



“Energy resources: Technologies & Management”

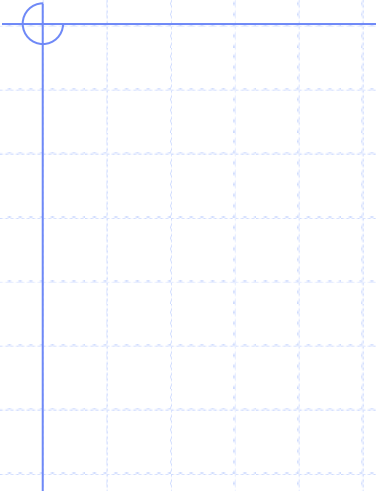
**Θερμοδυναμικοί κύκλοι
παραγωγής ισχύος με ατμό**

Αν. Καθηγητής Γ. Σκόδρας

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
- ❑ Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής





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...

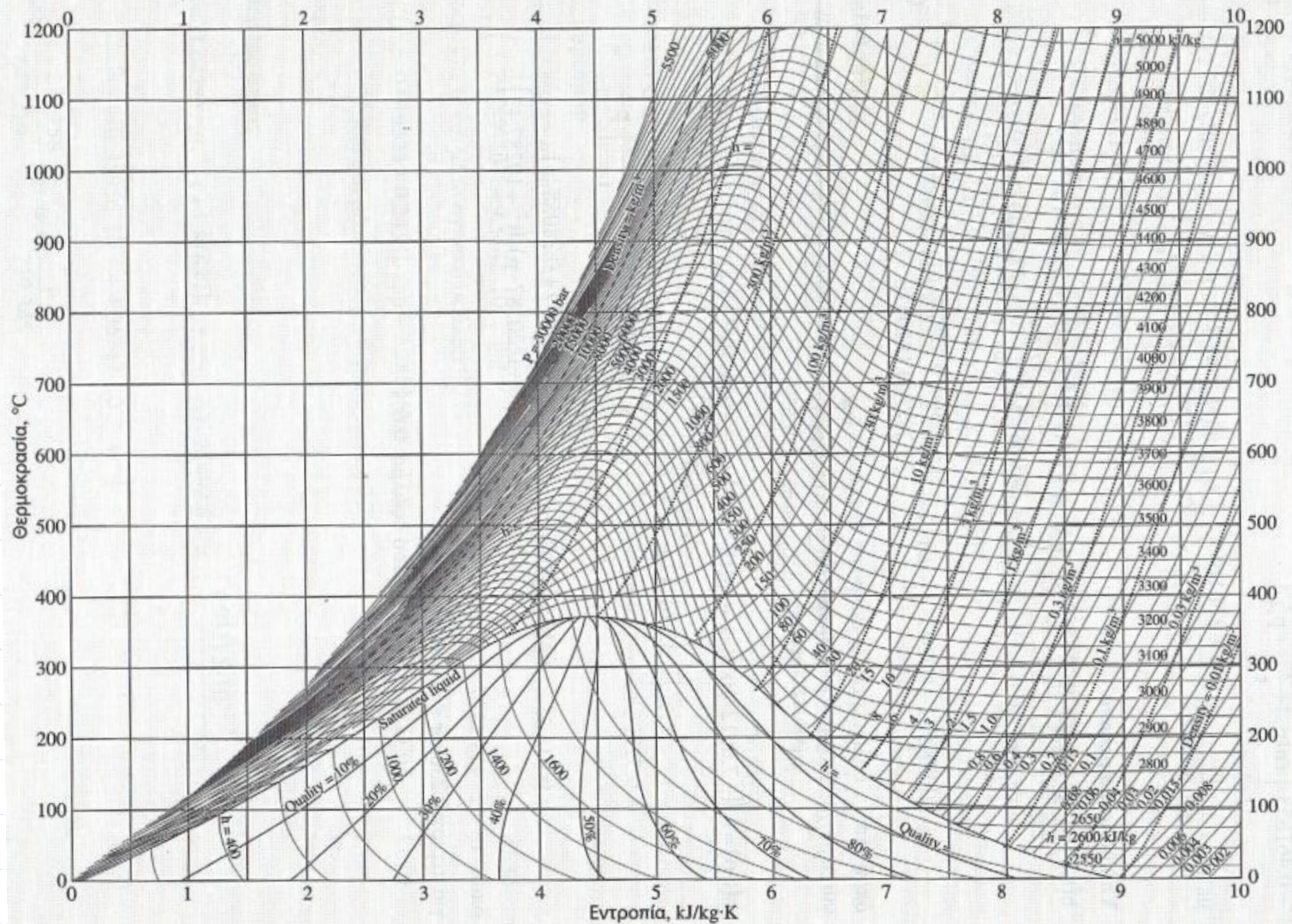
Ο υπολογισμός των πραγματικών ιδιοτήτων του νερού και του ατμού γίνεται με τρεις τρόπους:

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



Ορισμοί...

☐ Χρήση διαγραμμάτων



Χρήση πινάκων

		Specific Volume (m ³ /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 _{sat} (kPa)	v _f	v _g	u _f	u _{fg}	u _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f	s _{fg}	s _g
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

✓ 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°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:

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

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

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

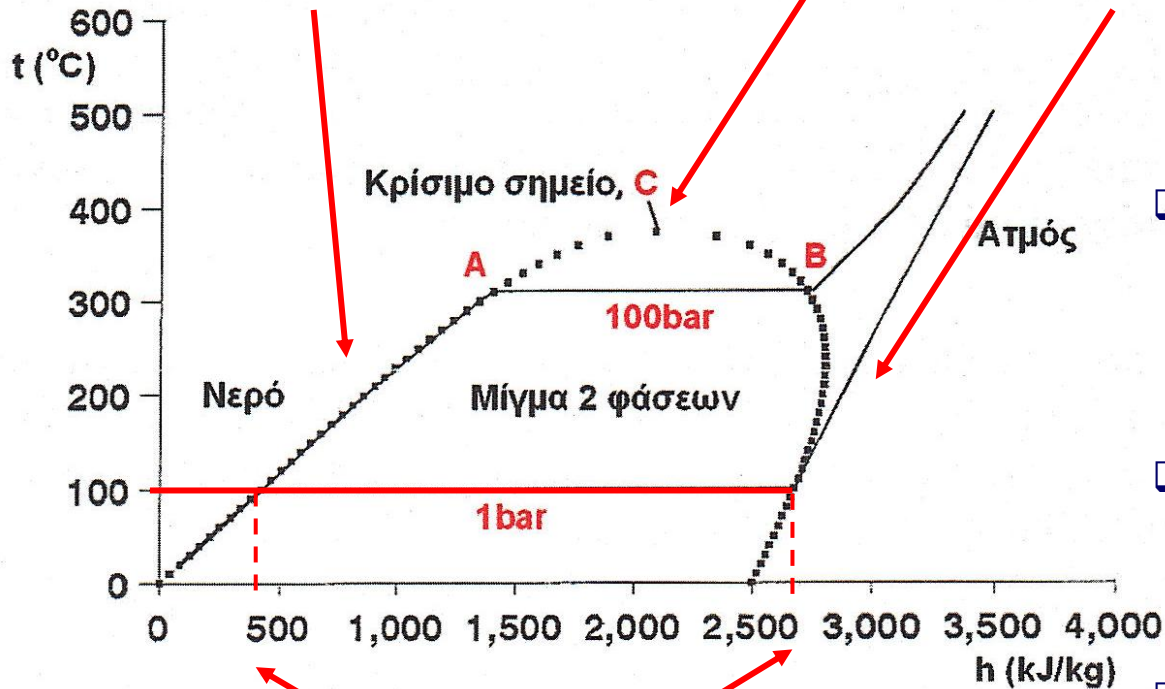


Ορισμοί...

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 ενθαλπίας της υγρής φάσης και της φάσης του ατμού:

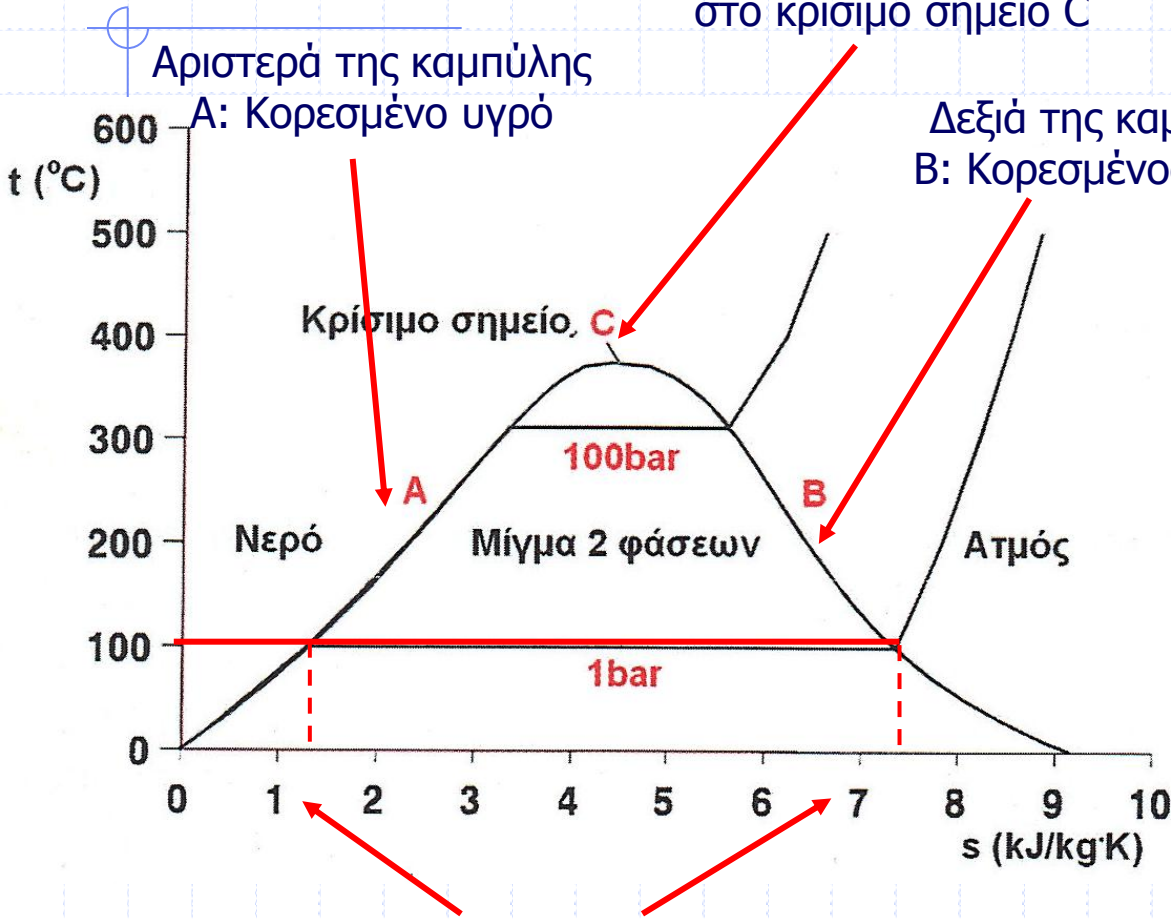
$$s_{\text{mix}} = X \cdot s_{\text{sat,steam}} + (1 - X) \cdot s_{\text{sat,water}} \Rightarrow$$

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



Ορισμοί...

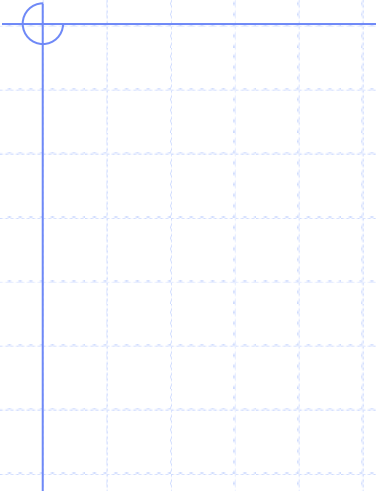
Τα τμήματα A και B τέμνονται
στο κρίσιμο σημείο C



- ❑ 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 εναλλακτικά εξατμίζεται και συμπυκνώνεται
- ❑ 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 ενθαλπία εξατμισμού, υψηλή διαθεσιμότητα, χαμηλό κόστος κλπ.



Κύκλοι ισχύος με ατμό...

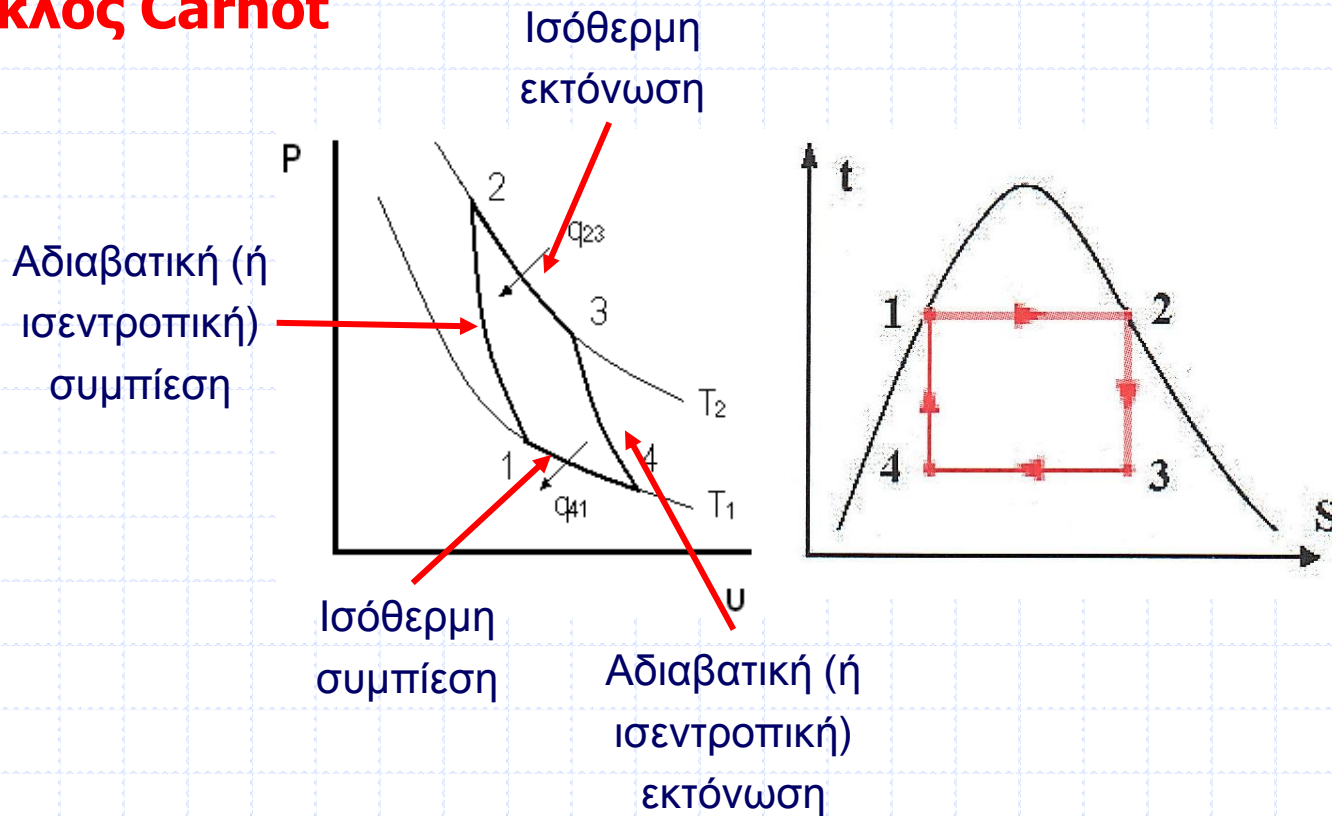
Κύκλος *Carnot*

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



Κύκλοι ισχύος με ατμό...

Κύκλος Carnot



Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- Ο κύκλος Carnot παρουσιάζει τον καλύτερο 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 η μιας θερμικής μηχανής Carnot

Θερμοκρασία
σε Kelvin

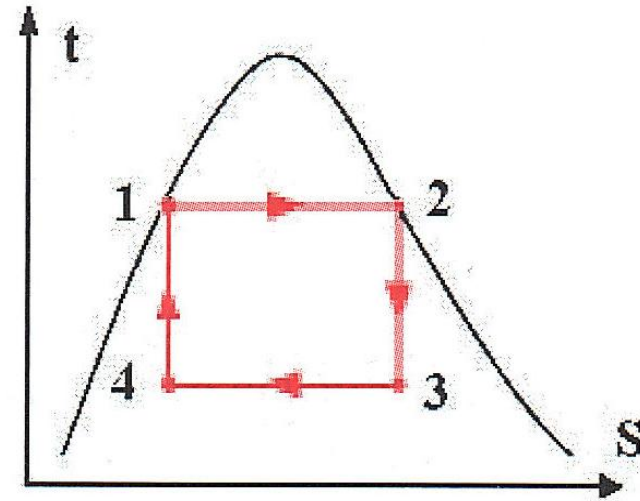
- Για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση πρέπει η ελάχιστη θερμοκρασία (θερμοκρασία ψυχρής δεξαμενής) να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία (θερμοκρασίας της θερμής δεξαμενής) πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη



Κύκλοι ισχύος με ατμό...

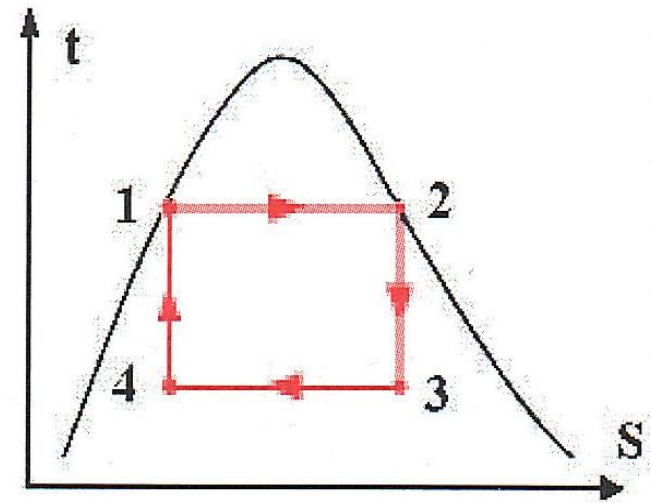
Ο κύκλος Carnot παρουσιάζει τεχνικά προβλήματα και γι' αυτό δεν χρησιμοποιείται στην πράξη:

- ❑ 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 (374°C))
- ❑ Ο περιορισμός της μέγιστης θερμοκρασίας περιορίζει την θερμική απόδοση του κύκλου



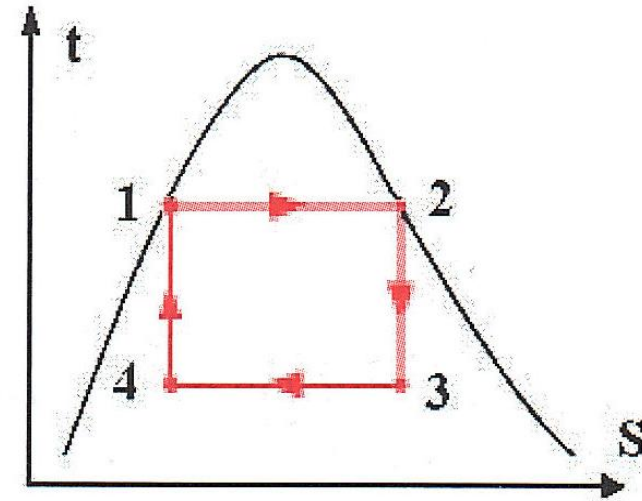
Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- ❑ 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 είναι στην υγρή φάση μόνο, με συνέπεια να απαιτεί σημαντικό ποσό ισχύος



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)

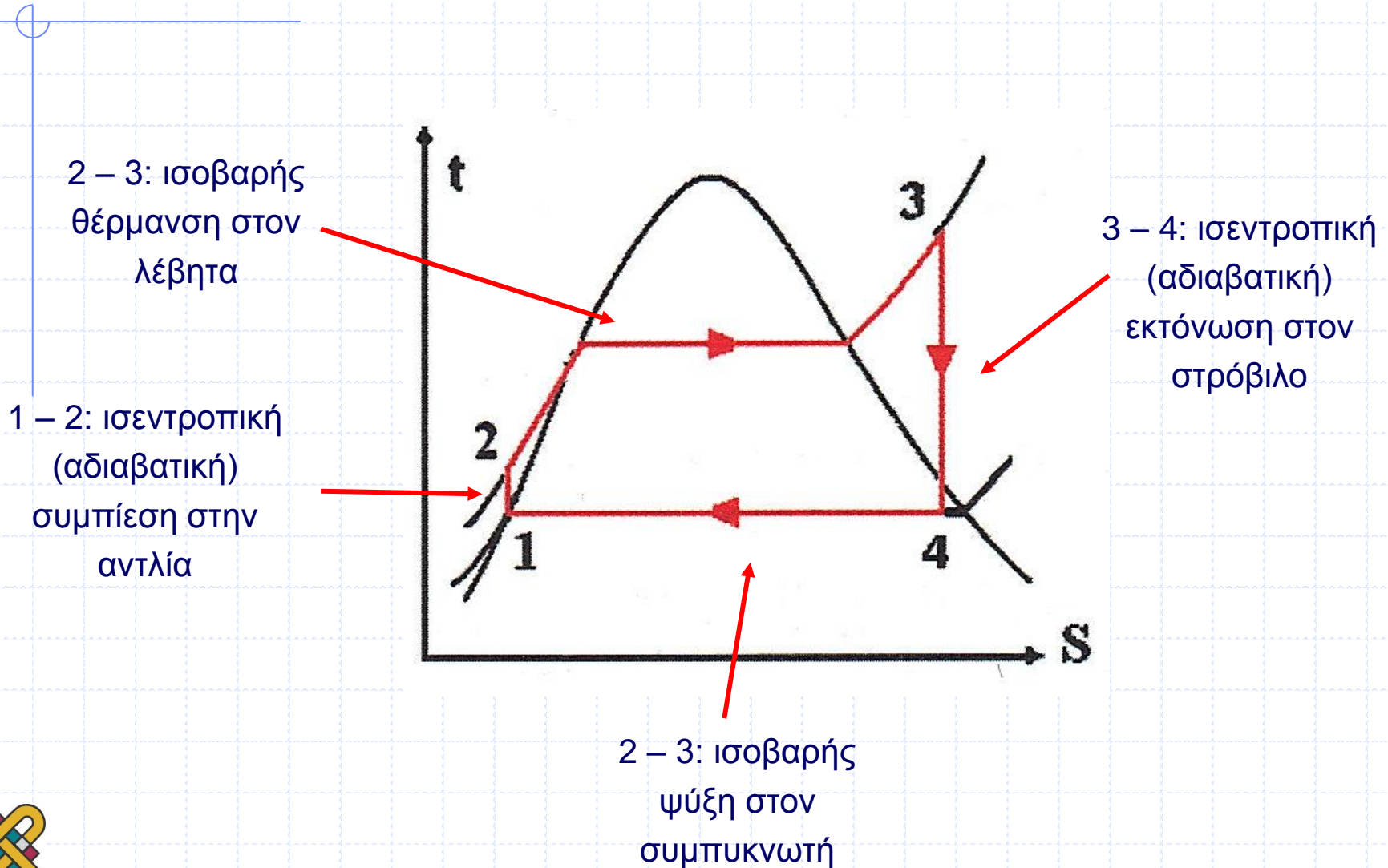


Κύκλοι ισχύος με ατμό...

- ❑ 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...

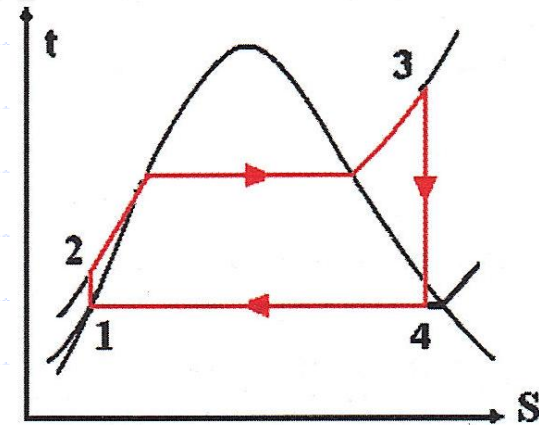


Κύκλοι ισχύος με ατμό...

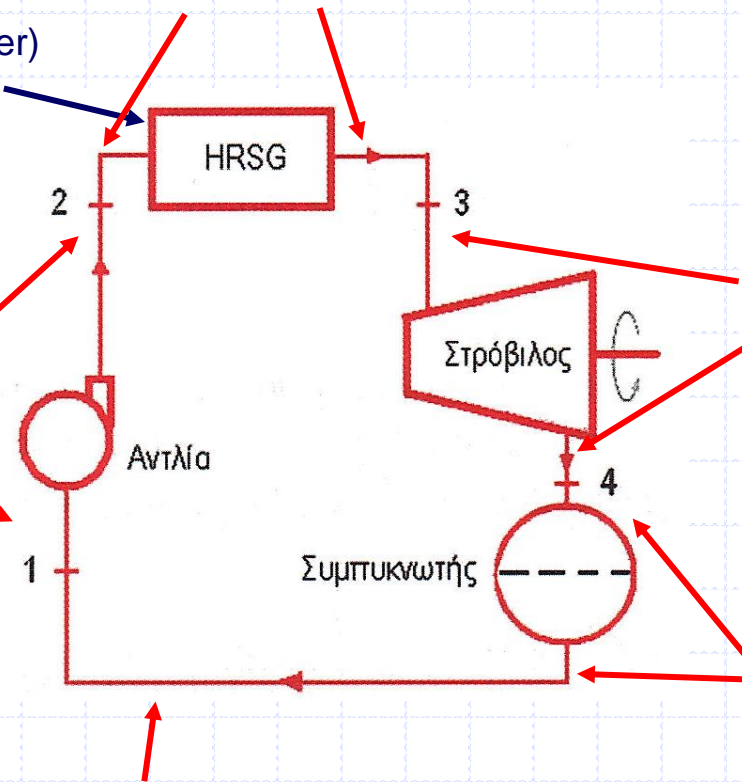
Γεννήτρια ατμού, HRSG (λέβητας) που είναι εναλλάκτης πολλαπλών σταδίων αποτελούμενος από:

- ✓ 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 συμπυκνωτής λειτουργούν ισεντροπικά



Κύκλοι ισχύος με ατμό...

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

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

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

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

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

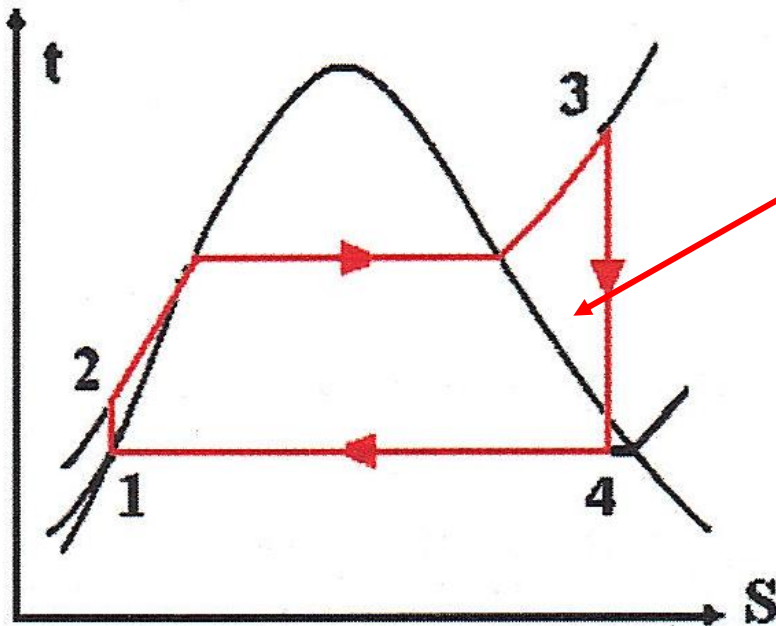
- Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine ορίζεται από την σχέση:

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

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



Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...



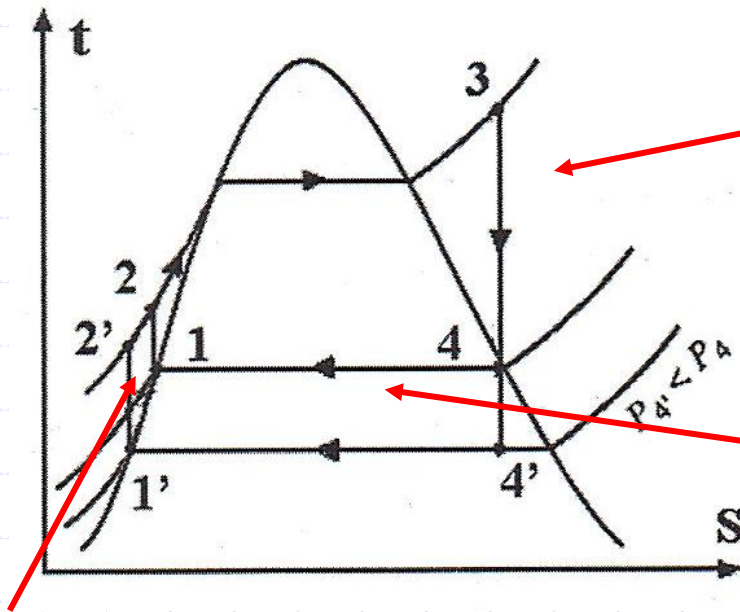
Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- ❑ 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



Διαμορφώσεις του κύκλου 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

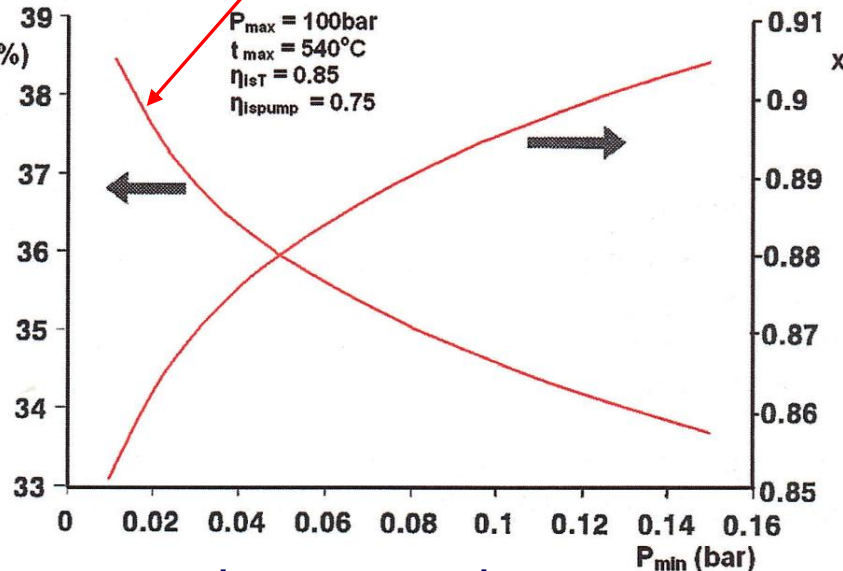
Αποτέλεσμα της μείωσης της πίεσης του συμπυκνωτή είναι η αύξηση της θερμικής απόδοσης του κύκλου



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



Επίδραση της μείωσης της πίεσης του συμπυκνωτή στην απόδοση του κύκλου

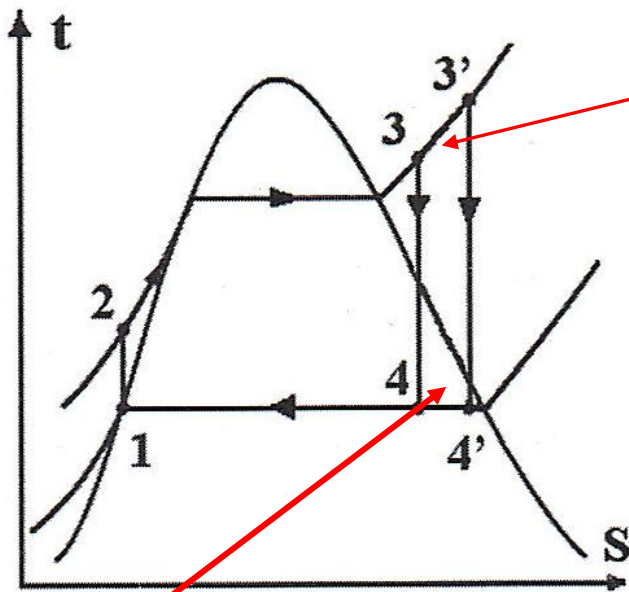
- Οι συμπυκνωτές λειτουργούν αρκετά κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση, με όριο τα 0,05 bar
- Πιθανά προβλήματα (α) εισροή αέρα και (β) αύξηση της υγρασίας στις τελευταίες βαθμίδες του στροβίλου
- Στην πράξη, οι πιέσεις των συμπυκνωτών κυμαίνονται από 0,035 bar, με την άμεση ψύξη στις Σκανδιναβικές χώρες,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

- 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



Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

□ Υψηλότερη θερμοκρασία υπερθέρμανσης του ατμού



- 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 αεριοστροβίλου
- 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

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

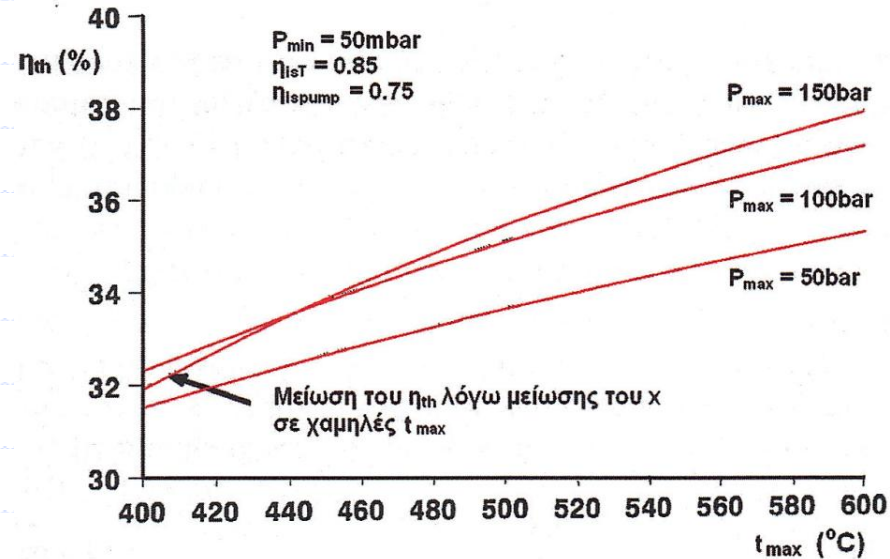
□ Αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης είναι η αύξηση της θερμικής απόδοσης του κύκλου

□ Επιπλέον μειώνεται η υγρασία του ατμού



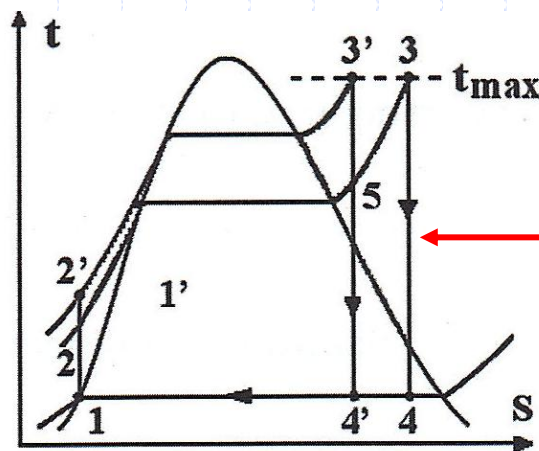
Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- 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°F), που είναι ένα κοινό όριο ερπυσμού για τους φερριτικούς χάλυβες για χρόνους των ~ 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

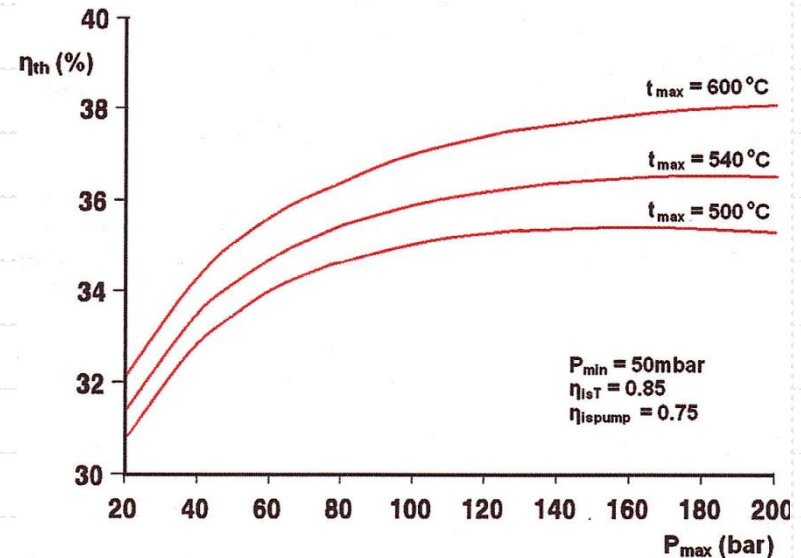


Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- ❑ **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



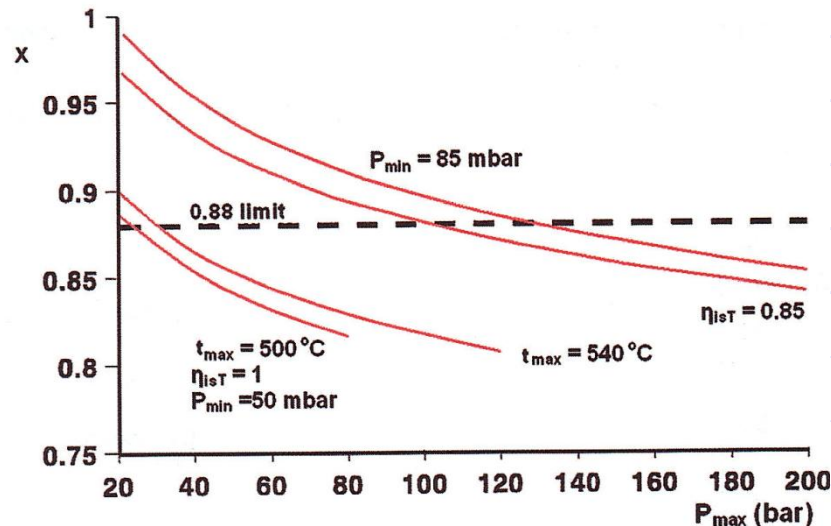
Η μείωση της θερμοκρασίας στον ατμοστρόβιλο μετατοπίζει τον κύκλο προς τα αριστερά και αυξάνεται η υγρασία στην έξοδο του στροβίλου (απαιτείται αναθέρμανση ατμού)



Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

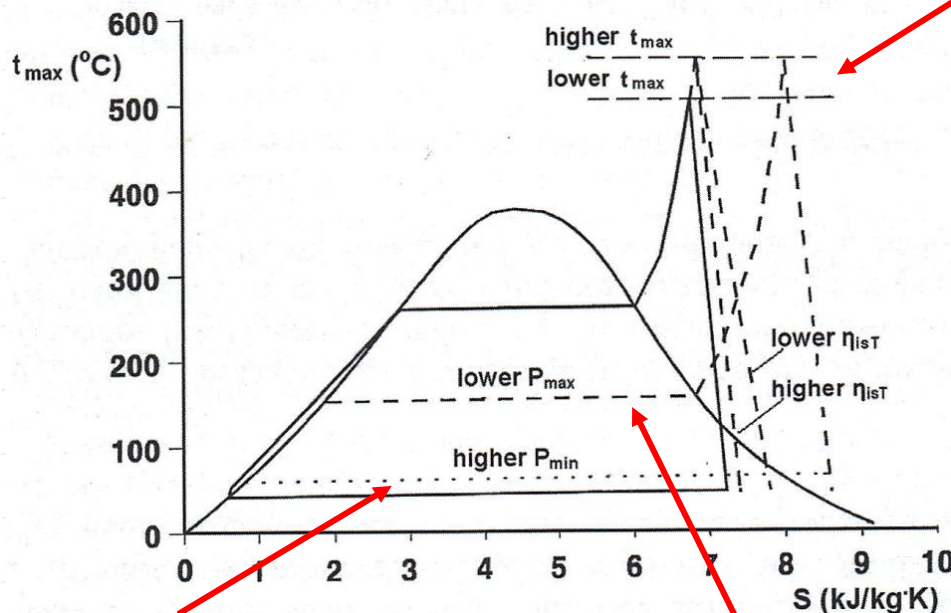
□ Αναθέρμανση

- 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 ατμοστρόβιλο
- 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)

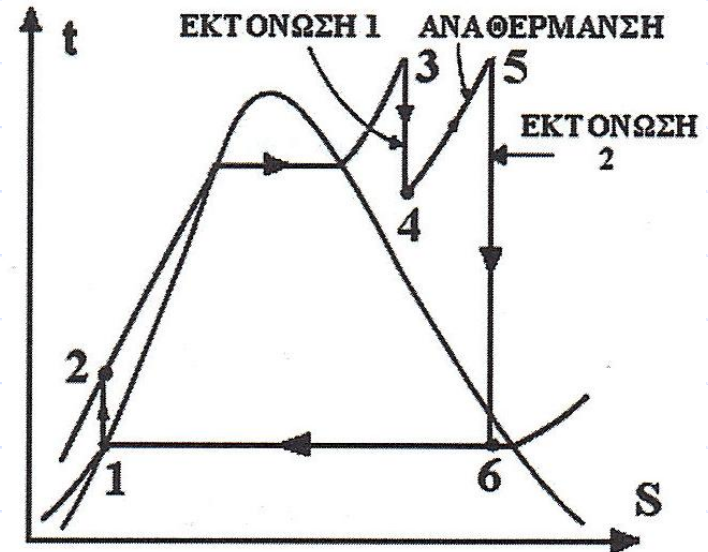


Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- 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:

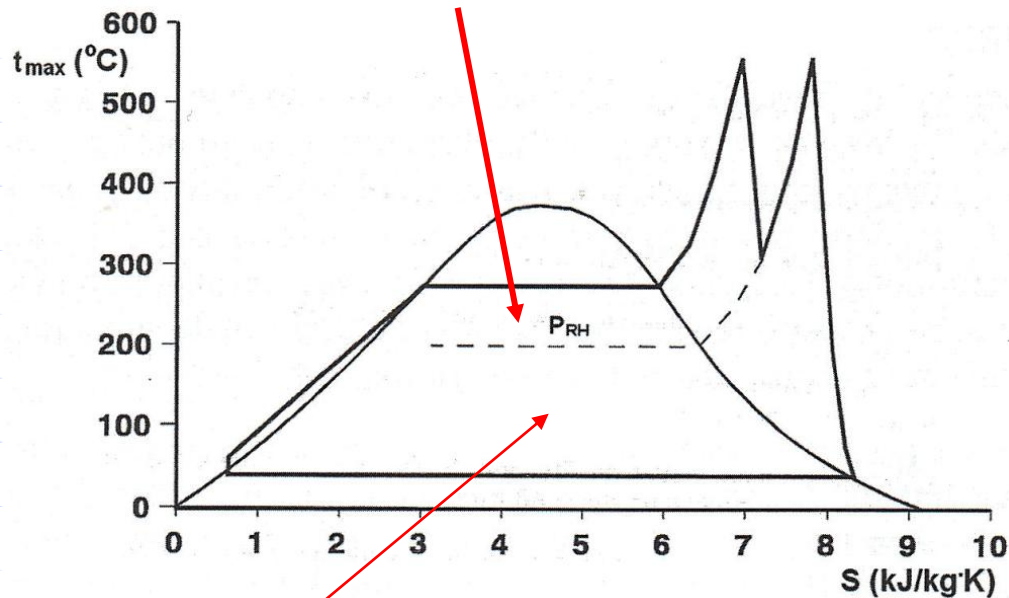
$$H_{HRSG} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

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



Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

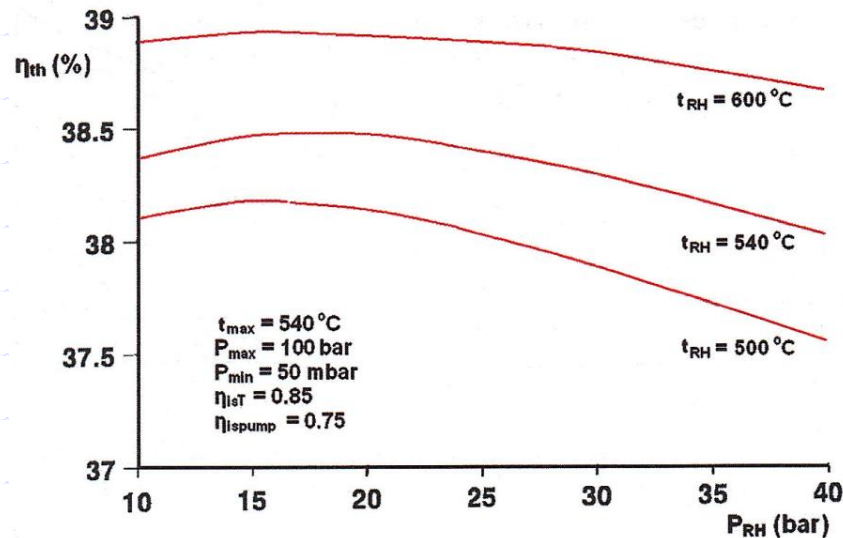
- Στον κύκλο με αναθέρμανση, ο ατμός εκτονώνεται σε μια ενδιάμεση πίεση, την **πίεση αναθέρμανσης P_{RH}** και έπειτα επιστρέφει στον HRSG πριν εκτονωθεί μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή



- 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...



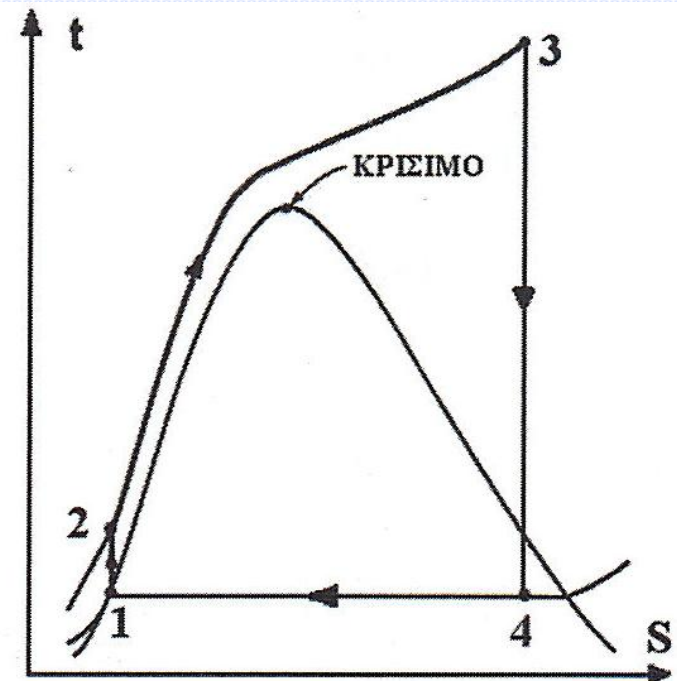
- Η επίδραση της θερμοκρασίας αναθέρμανσης είναι ίδια με εκείνη της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης (χρησιμοποιούνται υλικά ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες)
- Η απόδοση του κύκλου παρουσιάζει μέγιστο, για δεδομένη θερμοκρασία αναθέρμανσης (συνήθως 20 – 25% της μέγιστης πίεσης κύκλου)



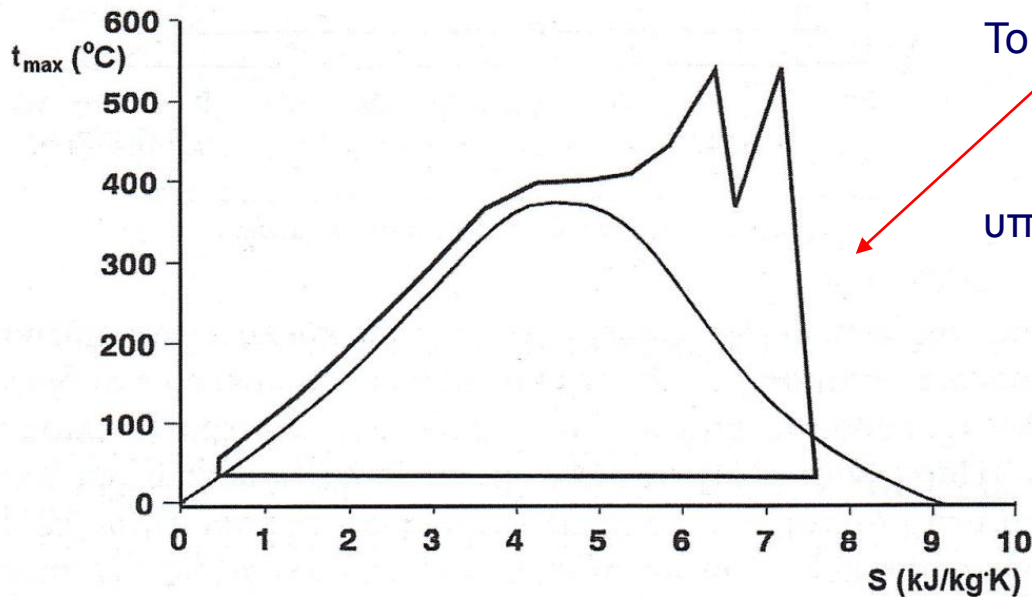
Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

□ 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



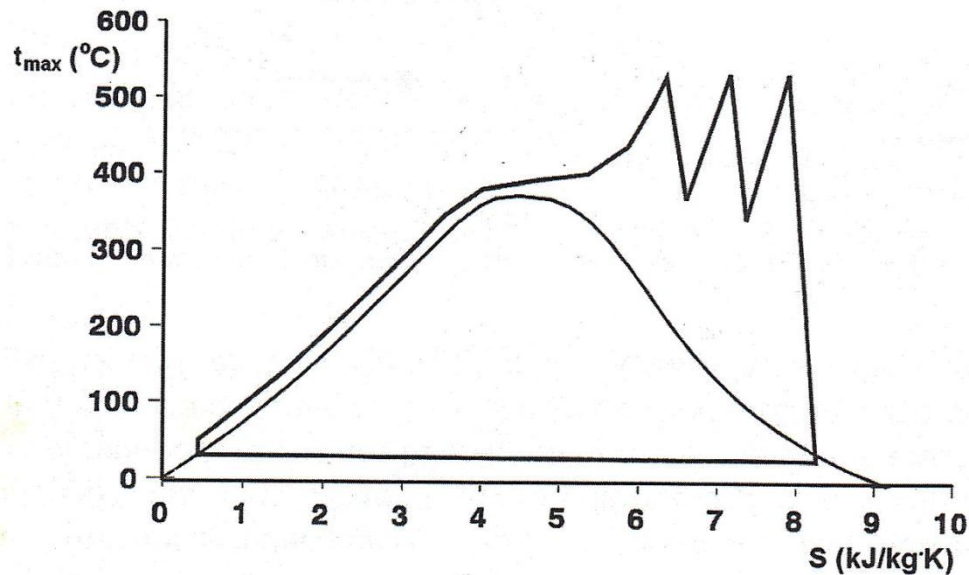
Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...



- ❑ 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...



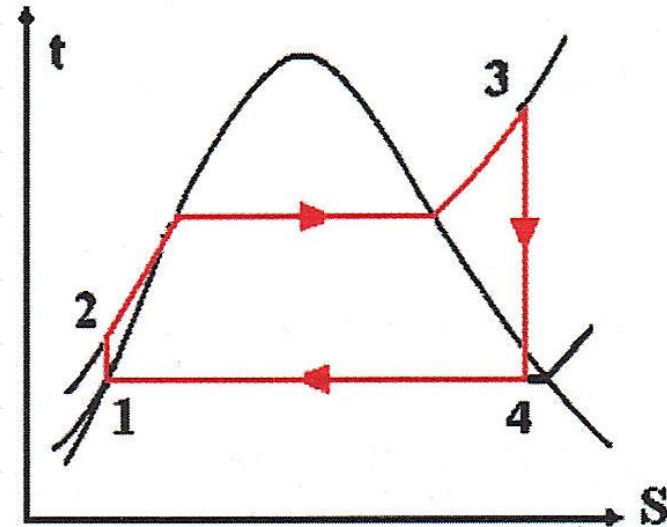
- ❑ Κρίνεται σκόπιμη η χρήση μέχρι δύο σταδίων αναθέρμανσης (διπλή αναθέρμανση)
- ❑ Η δεύτερη αναθέρμανση είναι υποδεέστερη ως προς την πρώτη, αναφορικά με την απόδοση, την ποιότητα ατμού και του ειδικού όγκου
- ❑ Η επιλογή διπλής αναθέρμανσης είναι οικονομικά βιώσιμη μόνο σε σταθμούς παραγωγής φορτίων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

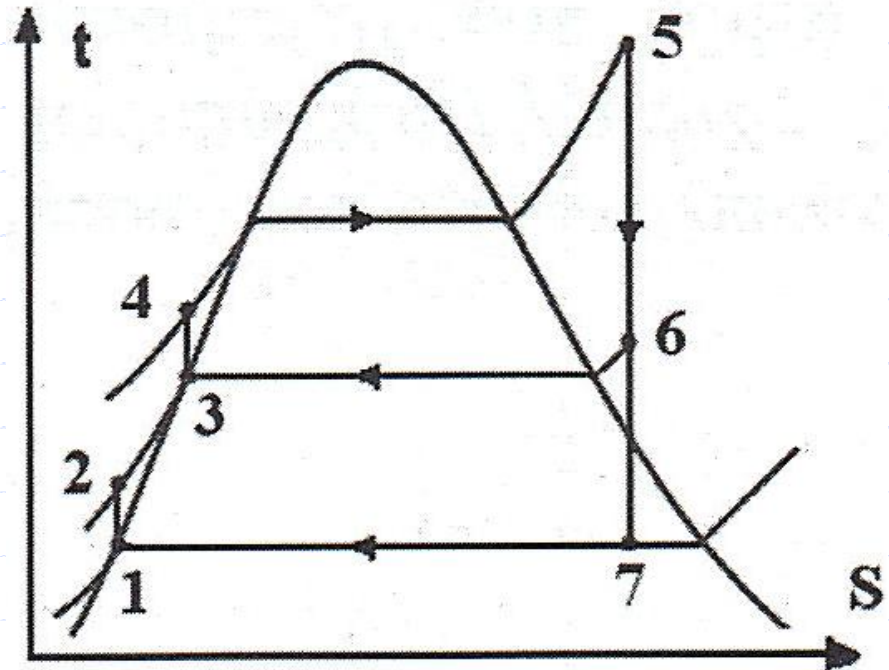
- ❑ Η αναγέννηση βελτιώνει τόσο την απόδοση, και επιπλέον:
 - ✓ Παρέχει ικανοποιητικά μέσα εξαέρωσης του νερού τροφοδοσίας (απομάκρυνση του αέρα) για να αποφευχθεί η διάβρωση
 - ✓ Βοηθά στον έλεγχο της μεγάλης ογκομετρικής παροχής του ατμού στα τελικά στάδια (βαθμίδες) του ατμοστροβίλου

- ❑ 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)



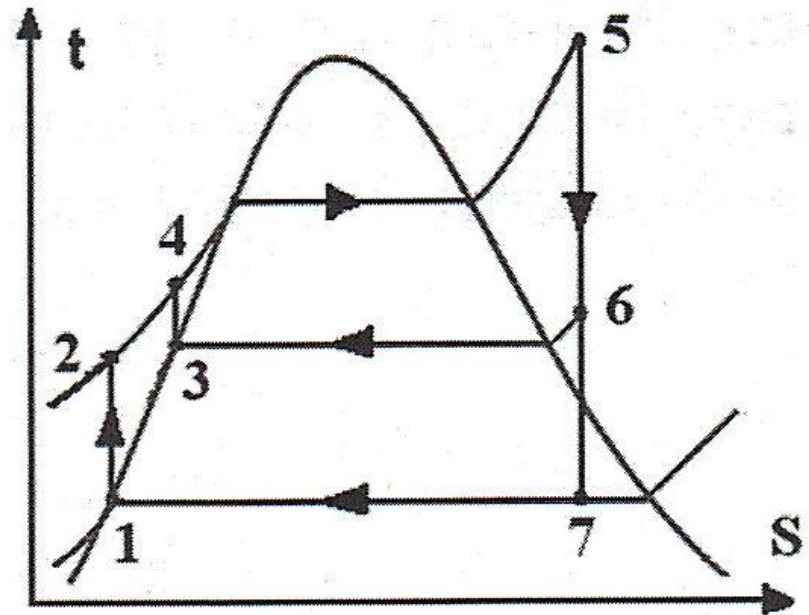
Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- ❑ Ο ανοιχτός θερμοαντάκτης 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 θερμοαντάκτηρα ως κορεσμένο υγρό στην πίεση του θερμοαντάκτηρα
- ❑ Οι ανοιχτοί θερμοαντάκτες είναι απλοί, φθηνοί και παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά μετάδοσης θερμότητας, και φέρνουν το νερό τροφοδοσίας στην κατάσταση κορεσμού



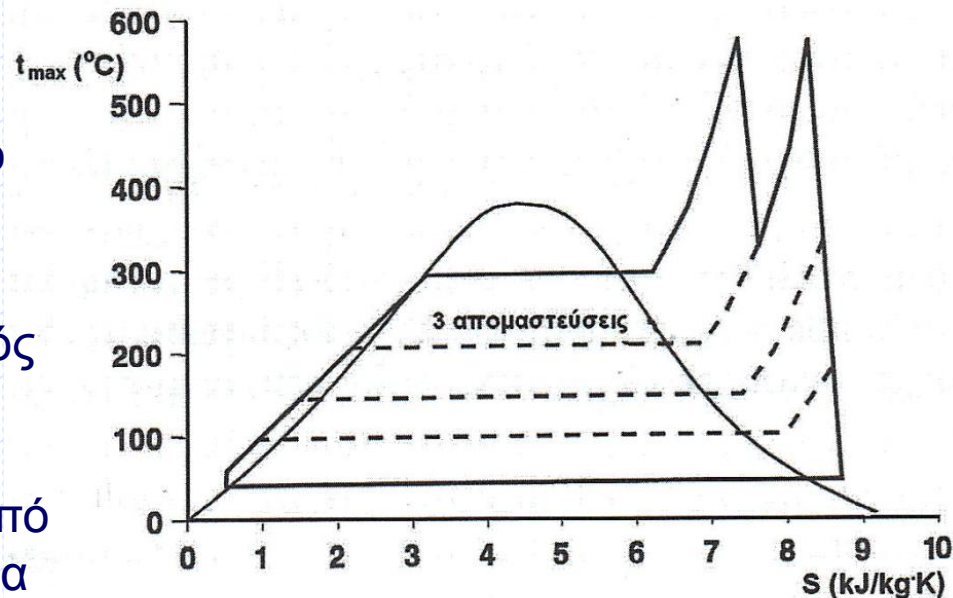
Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- ❑ 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



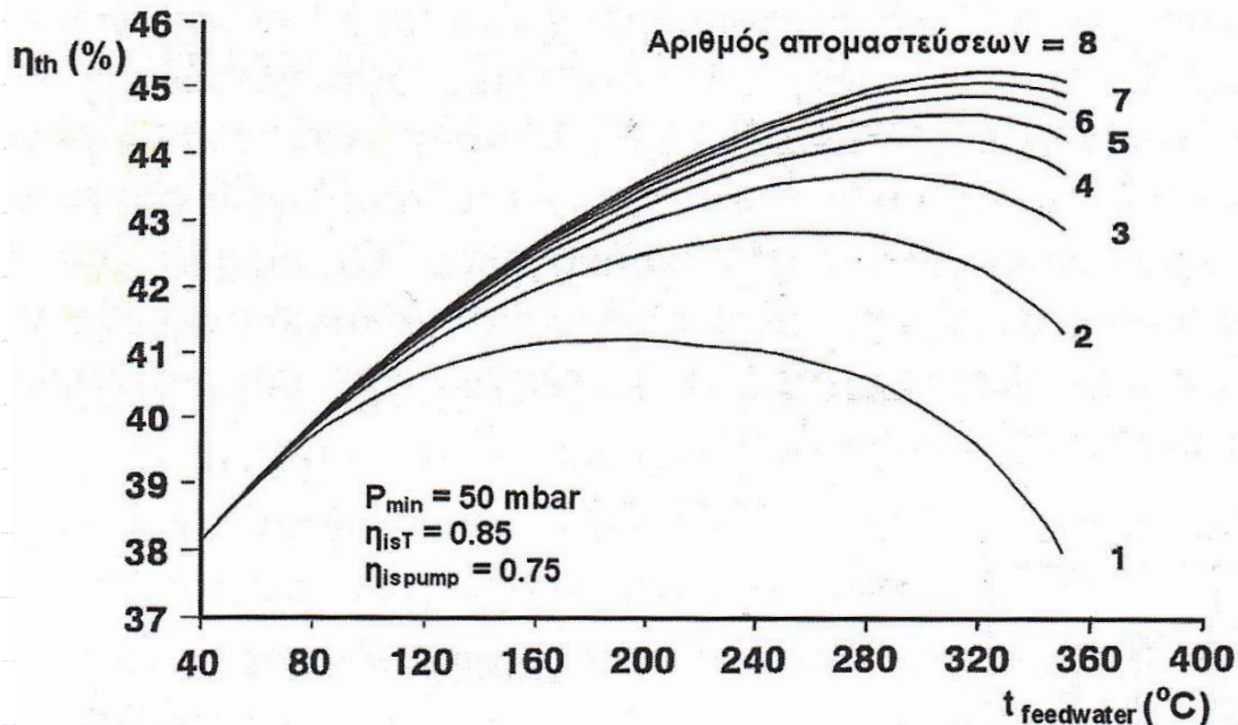
Διαμορφώσεις του κύκλου Rankine...

- 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



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 αμοστροβίλου)
 - ✓ Μείωση του φορτίου του συμπυκνωτή (δεν πηγαίνει όλος ο αμός στον συμπυκνωτή)

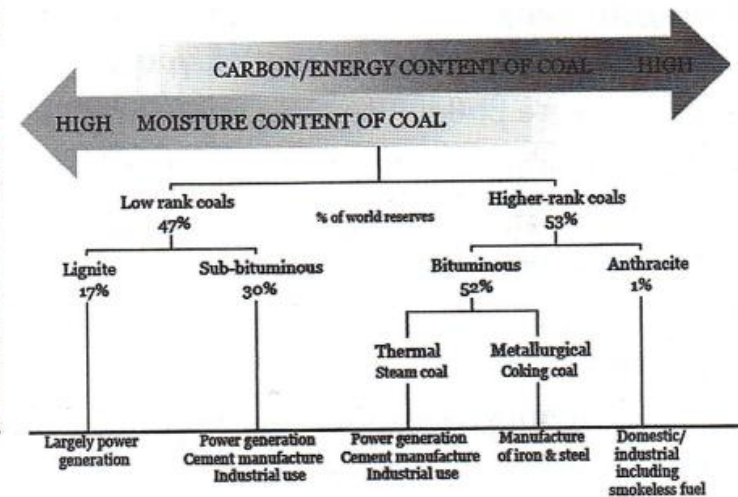
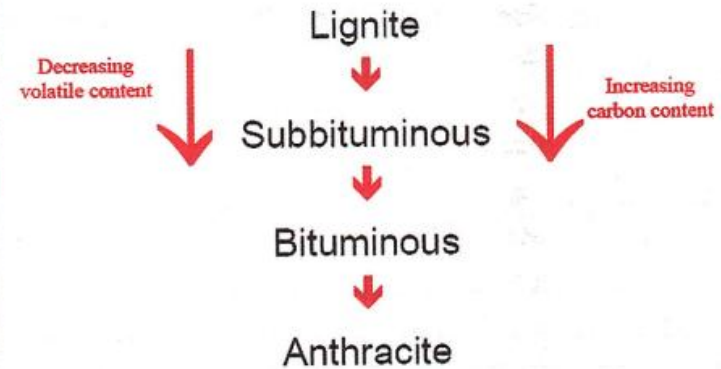
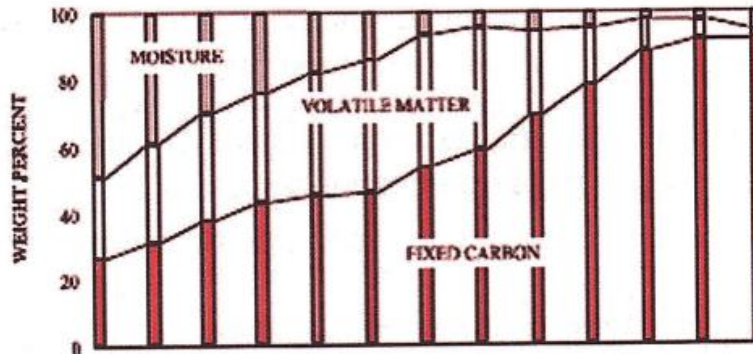
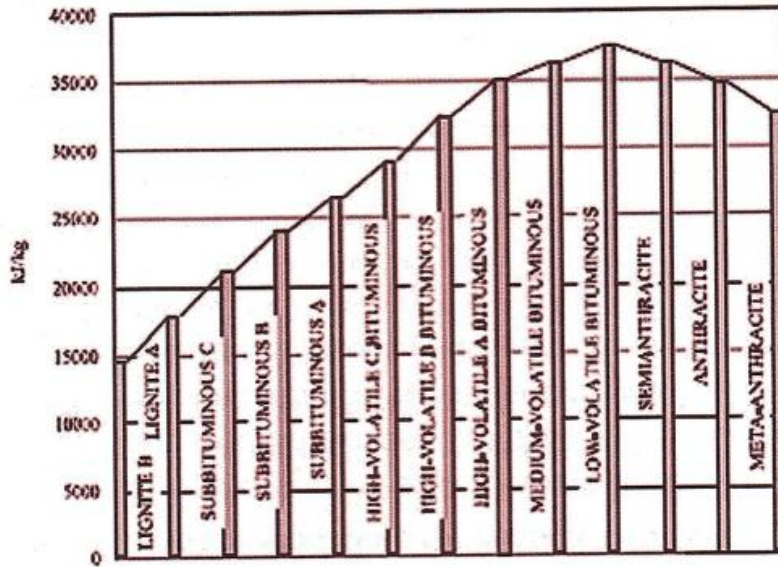
- Η απομάστευση αμού και η αναγέννηση χρησιμοποιούνται μόνο σε εγκαταστάσεις απλών εργοστασίων αμοπαραγωγής



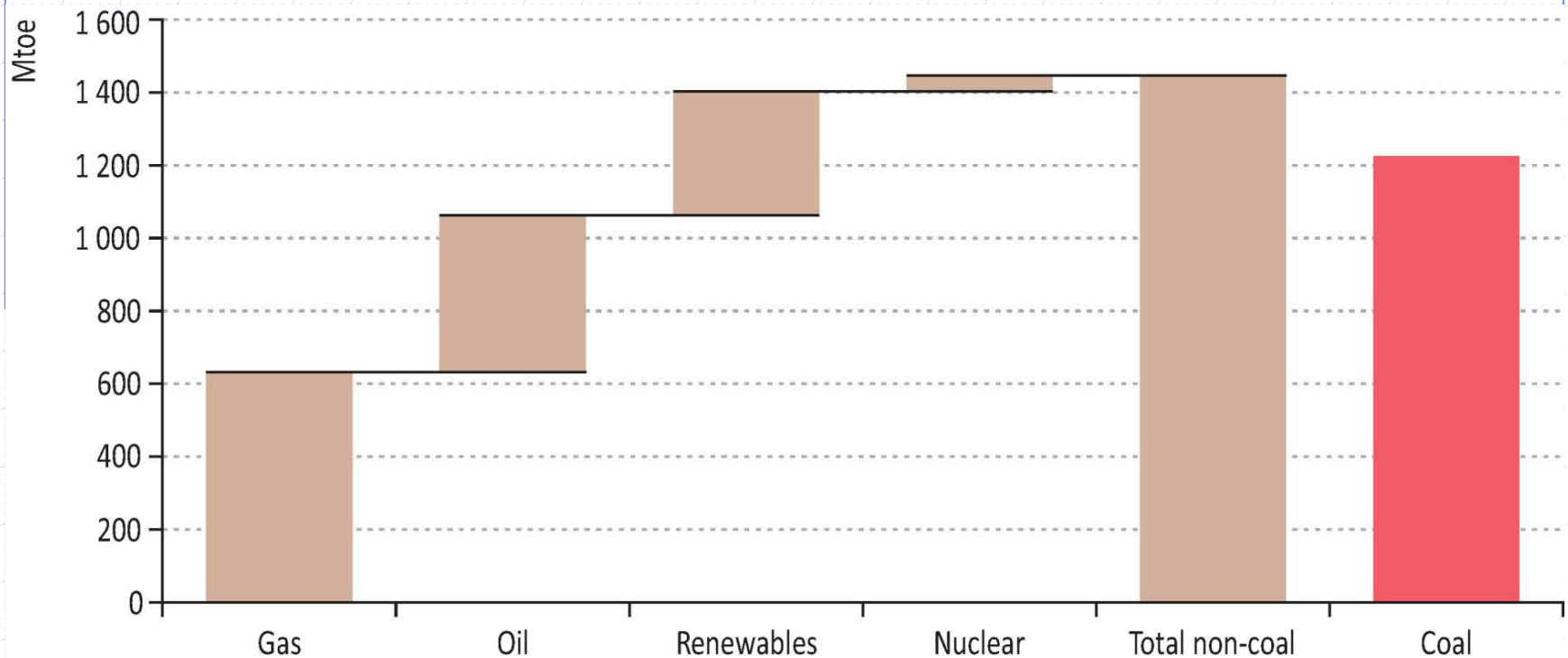
***Συμβατικοί σταθμοί
ηλεκτροπαραγωγής...***



Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...

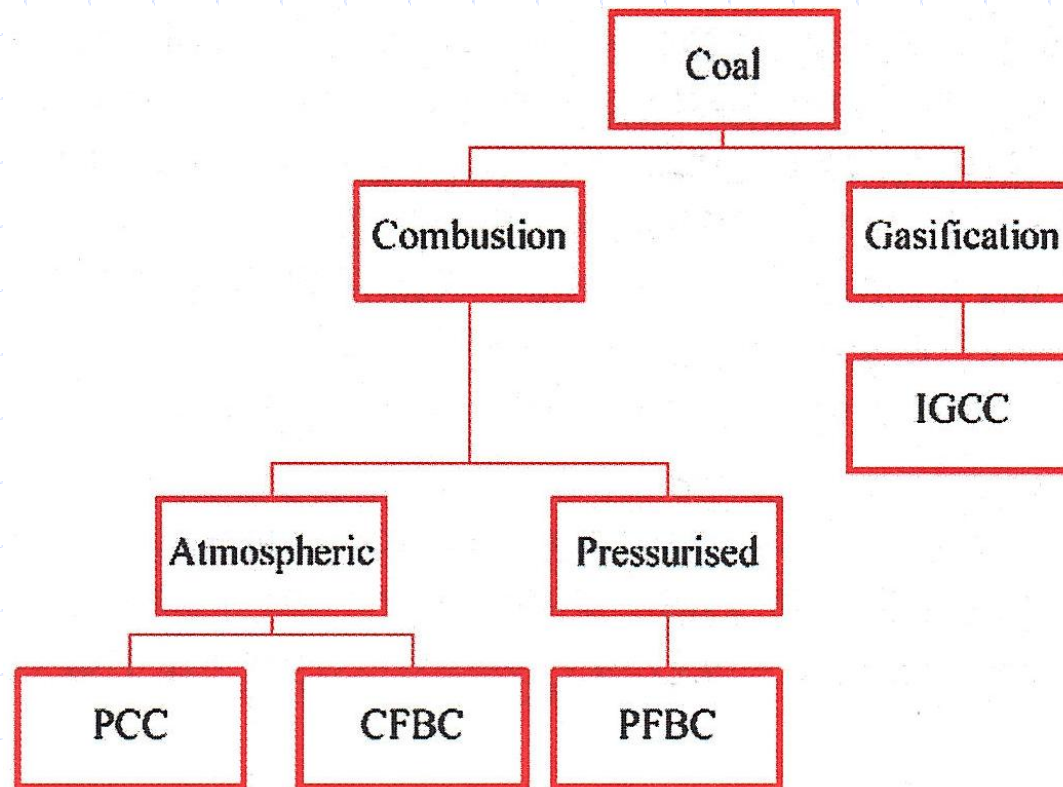


Συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής...



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

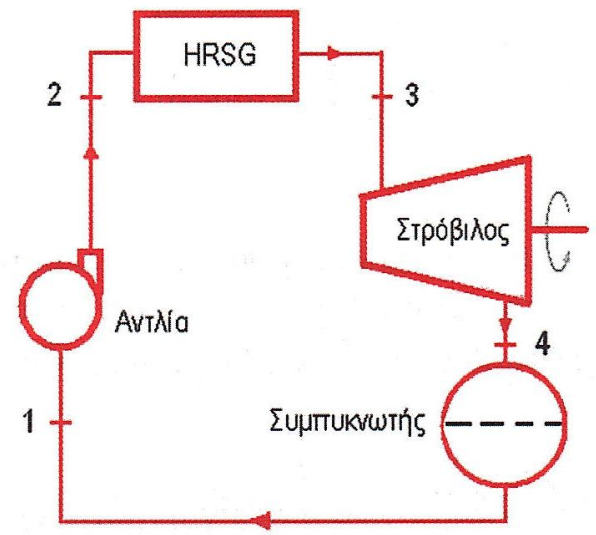
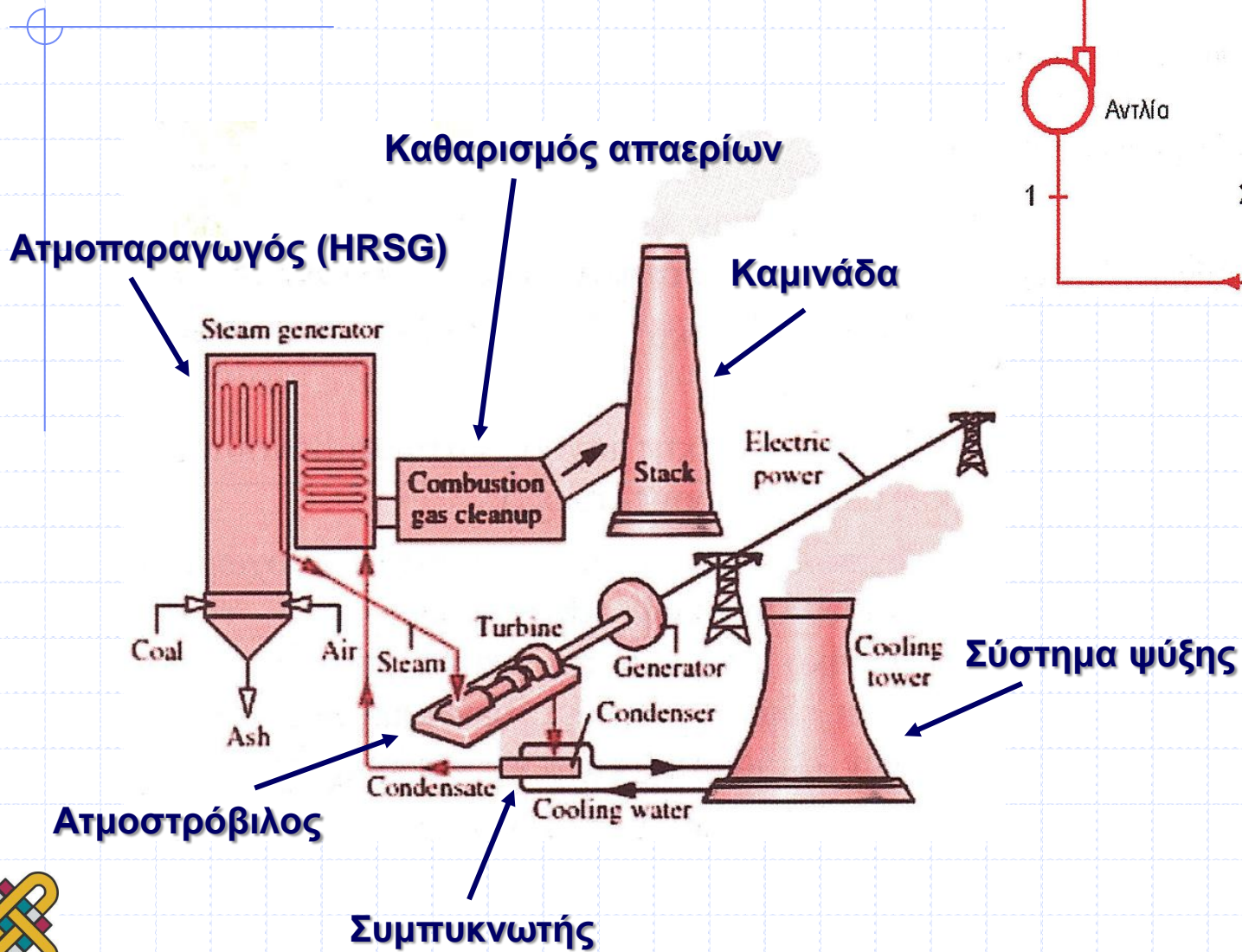
□ IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle

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 (η_{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%
- ❑ Παγκσμίως εκτιμάται ότι ανέρχεται, κατά μέσο όρο < στο 34-35%
- ❑ Υψηλός συντελεστής απόδοσης συνεπάγεται μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ανά kWh_e παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
- ❑ Η εγκατάσταση και λειτουργία συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂ 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 φερριτικού 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 αμοστροβίλου (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
 - ✓ Automated control (computer-based)



ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

