεστού νερού
  - ✓ Κατάργηση του εποχικού οικιακού ανεφοδιασμού με καύσιμα
  - ✓ Αποσύνδεση του κόστους της τηλε-θέρμανσης/τηλε-ψύξης από τις τιμές του πετρελαίου
  - ✓ Ευκολότερη πληρωμή των λογαριασμών
- ❑ Η εγκατάσταση ενός μεμονωμένου συστήματος συμπαγωγής σε κατοικημένες περιοχές προϋποθέτει:
  - ✓ Επιλογή τεχνολογίας χαμηλών εκπομπών ρύπων
  - ✓ Επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης
  - ✓ Εγκατάσταση εξοπλισμού ελέγχου και περιορισμού ρύπων
  - ✓ Ελαστική έδραση και ηχομόνωση
  - ✓ Καμινάδα μεγαλύτερου ύψους από τα κτίρια
  - ✓ Εγκατάσταση μέσων συλλογής και αποκομιδής των στερεών και υγρών αποβλήτων



# Συμπαραγωγή...

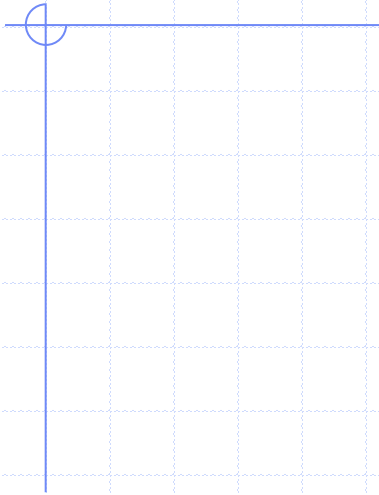
- ❑ Για τα συστήματα συμπαραγωγής υπάρχουν δύο γενικοί χαρακτηρισμοί:
  - ✓ Συστήματα "**κορυφής**" (topping systems)
  - ✓ Συστήματα "**βάσης**" (bottoming systems)
- ❑ Στα συστήματα "**κορυφής**", ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η αποβαλλόμενη θερμότητα (χαμηλής θερμοκρασίας) χρησιμοποιείται σε θερμικές διεργασίες (θέρμανση, πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια)
- ❑ Στα συστήματα "**βάσης**" αρχικά παράγεται θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας, και κατόπιν τα θερμά αέρια οδηγούνται σε HRSG όπου παράγεται ατμός που κινεί την γεννήτρια (εναλλακτικά τα θερμά αέρια μπορεί να οδηγούνται σε αεριοστρόβιλο, χωρίς την παρεμβολή HRSG)



# Συμπαραγωγή...

- Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής είναι:
  - ✓ Συστήματα ατμοστροβίλων
  - ✓ Συστήματα αεριοστροβίλου ανοιχτού ή κλειστού κύκλου
  - ✓ Συστήματα συνδυασμένου κύκλου
  - ✓ Συστήματα με εμβολοφόρο μηχανή εσωτερικής καύσης
  - ✓ Κύκλοι βάσης Rankine με οργανικά ρευστά
  - ✓ Κυψέλες καυσίμου
  - ✓ Μηχανές Stirling
- Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μιας μονάδας συμπαραγωγής ορίζεται ως το άθροισμα του ωφέλιμου έργου και της χρήσιμης παραγόμενης θερμότητας, ανά μονάδα παροχής μάζας





***Τεχνικές  
συμπαράγωγής...***



# Τεχνικές συμπαγωγής...

- Οι κυριότεροι τρόποι λειτουργίας (modes) ενός συστήματος συμπαγωγής, δηλαδή οι τρόποι ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή είναι:
  - ✓ **Κάλυψη θερμικού φορτίου** (heat match): η παραγόμενη ωφέλιμη θερμότητα είναι ίση με την ζήτηση θερμικού φορτίου, ενώ τυχόν πλεονάζουσα (ελλείπουσα) ηλεκτρική ενέργεια διατίθεται (αγοράζεται) στο (από το) δίκτυο
  - ✓ **Κάλυψη θερμικού φορτίου βάσης**: το σύστημα ΣΗΘ παρέχει την ελάχιστη απαιτούμενη θερμική ενέργεια, τυχόν αιχμές ζήτησης καλύπτονται από εφεδρικούς λέβητες ή καυστήρες, ενώ ο κύριος κινητήρας της μονάδας λειτουργεί πάντα με πλήρες φορτίο (το δίκτυο καλύπτει τυχόν πλεονάζουσα ή ελλείπουσα ηλεκτρική ενέργεια)
  - ✓ **Κάλυψη ηλεκτρικού φορτίου** (electricity match): η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση με το ηλεκτρικό φορτίο, τυχόν έλλειμμα θερμικής ενέργειας καλύπτεται από βοηθητικό λέβητα, ενώ η πλεονάζουσα είτε απορρίπτεται είτε διατίθεται σε πελάτες

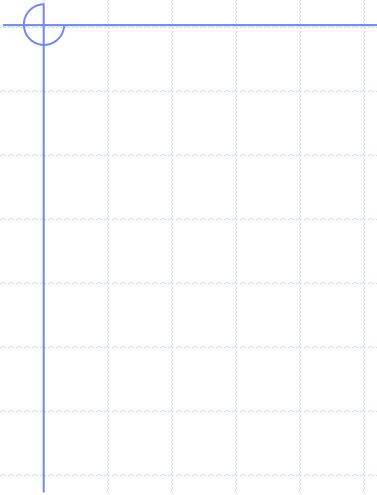




# Τεχνικές συμπαραγωγής...

- ✓ **Κάλυψη ηλεκτρικού φορτίου βάσης:** η μονάδα ΣΗΘ ικανοποιεί την ελάχιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, οι πρόσθετες ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτονται από το δίκτυο, οι ανάγκες σε θερμότητα καλύπτονται από το ΣΗΘ ή πρόσθετους λέβητες, ενώ τυχόν πλεόνασμα θερμότητας διατίθεται σε πελάτες
- ✓ **Μεικτός τρόπος:** ανάλογα με την χρονική περίοδο καλύπτεται είτε η ζήτηση σε θερμικό φορτίο, είτε σε ηλεκτρικό φορτίο, ανάλογα με τα επίπεδα ζήτησης, την τιμή των καυσίμων και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας
- ✓ **Αυτόνομη λειτουργία:** πλήρης κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων σε κάθε χρονική στιγμή, χωρίς σύνδεση στο δίκτυο, γεγονός που απαιτεί διαθεσιμότητα θερμικής και ηλεκτρικής εφεδρείας





***Τρι-παραγωγή...***



# Τρι-παραγωγή...

- ❑ Ως "**τρι-παραγωγή**" (tri-generation) ορίζεται η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ψύξης
- ❑ Ο περιορισμένος χρόνος λειτουργίας των συμπαραγωγικών μονάδων σε περιοχές με θερμό κλίμα (Νότια Ευρώπη, Μέση και Άπω Ανατολή, Νότιες ΗΠΑ κλπ.) καθιστά την επένδυση ασύμφορη
- ❑ Η τρι-παραγωγή ενέργειας διευρύνει σημαντικά τον χρόνο λειτουργίας των μονάδων και τις καθιστά βιώσιμες οικονομικά
- ❑ Η τρι-παραγωγή είναι επέκταση της συμπαραγωγής και, πρακτικά, πραγματοποιείται με την προσθήκη ψυκτών απορρόφησης (absorption chillers), σε μια συμπαραγωγική μονάδα
- ❑ Οι ψύκτες απορρόφησης μετατρέπουν την θερμότητα σε ψύξη, με βαθμό απόδοσης από 0,6 ως 0,8 για ψύκτες ενός σταδίου (single effect), ενώ μπορεί να φθάσει στο 1,6 για ψύκτες δύο σταδίων (double effect)
- ❑ Οι μονάδες συμπαραγωγής λειτουργούν με στρατηγική πλήρους κάλυψης είτε των θερμικών/ψυκτικών είτε ηλεκτρικών φορτίων



# Τρι-παραγωγή...

- ❑ Για την κάλυψη των αναγκών απομακρυσμένων καταναλωτών απαιτείται δίκτυο τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης (district heating /cooling)
- ❑ Η συνδυασμένη χρήση του δικτύου διανομής για θέρμανση και ψύξη βελτιώνει την αποδοτικότητα της επένδυσης. Συγκεκριμένα, σύστημα τρι-παραγωγής καλείται να καλύψει τις ανάγκες ενός συστήματος σε ηλεκτρισμό, θέρμανση και ψύξη:
  - ✓ Η αναλογία του παραγόμενου ηλεκτρισμού προς την θερμότητα/ψύξη [ $H / (\Theta\Psi)$ ] είναι δεδομένη
  - ✓ Η κάλυψη επακριβώς και κάθε χρονική στιγμή όλων των φορτίων δεν είναι εφικτή, καθώς ο λόγος  $H / (\Theta\Psi)$  είναι σταθερός, ενώ ο λόγος των ενεργειακών απαιτήσεων όχι
  - ✓ Η περίσσεια ή το έλλειμμα ηλεκτρικών φορτίων καλύπτεται από αγορά ή πώληση, από ή προς το δίκτυο
  - ✓ Το έλλειμμα θερμότητας από βοηθητικό λέβητα, ενώ η περίσσεια θερμότητας είτε καλύπτει τα ψυκτικά φορτία (μέσω ψύκτη απορρόφησης), είτε απορρίπτεται στο περιβάλλον είτε αποθηκεύεται σε δοχείο αδράνειας
  - ✓ Το τυχόν έλλειμμα ψύξης καλύπτεται από συμβατικό ηλεκτρικό σύστημα ψύξης



***Εφαρμογές τρι-παραγωγής  
– συμπαραγωγής...***



# Εφαρμογές τρι-παραγωγής / συμπαραγωγής...

- ❑ Η ΣΗΘ/ΣΗΘΨ δεν περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη τεχνολογία, αλλά περισσότερο μια εφαρμογή τεχνολογιών για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης ή/και ψύξης, καθώς και μηχανική ή/και ηλεκτρική ενέργεια
- ❑ Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τομείς εφαρμογής της συμπαραγωγής:
  - ❑ **Βιομηχανικός τομέας:**
    - ✓ Διεργασίες χαμηλών θερμοκρασιών ( $< 100^{\circ}\text{C}$ )
    - ✓ Διεργασίες μέσων θερμοκρασιών ( $100^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ )
    - ✓ Διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών ( $300^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$ )
    - ✓ Διεργασίες πολύ υψηλών θερμοκρασιών ( $> 700^{\circ}\text{C}$ )



# Εφαρμογές τρι-παραγωγής / συμπαγωγής...

- Η εγκατάσταση συμπαγωγής στην βιομηχανία είναι συμφέρουσα όταν:
  - ✓ Ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα βρίσκεται εντός κατάλληλων ορίων
  - ✓ Οι καμπύλες θερμικού/ψυκτικού και ηλεκτρικού φορτίου δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση (διαφορά φάσης)
  - ✓ Το σύστημα συμπαγωγής πρόκειται να λειτουργεί επί αρκετές ώρες το έτος (δεν μπορούν να διατυπωθούν γενικοί κανόνες)
  - ✓ Η διάρκεια λειτουργίας είναι μεγαλύτερη από 400 h/y



# Εφαρμογές τρι-παραγωγής / συμπαγωγής...

- ❑ **Εμπορικός – κτιριακός τομέας:** (αεροδρόμια, νοσοκομεία, ξενοδοχεία κλπ.) για θέρμανση/κλιματισμό και ηλεκτρισμό
- ❑ **Εθνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας**
  - ✓ Μετατροπή υφιστάμενων μονάδων σε συμπαγωγικές
  - ✓ Εφαρμογές τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης
- ❑ **Αγροτικός τομέας**
  - ✓ Όχι ιδιαίτερα διαδεδομένη
  - ✓ Δυνατότητα αξιοποίησης αγροτικών υπολειμμάτων ως καύσιμα
  
- ❑ Η συμπαγωγή/τριπαραγωγή ενδείκνυται για μεγάλους καταναλωτές, με σχετικά σταθερές ανάγκες και με 24ωρη λειτουργία





ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

