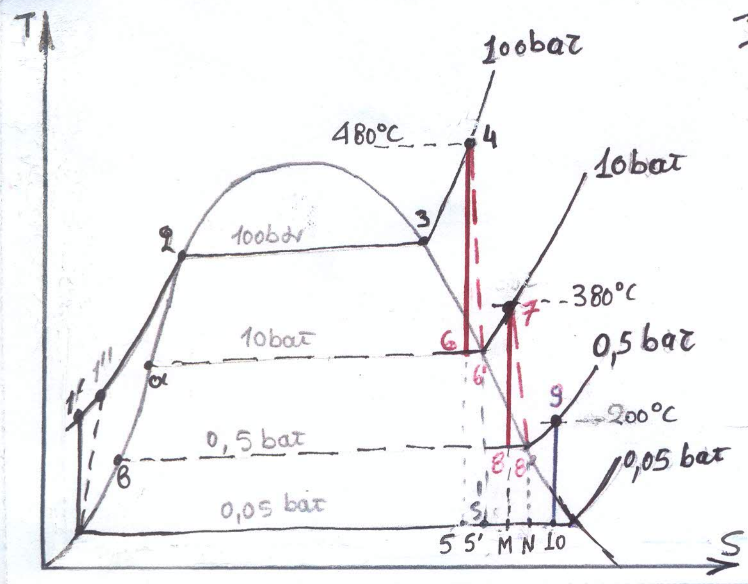
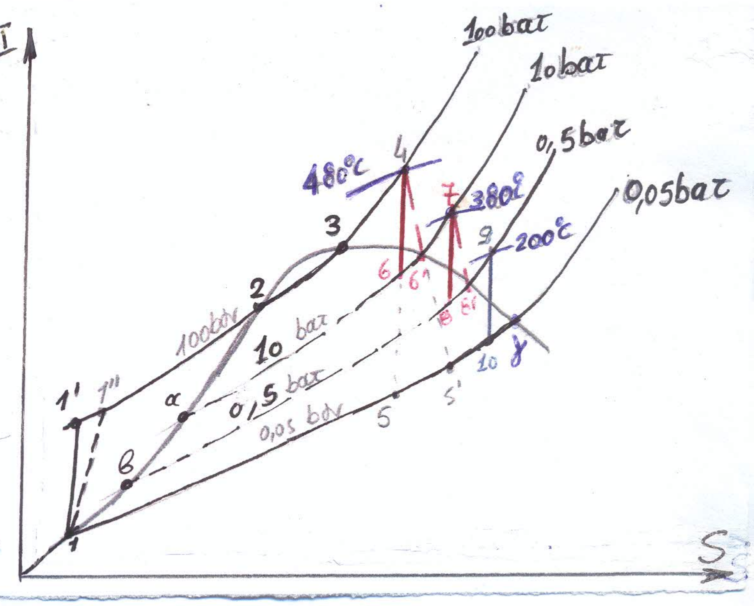
# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ : Hirn + 2 ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΕΙΣ

- Είσοδος στο στρόβιλο (Υ.Π.): $p = 100\ bar$, $t = 480°C$ ........ σημείο 4
- Εκτόνωση μέχρι $p = 10\ bar$ σε κατάσταση ξηρού ατμού ... -//- 6'
- Αναθέρμανση μέχρι $t = 380°C$ στην πίεση $p = 10\ bar$.... -//- 7
- Εκτόνωση μέχρι $p = 0{,}5\ bar$ σε κατάσταση ξηρού ατμού... -//- 8'
- Αναθέρμανση μέχρι $t = 200°C$ στην πίεση $p = 0{,}5\ bar$ ... -//- 9
- Εκτόνωση μέχρι $p = 0{,}05\ bar$
- $\eta_{αντ}$ = βαθμός απόδοσης συμπίεσης $= 0{,}80$.




Ζητούνται:

α) $\eta_\theta$ του κύκλου

β) η τελική κατάσταση του συστήματος.

- Από την εκφώνηση προκύπτει ότι οι μεταβολές-εκτονώσεις που περιγράφονται είναι οι πραγματικές. Οπότε και η τελευταία εκτόνωση θα είναι πραγματική (σημ. 10' δεξιότερα του 10 = = ιδανική - ισοεντροπική εκτόνωση $\overline{910}$).

Ο υπολογισμός του σημείου 10' (= τέλος πραγματικής εκτόνωσης) γίνεται από το βαθμό απόδοσης του στροβίλου της τελευταίας εκτόνωσης:

$$(\eta_{εκτ})_{χ.π.=0,05\,bar} = \frac{I_9 - I_{10'}}{I_9 - I_{10}}$$

θεωρώντας ότι ο βαθμός αυτός είναι ίσος με το βαθμό απόδοσης του στροβίλου σε $p = 0,5$ bar:

$$(\eta_{εκ})_{p=0,5\,bar} = \frac{I_7 - I_{8'}}{I_7 - I_8}.$$

Ο ζητούμενος θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι:

$$\eta_\theta = \frac{\overbrace{\left[(I_4 - I_{6'}) + (I_7 - I_{8'}) + (I_9 - I_{10'})\right]}^{\text{θερμική ενέργεια εκτονώσεων}} - \overbrace{\left[(I_{1''} - I_1)\right]}^{\text{θερμική ενέργεια συμπίεσης}}}{\underbrace{\underbrace{(I_4 - I_{1''})}_{\text{θερμότητα για υπερθέρμανση}} + \underbrace{(I_7 - I_{6'})}_{\text{θερμότητα για 1ης αναθέρμανση}} + \underbrace{(I_9 - I_{8'})}_{\text{θερμότητα για 2η αναθέρμανση}}}_{\text{ποσό θερμότητας που προσδίδεται συνολικά στο σύστημα}}} \qquad (*)$$

# ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ ΠΙΕΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

$p = 100\ bar \Rightarrow T = 310{,}96\ °C + 273 = 583{,}96\ °K$

$\sigma = v_2 = 0{,}0014526\ m^3/kg \quad s = v_3 = 0{,}01804\ m^3/kg$

$I_\sigma = I_2 = 1408{,}0\ kJ/kg \quad I_v = 2727{,}7\ \left(\frac{kJ}{kg}\right) = I_3 \quad r = 1319{,}7\ kJ/kg$

$S_\sigma = S_2 = 3{,}3605\ kJ/kg\,°K \quad S_v = 5{,}6198\ kJ/kg\,°K = S_3$

---

$T = 179{,}88\,°C + 273 = 452{,}88\ °K$

$p = 10\ bar \Rightarrow \sigma = v_\alpha = 0{,}0011274\ m^3/kg$

$s = v_{6'} = 0{,}1943\ m^3/kg$

$I_\sigma = I_\alpha = 762{,}61\ kJ/kg$

$r = 2013{,}6\ kJ/kg$

$I_s = I_{6'} = 2776{,}2\ kJ/kg$

$S_\sigma = S_\alpha = 2{,}1382\ kJ/kg\,°K \quad S_v = 6{,}5828\ kJ/kg\,°K = S_{6'}$

---

$p = 0{,}5\ bar \Rightarrow T = 81{,}345\,°C + 273 = 354{,}345\ °K$

$\sigma = v_8 = 0{,}0010301\ m^3/kg \quad s = v_{8'} = 3{,}240\ m^3/kg$

$I_\sigma = I_8 = 340{,}56\left(\frac{kJ}{kg}\right),\ I_v = I_{8'} = 2646{,}0\ kJ/kg,\ r = 2305{,}4\ kJ/kg$

$S_\sigma = S_8 = 1{,}0912\ kJ/kg\,°K,\ S_v = 7{,}5947\ kJ/kg\,°K = S_{8'}$

---

$p = 0{,}05\ bar \Rightarrow T = 32{,}898\,°C + 273 = 305{,}898\ °K$

$\sigma = v_1 = 0{,}0010052\ m^3/kg \quad s = 28{,}19\ m^3/kg$

$I_\sigma = I_1 = 137{,}77\left(\frac{kJ}{kg}\right),\ I_v = I_\gamma = 2561{,}6\ kJ/kg \quad r = 2423{,}8\ kJ/kg$

$S_\sigma = S_1 = 0{,}4763\ kJ/kg\,°K \quad S_v = 8{,}3960\ kJ/kg\,°K = S_\gamma$

---

## ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΥ ΑΤΜΟΥ ΣΤΙΣ ΠΙΕΣΕΙΣ

**Σημείο 4**

$p = 100\ bar \quad t = 480\,°C$

$I_4 = 3323{,}7\ kJ/kg$

$S_4 = 6{,}5321\ kJ/kg\,°K$

από ΠΙΝΑΚΑ 8/σελ. 363

**Σημείο 7**

$p = 10\ bar \quad t = 380\,°C$

$I_7 = 3222{,}0\ kJ/kg$

$S_7 = 7{,}4027\ kJ/kg\,°K$

από ΠΙΝΑΚΑ 8/σελ. 358

**Σημείο 9**

$p = 0{,}5\ bar \quad t = 200\,°C$

$I_9 = 2875\ kJ/kg$

$S_9 = 8{,}15\ kJ/kg\,°K$

από ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ (I−S)
διότι στον ΠΙΝΑΚΑ 8/σελ. 357
ΔΕΝ έχει στοιχεία για $p < 1\ bar$
$p < 1\ bar$.

## Υπολογισμός Ενθαλπιών της σχέσης (*) (σελ. 2 της παρούσης)

α) $I_4 = 3323{,}7$ kJ/kg (σελ. 3 παρούσης)

$I_{6'} = 2776{,}2$ kJ/kg —"—

$I_7 = 3435{,}1$ kJ/kg —"—

$I_{8'} = 2640{,}0$ kJ/kg —"—

$I_9 = 2875{,}0$ kJ/kg —"—

$I_1 = 137{,}77$ kJ/kg —"—

## β) Υπολογισμός των Ενθαλπιών: $I_{1''}$, $I_{10'}$

$I_{1''}$

υπολογίζεται από τη σχέση του βαθμού απόδοσης συμπίεσης:

$$\eta_{συμπ.} = 0{,}80 = \frac{I_{1'} - I_1}{I_{1''} - I_1} \quad (**)$$

$$I_{1'} = I_1 + v_1 \cdot (P_{1'} - P_1)$$

$$= 137{,}77 + 0{,}0010052 \cdot (100 - 0{,}05) \cdot 10^2 = 147{,}817 \text{ kJ/kg}$$

Από την (**) λύνω ως προς $I_{1''}$:

$$I_{1''} = I_1 + \frac{I_{1'} - I_1}{0{,}80} = 137{,}77 + \frac{147{,}817 - 137{,}77}{0{,}80} = 150{,}328 \text{ kJ/kg}$$

$$I_{1''} = 150{,}328 \text{ kJ/kg}$$

$I_{10}'$

υπολογίζεται από το βαθμό απόδοσης της εκτόνωσης στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης:

$$(\eta_{εκτ})_{χπ=0{,}05\,bar} = \frac{I_9 - I_{10}'}{I_9 - I_{10}} \quad (***)$$

που θεωρείται ότι είναι ίσος με το βαθμό απόδοσης του στροβίλου στην $p=0{,}5\,bar$:

$$(\eta_{εκτ})_{p=0{,}5\,bar} = \frac{I_7 - I_8'}{I_7 - I_8}$$

Εδώ χρειάζεται η τιμή της ενθαλπίας $I_8$:

Στο διάγραμμα (I-s) στο σημείο 8 προκύπτει ⇒ $I_8 \cong 2575\ kJ/kg$, $x_8 = 0{,}97$ επόμενη σελίδα 5'

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΑΥΤΩΝ:

1) $x_8$

7→8 = αδιαβατική ιδανική εκτόνωση = ισοεντροπική ⇒

$$\Rightarrow 7{,}4027\,\frac{kJ}{kg\,°K} = S_7 = S_8 = (S_σ)_{p=0{,}5\,bar} + \left(\frac{r}{T}\right)_{p=0{,}5\,bar} \cdot x_8 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x_8 = \frac{S_7 - (S_σ)_{0{,}5\,bar}}{(r)_{p=0{,}5\,bar}} \cdot (T)_{p=0{,}5\,bar}$$

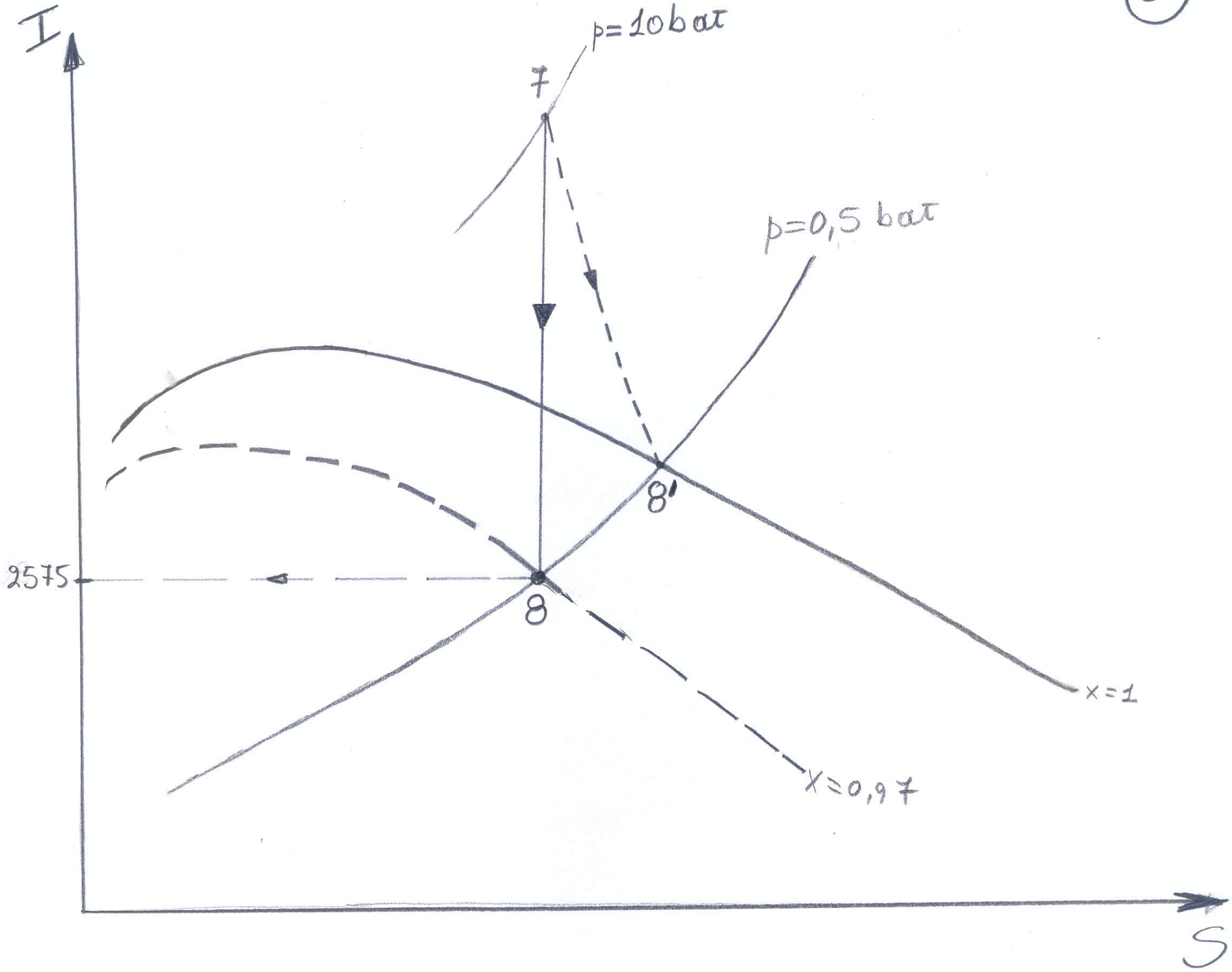
$S_7 = 7{,}4027\ \frac{kJ}{kg\,°K}$, $(S_σ)_{0{,}5\,bar} = 1{,}0912$, $(T)_{0{,}5\,bar} = 354{,}345\ °K$, $(r)_{0{,}5\,bar} = 2305{,}4\ \frac{kJ}{kg}$ — σελ. 3 παρούσης

$$= \frac{7{,}4027 - 1{,}0912}{2305{,}4} \cdot 354{,}345 = 0{,}97$$

2) $I_8 = (I_σ)_{0{,}5\,bar} + (r)_{0{,}5\,bar} \cdot x_8 = 340{,}56 + 2305{,}4 \cdot 0{,}97 = 2576{,}798\ kJ/kg$

$x_8 = 0{,}97$ και $I_8 = 2576{,}8\ kJ/kg$

(5')



<u>Επομένως:</u>

$$(\eta_{\epsilon\kappa\tau})_{0,5\,bar} = \frac{I_7 - I_8'}{I_7 - I_8} = \frac{3222,0 - 2640,0}{3222,0 - 2576,8} = 0,893$$

Οπότε:

$$0,893 = (\eta_{\epsilon\kappa\tau})_{p=0,05\,bar} = \frac{I_9 - I_{10}'}{I_9 - I_{10}} \Rightarrow (* * * *)$$

Εδώ χρειάζεται η ενθαλπία $I_{10}$:

$$I_{10} = \underbrace{\underset{\downarrow\ 137,77\ kJ/kg}{(I_\sigma)_{p=0,05\,bar}} + \underset{\downarrow\ 2423,8\ kJ/kg}{(r)_{p=0,05\,bar}}}_{\text{σελ. 3 της παρούσης}} \cdot x_{10}$$

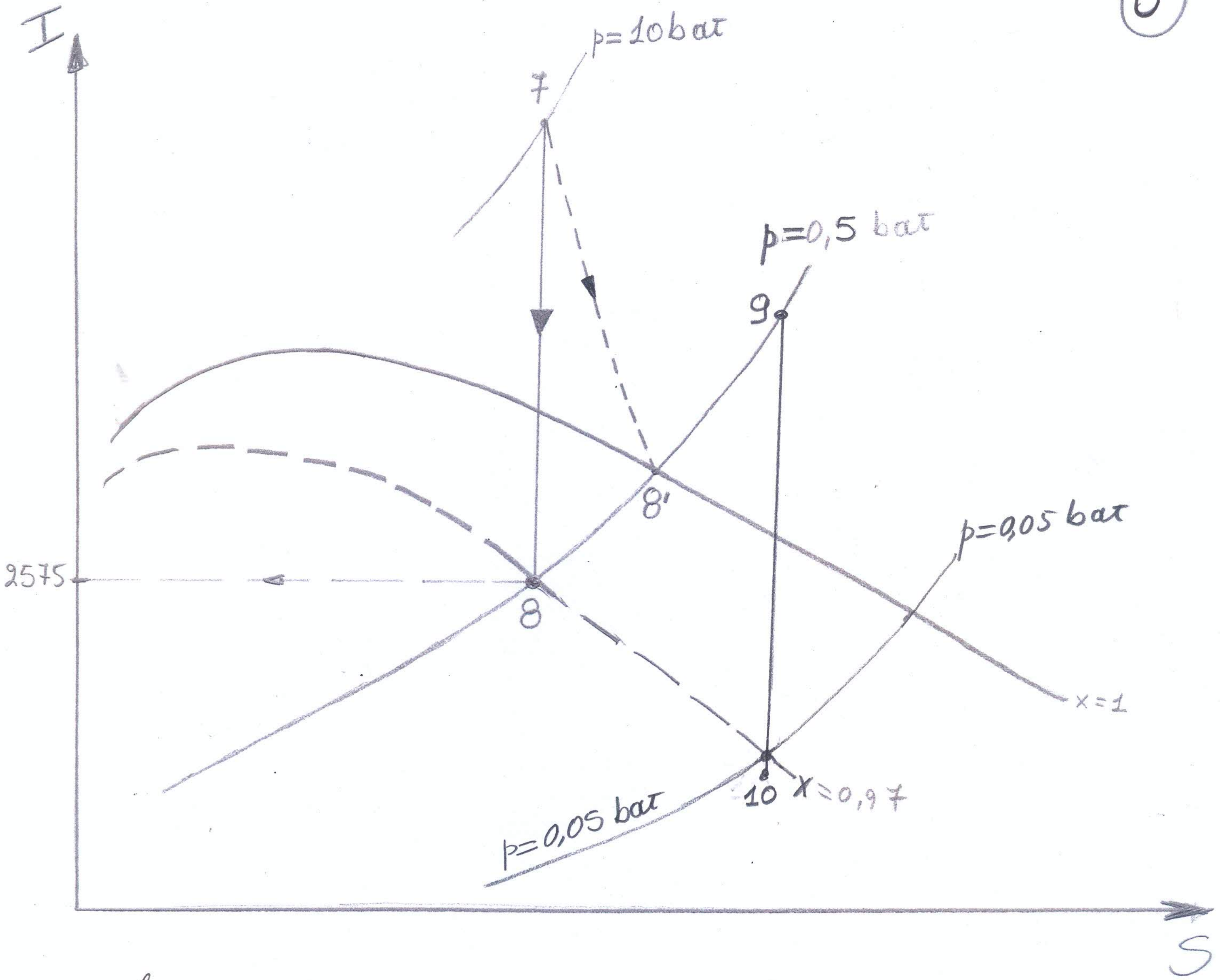
Το $x_{10} \cong 0,97$ στο διάγραμμα (I–s) στο σημείο τομής της (κατακόρυφη) ισοεντροπικής 9–10 με την $p=0,05$ bar.

<u>Ελεγχος $x_{10}$</u>

$$S_9 = S_{10} = (S_\sigma)_{0,05\,bar} + \left(\frac{r}{T}\right)_{p=0,05\,bar} \cdot x_{10} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x_{10} = \frac{S_9 - (S_\sigma)_{0,05\,bar}}{(r)_{0,05\,bar}} \cdot (T)_{0,05\,bar} = \frac{8,15 - 0,4763}{2423,8} \cdot 305,898 = 0,968$$

$$I_{10} = 137,77 + 2423,8 \cdot 0,968 = 2484\ kJ/kg$$




Το σημείο 10 είναι στην κατακόρυφη $\overline{910}$ και επί της $p=0{,}05$ bar και λίγο πιο πάνω από την $x=0{,}97$. Όπως φαίνεται από τον αναλυτικό υπολογισμό είναι

$x = 0{,}968$.

Από την (* * * *) προκύπτει:

$$I_{10'} = I_9 - 0,893\cdot(I_9 - I_{10}) =$$

$$= 2875 - 0,893\cdot(2875 - 2484) =$$

$$= 2525,837 \text{ kJ/kg.}$$

## ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Από την (*) είναι:

$$\eta_\theta = \frac{(3323,7 - 2776,2) + (3222 - 2646,0) + (2875,0 - 2525,837) - (150,328 - 137,77)}{(3323,7 - 150,328) + (3222,0 - 2776,2) + (2875,0 - 2646,0)} =$$

$$= 0,379 \Rightarrow \eta_\theta \cong 38\%$$

## ΤΕΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το σύστημα στο τέλος της τελευταίας (πραγματικής αδιαβατικής) εκτόνωσης, έχει ενθαλπία $I_{10'} = 2525,837$ kJ/kg. σε $p = 0,05$ bar.

Από τα δεδομένα για $p = 0,05$ bar (σελ. 3 της παρούσης) και με αναφορά στα διαγράμματα (I-s), (T-s) της σελ. 1, είναι:

$$I_\gamma = (I_v)_{p=0,05\,bar} = 2561,6 \frac{kJ}{kg} > 2525,837 \frac{kJ}{kg} = I_{10'}$$

Επομένως το σύστημα είναι ΜΙΓΜΑ, και η αναλογία (νερού - ατμού) = βαθμός ξηρότητας στο σημείο αυτό (το 10') είναι:

$$I_{10'} = (I_\sigma)_{0,05\,bar} + (r)_{0,05\,bar} \cdot x_{10'} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x_{10'} = \frac{I_{10'} - (I_\sigma)_{0,05\,bar}}{(r)_{0,05\,bar}} =$$

$$= \frac{2525,837 - 137,77}{2423,8} = 0,985$$

<u>ΣΗΜ.</u>

Ο βαθμός ξηρότητας $x_{10'}$ υπολογίσθηκε αναλυτικά, διότι στο διάγραμμα (I-s) με την τιμή του $I_{10'} = 2525,837$ kJ/kg στο σημείο τομής της οριζόντιας αυτής με την $p=0,05$ bar <u>δεν διέρχεται</u> καμπύλη βαθμού ξηρότητας.

## ΣΧΟΛΙΑ — ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

1) Εάν ο κύκλος δεν είχε τις 2 αναθερμάνσεις τότε θα ήταν ο 1 1'' 2 3 4 5'.

$$I_4 = 3323{,}7 \ kJ/kg \quad , \quad I_{1''} = 150{,}328 \ kJ/kg$$

$$\eta_\theta = \frac{(I_4 - I_{5'}) - (I_{1''} - I_1)}{I_4 - I_{1''}}$$

Εάν $\eta_{στρ.} = \dfrac{I_4 - I_{5'}}{I_4 - I_5} = 0{,}85 \Rightarrow$

$$\Rightarrow I_{5'} = I_4 - \eta_{στρ.}(I_4 - I_5)$$

$$I_5 = I_1 + r \cdot x_5$$

$$S_4 = S_5 = S_1 + \frac{r}{T} \cdot x_5 \rightarrow x_5 = \frac{S_4 - S_1}{r} \cdot T = \frac{6{,}5321 - 0{,}4763}{2423{,}8} \cdot 305{,}898 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x_5 = 0{,}764.$$

$$I_5 = 137{,}77 + 2423{,}8 \cdot 0{,}764 = 1989{,}553 \ kJ/kg$$

<u>και</u>: $I_{5'} = 3323{,}7 - 0{,}85 \cdot (3323{,}7 - 1989{,}553) =$

$$= 2189{,}675 \ kJ/kg$$

Και από το διάγραμμα (I-s) ή τη σχέση $I_{5'} = I_1 + r \cdot x_{5'}$ προκύπτει ότι:

$$x_{5'} = \frac{I_{5'} - I_1}{r} = 0{,}882 < 0{,}90$$

Ο βαθμός απόδοσης:

$$\eta_\theta = \frac{(3323{,}7 - 2189{,}675) - (150{,}328 - 137{,}77)}{3323{,}7 - 150{,}328} = 0{,}353$$

$$\Rightarrow \eta_\theta = 35{,}3\%$$

2) με 1 ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ : κύκλος: 1 1'' 2 3 4 6' 7 N

$$\eta_\theta = \frac{(I_4 - I_{6'}) + (I_7 - I_N) - (I_{1''} - I_1)}{(I_4 - I_{1''}) + (I_7 - I_{6'})}$$

Εάν $\eta_{στρ.} = \frac{I_7 - I_N}{I_7 - I_M} = 0{,}85$

$I_M \cong 2255\ kJ/kg$ [από διάγραμμα (I-s)]

$$I_N = I_7 - 0{,}85\cdot(I_7 - I_M) =$$

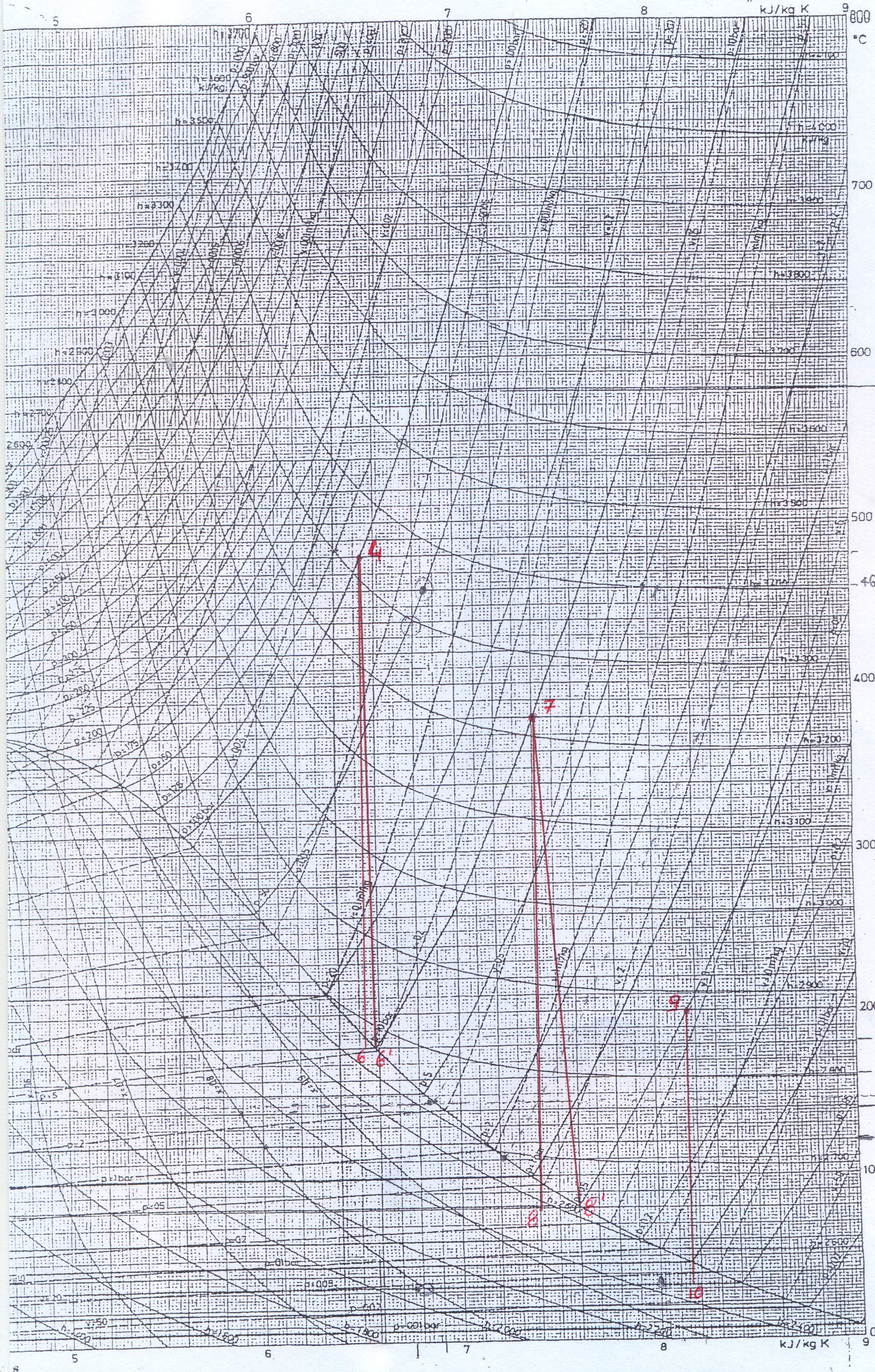
$$= 3222 - 0{,}85\cdot(3222 - 2255) = 2400\ kJ/kg$$

και $x_N \cong 0{,}935$

$$\eta_\theta = \frac{(3323{,}7 - 2776{,}2) + (3222 - 2400) - (150{,}328 - 137{,}771)}{(3323{,}7 - 150{,}328) + (3222 - 2776{,}2)} =$$

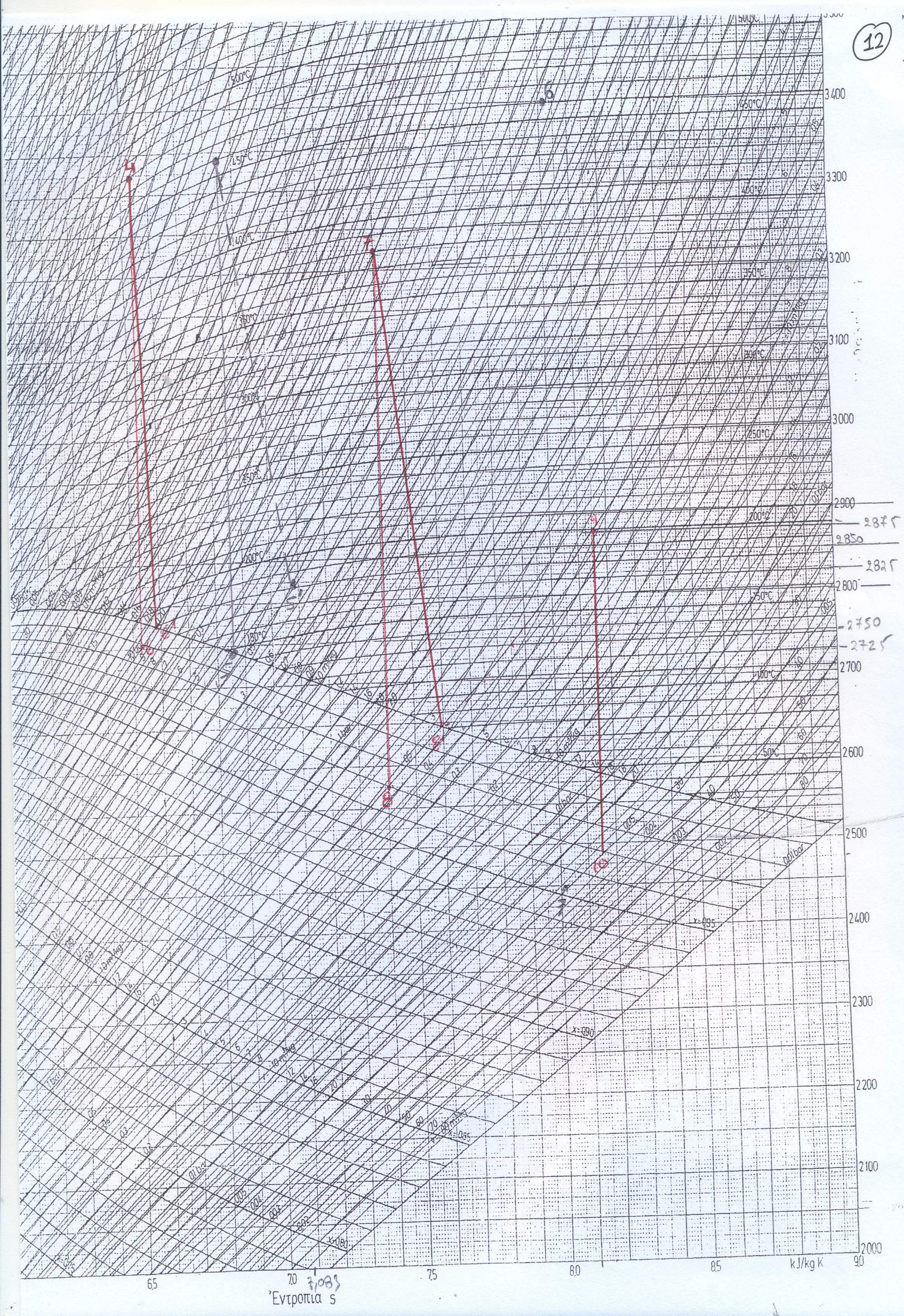
$$= \frac{1369{,}5 - 12{,}558}{3619{,}172} = 0{,}375 \Rightarrow \eta_\theta = 37{,}5\%$$

– Με την 1η αναθέρμανση βελτιώνεται και ο βαθμός ξηρότητας στο τέλος της εκτόνωσης στη χαμηλή πίεση και ο θερμικός βαθμός απόδοσης.


kJ/kg K
°C
Θερμοκρασία
4
6
6'
7
8
8'
9
10
460
120

12

12
4


3400
3300
3200
3100
3000
2900
2875
2850
2825
2800
2750
2725
2700
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
6.5
7.0
7.08
7.5
8.0
8.5
9.0
kJ/kg K
Εντροπία s