

Εναλλάκτες Θερμότητας

Περιεχόμενα

Μεταφορά Θερμότητας
Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας
Ισοζύγιο Ενέργειας
Οικονομικά

Ασκήσεις
Συμπύκνωση ατμών ακετόνης
Συμπύκνωση υπέρθερμου ατμού
Ανάκτηση Θερμότητας

Εναλλάκτες Θερμότητας

Συσκευές εναλλαγής θερμότητας μεταξύ ρευστών, που βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία χωρίς να αναμιχθούν.

Θερμικές Ανάγκες Βιομηχανικής Εγκατάστασης

Θέρμανση ρευστού
Ψύξη ρευστού
Βρασμός υγρού
Συμπύκνωση ατμών

Διαθέσιμες Παροχές (Utilities)

Καυσαέρια
Θερμαντικά ρευστά
Ατμός
Νερό ψύξης
Ψυκτικά ρευστά

Είδη Εναλλακτών (ανάλογα με το επιτελούμενο έργο)

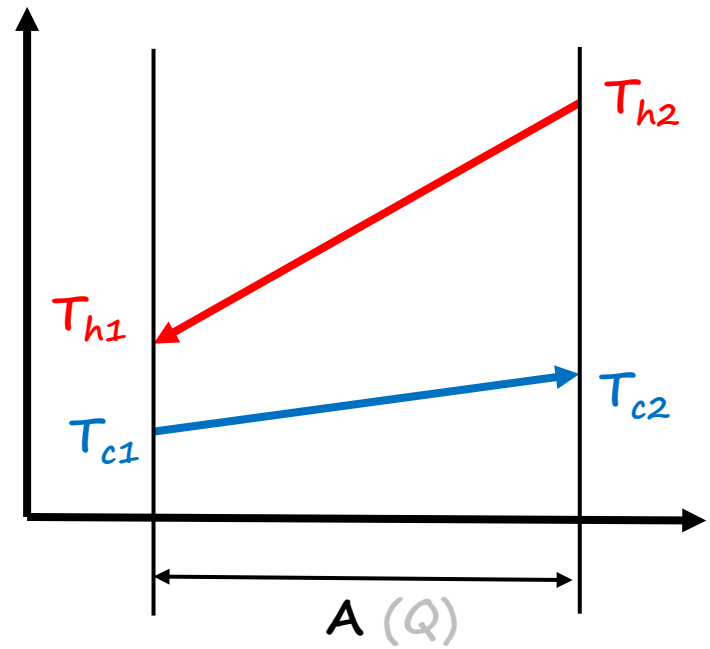
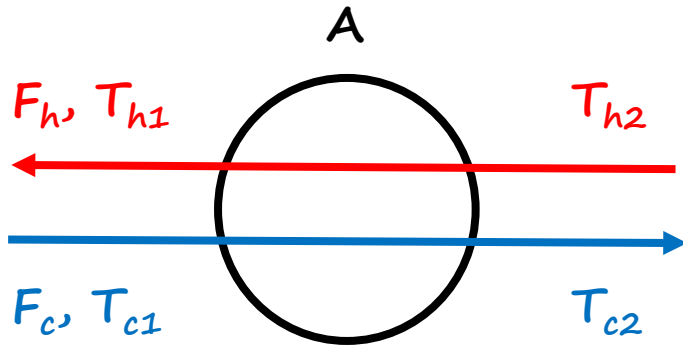
Θερμαντήρας
Ψυκτήρας
Αναβραστήρας
Συμπυκνωτήρας

Τύποι Εναλλακτών

Διπλού Σωλήνα
Κελύφους και Σωλήνων
Με πλάκες
Ανακομιστές
Συμπαγείς
Αναδευόμενοι
...

Εναλλάκτες Θερμότητας

Ψύξη σε Αντιρροή



Ρεύμα Διεργασίας

F_h	kg/s	Παροχή
T_{h2}	C	Αρχική Θερμοκρασία (υψηλή)
T_{h1}	C	Τελική Θερμοκρασία (χαμηλή)

Βοηθητική Παροχή

F_c	kg/s	Παροχή
T_{c1}	C	Αρχική Θερμοκρασία (χαμηλή)
T_{c2}	C	Τελική Θερμοκρασία (υψηλή)

Εξοπλισμός

A	m^2	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας
-----	-------	--------------------------------

Βασικά Προβλήματα Εναλλακτών Θερμότητας

Σχεδιασμού: Ρεύμα Διεργασίας → | Εξοπλισμός
(Design) | Βοηθητική Παροχή

Λειτουργίας: Ρεύμα Διεργασίας | → Βοηθητική Παροχή
(Rating) | Εξοπλισμός

Προσαρμογής: Ρεύμα Διεργασίας | → | Συντελεστές
(Fitting) | Εξοπλισμός | | Μεταφοράς
| Βοηθητική Παροχή | | Θερμότητας

Γενικά: Φαινομενολογική Εξίσωση Φαινομένων Μεταφοράς

$$(\text{Ρυθμός}) = (\text{Συντελεστής}) \times (\text{Ωθούσα Δύναμη})$$

$$(\text{Συντελεστής}) = 1 / (\text{Αντίσταση})$$

→ Μεταφορά Θερμότητας

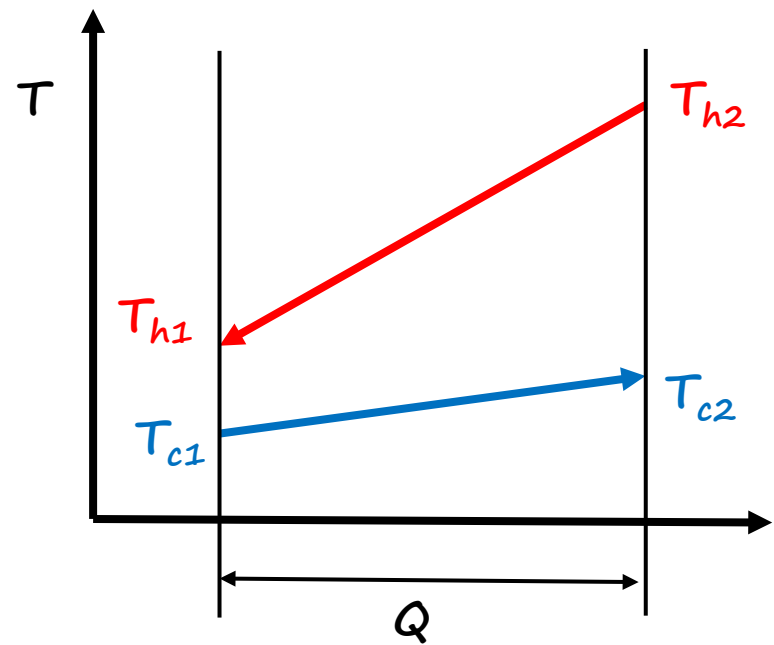
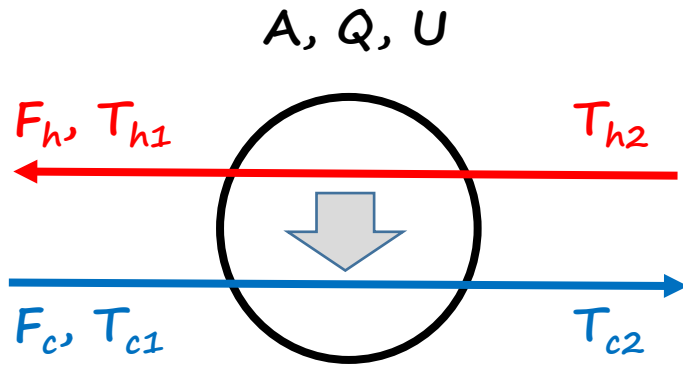
(Ρυθμός Ροής Θερμότητας)

$$= (\text{Συνολικός Συντελεστής Μεταφοράς Θερμότητας}) \\ \times (\text{Διαφορά Θερμοκρασίας})$$

Δηλαδή $Q/A = U \Delta T \dots$

και αργότερα $m/A = D \Delta C \dots$

αλλά και $i = (1/R) V \dots$



Η Βασική Εξίσωση Ροής Θερμότητας

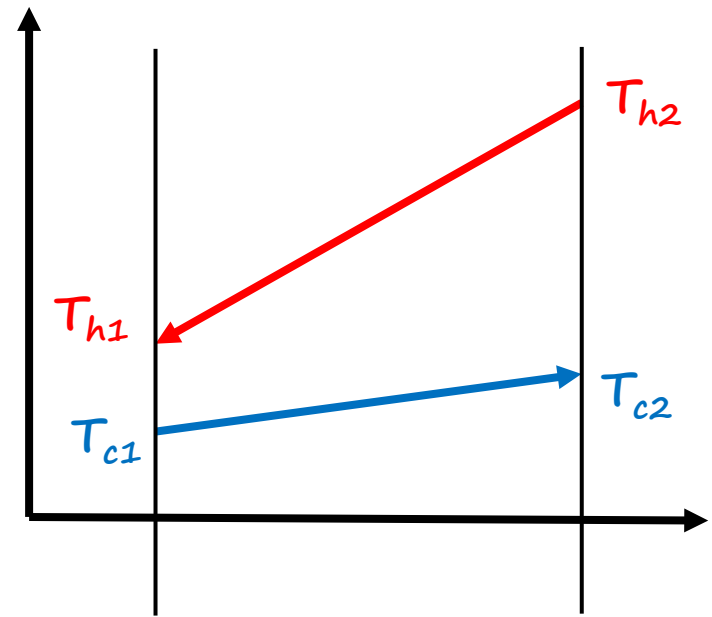
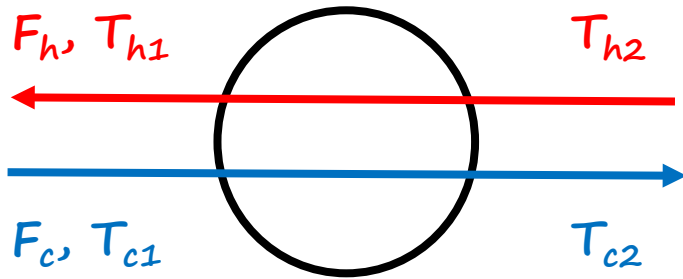
(Ρυθμός) = (Συντελεστής) x (Ωθούσα Δύναμη)

$$Q = A U \Delta T$$

Q	W	Ρυθμός ροής θερμότητας
A	m ²	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας
U	W/m ² K	Συνολικός Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
ΔT	K	Διαφορά θερμοκρασίας

Εναλλάκτες Θερμότητας

A, Q, U



η Εξίσωση Θερμοροής

$$Q = A U \Delta T$$

η Ωθούσα Δύναμη

$$\Delta T_L = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)$$

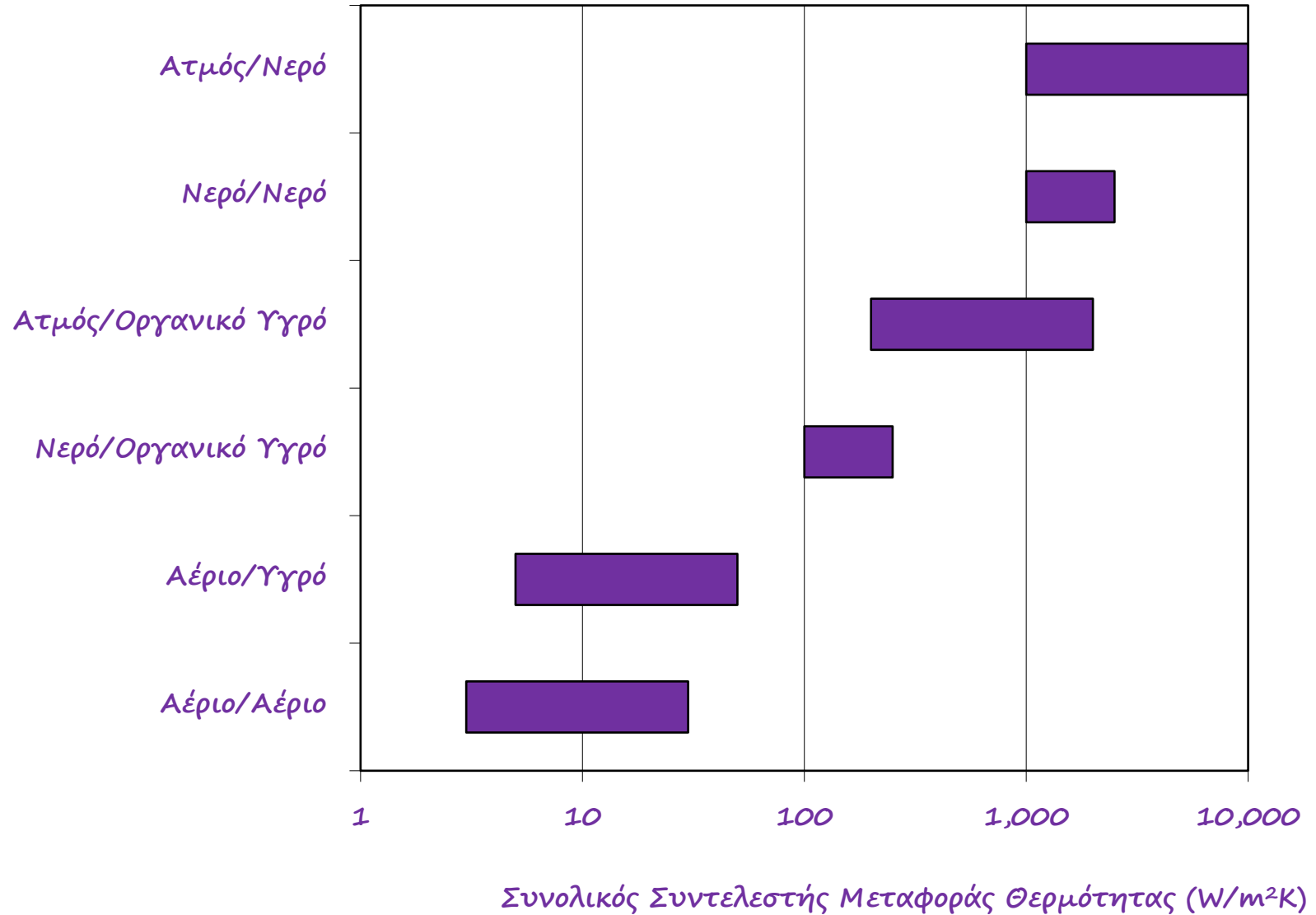
$$\Delta T_1 = T_{h1} - T_{c1}$$

$$\Delta T_2 = T_{h2} - T_{c2}$$

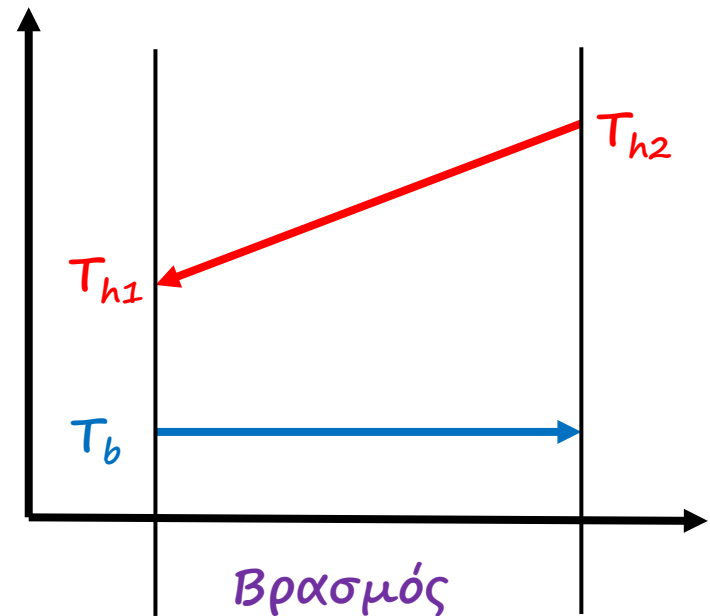
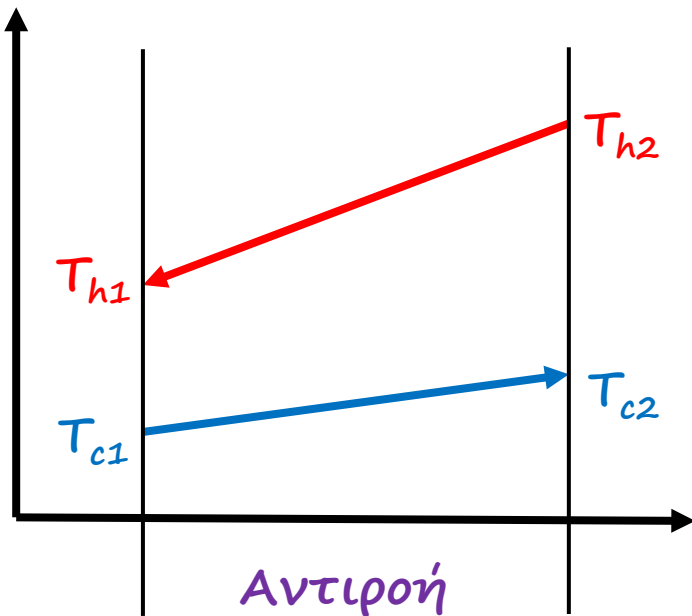
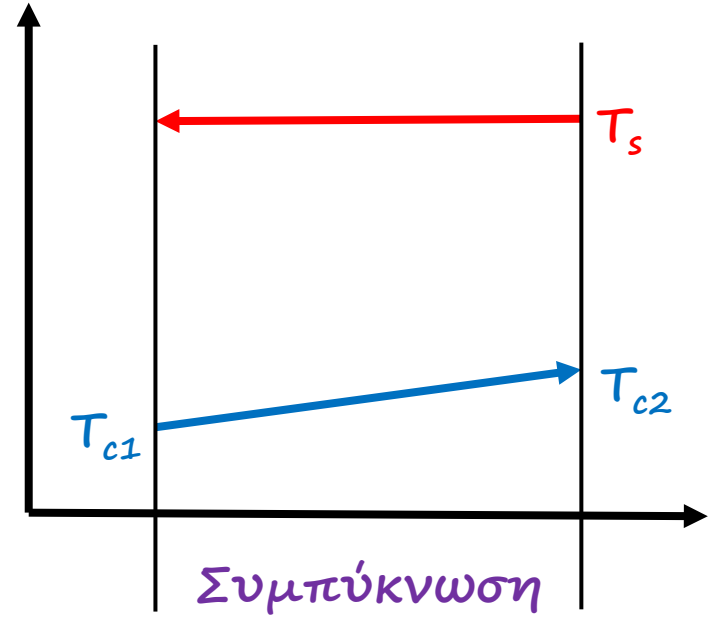
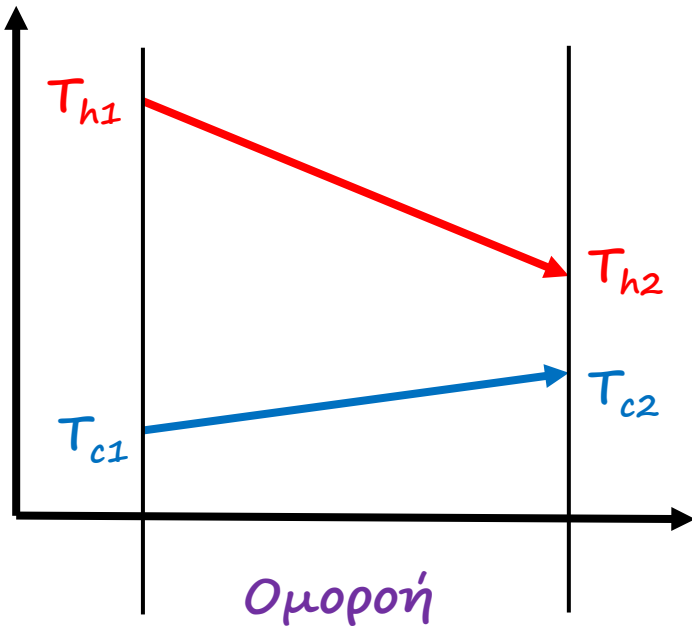
η Αντίσταση

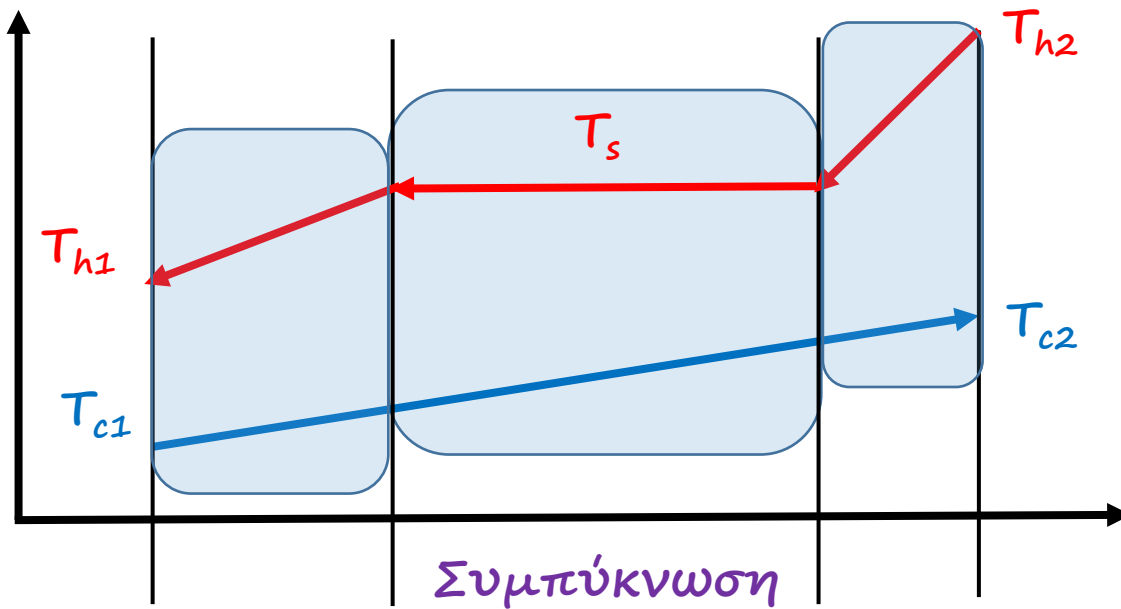
$$1/U = 1/h_i + x/k + 1/h_o$$

Ενδεικτικές Τιμές Συνολικού Συντελεστή Μεταφοράς Θερμότητας

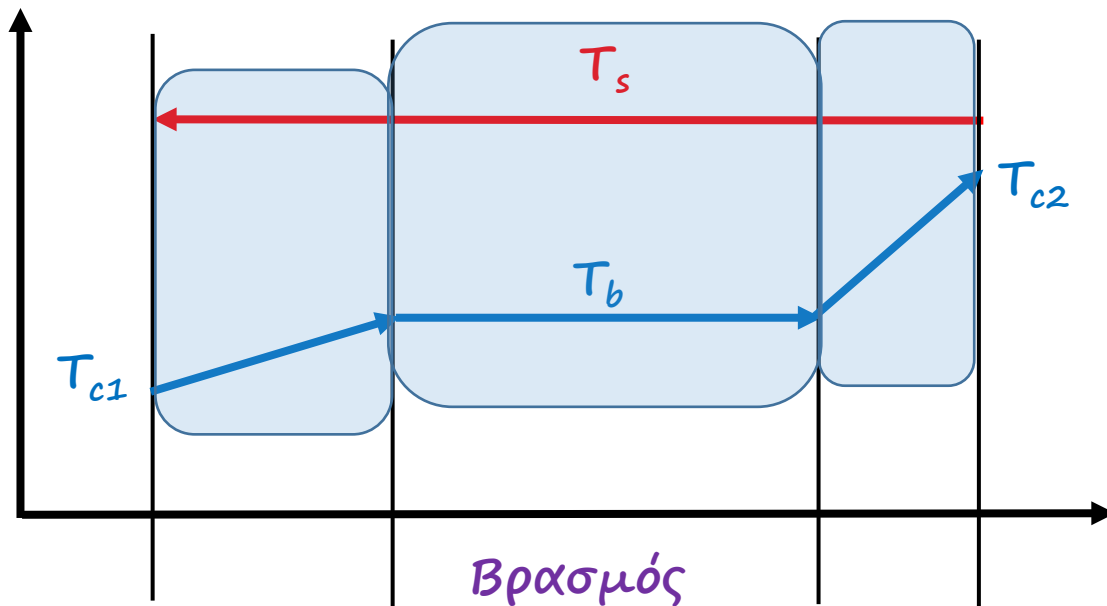


Ωθούσα Δύναμη: Λογαριθμική Μέση Θερμοκρασιακή Διαφορά

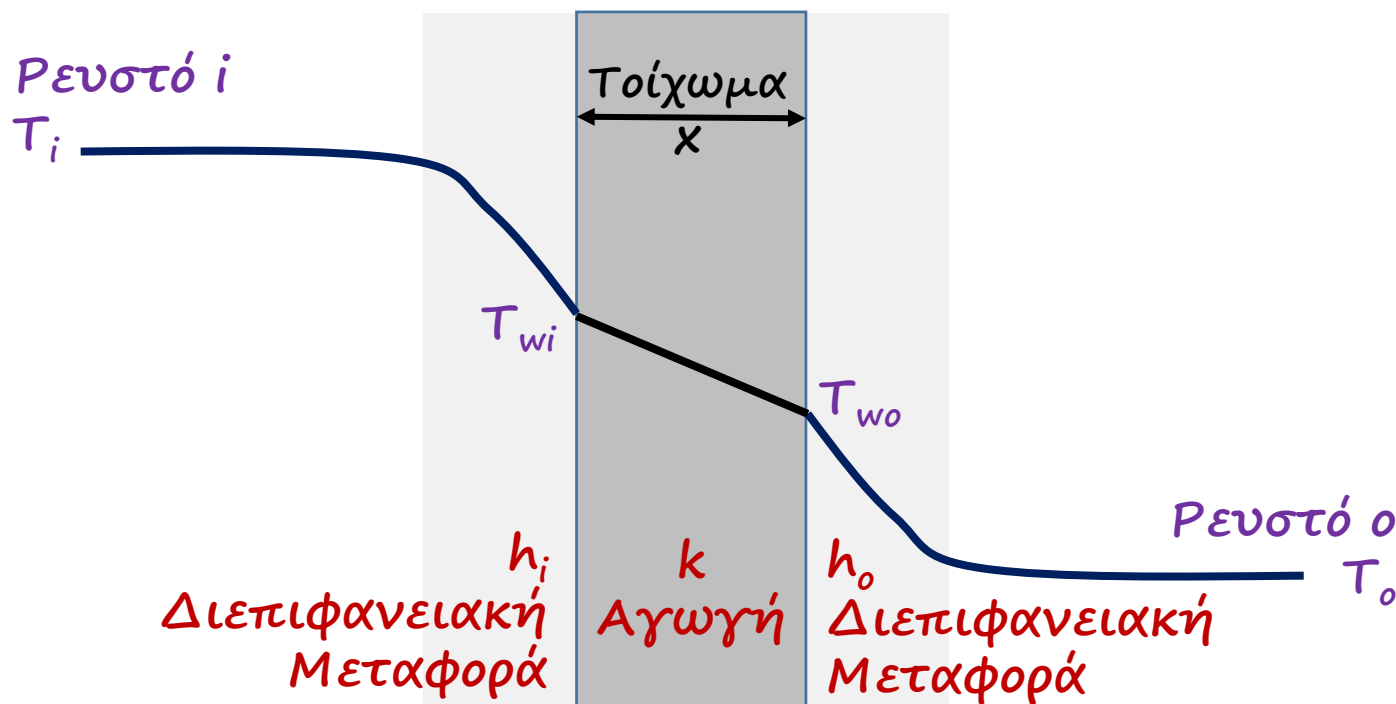




τρία διαφορετικά τμήματα
 $\rightarrow \Delta T$ Ωθούσα Δύναμη
 $\rightarrow U$ Συντελεστής



Μετάδοση Θερμότητας μεταξύ Δύο Ρευστών Διαχωρισμένων με Στερεό Τοίχωμα



$$Q/A = h_i (T_i - T_{wi})$$

$$Q/A = k/x (T_{wi} - T_{wo})$$

$$Q/A = h_o (T_o - T_{wo})$$

$$Q/A = U (T_i - T_o)$$

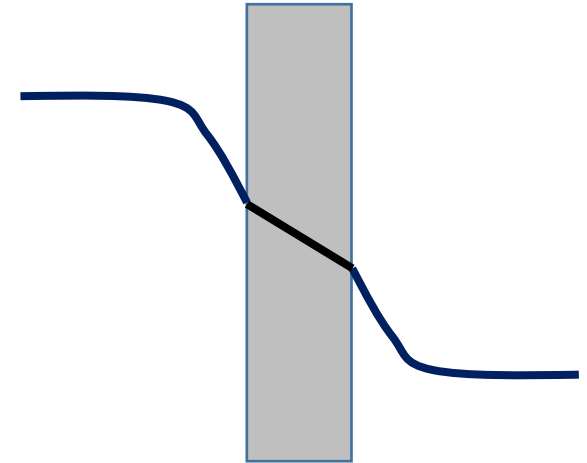


$$1/U = 1/h_i + x/k + 1/h_o$$

Μετάδοση Θερμότητας μεταξύ Δύο Ρευστών Διαχωρισμένων με Στερεό Τοίχωμα

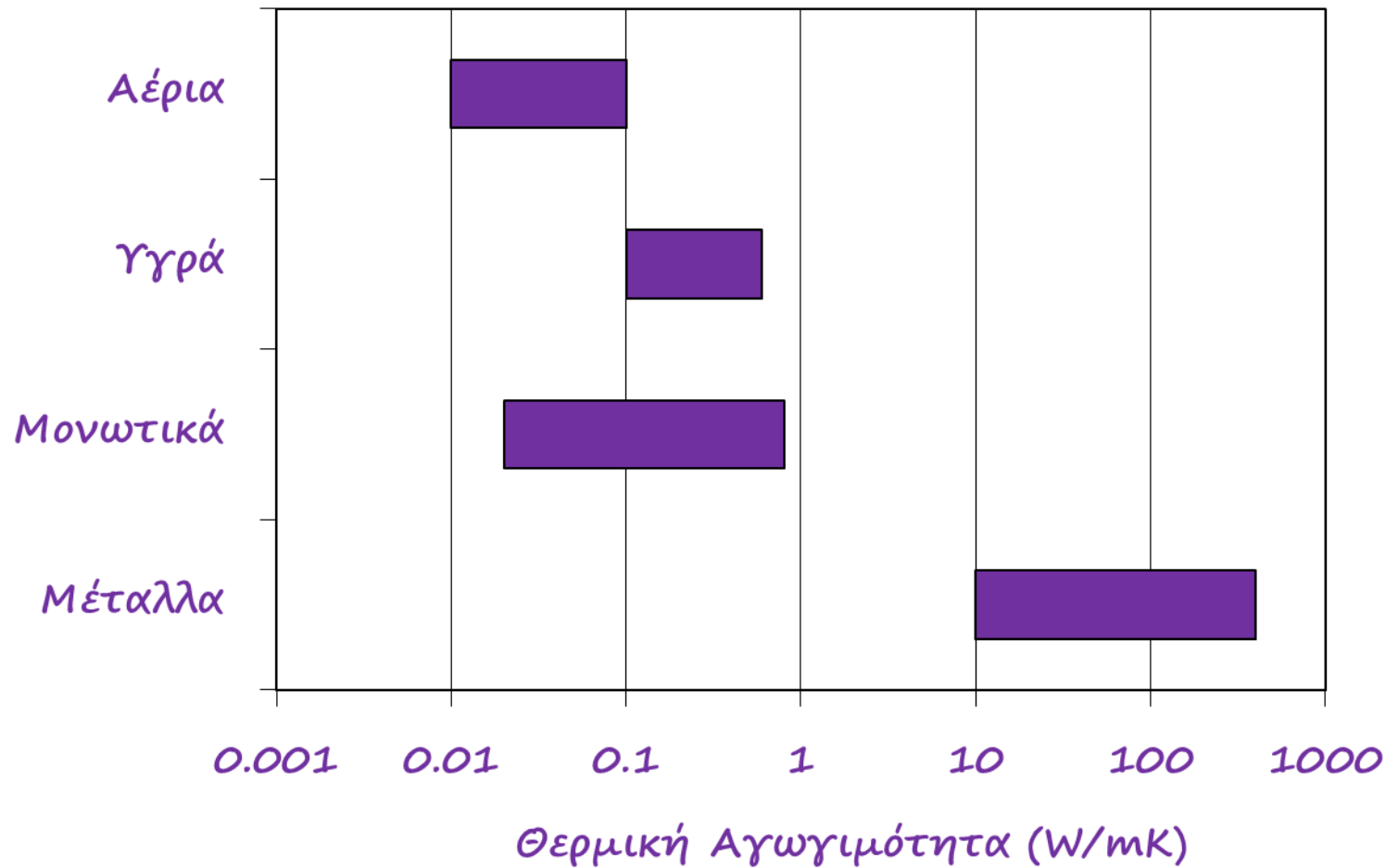
$$Q/A = U (T_i - T_o)$$

$$1/U = 1/h_i + x/k + 1/h_o$$

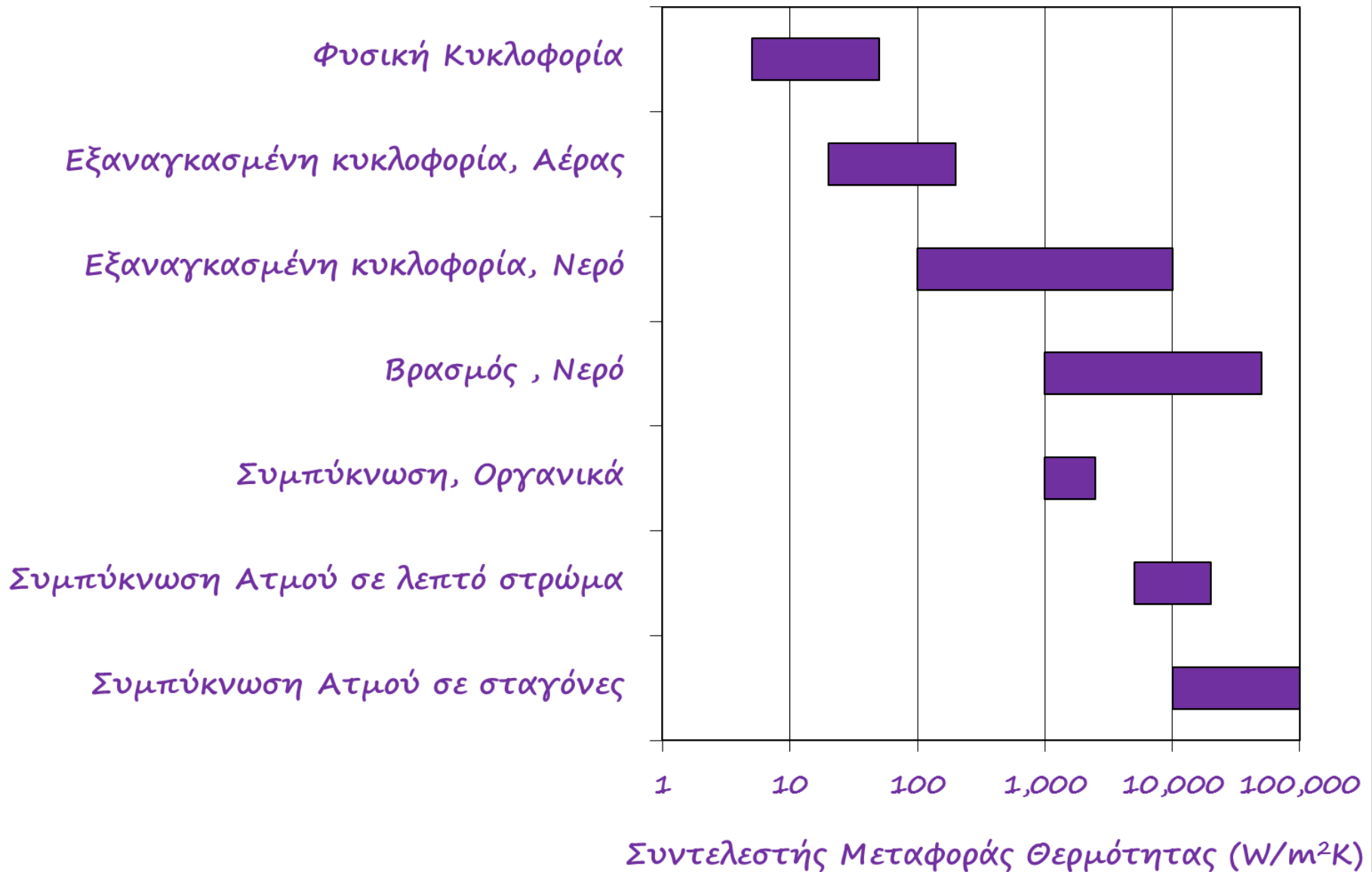


Q	W	Ρυθμός ροής θερμότητας
A	m^2	Επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας
U	W/m^2K	Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
T_i	C	Θερμοκρασία ρευστού i
T_o	C	Θερμοκρασία ρευστού o
h_i	W/m^2K	Επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην πλευρά i
h_o	W/m^2K	Επιφανειακός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην πλευρά o
k	W/mK	Θερμική αγωγιμότητα τοιχώματος

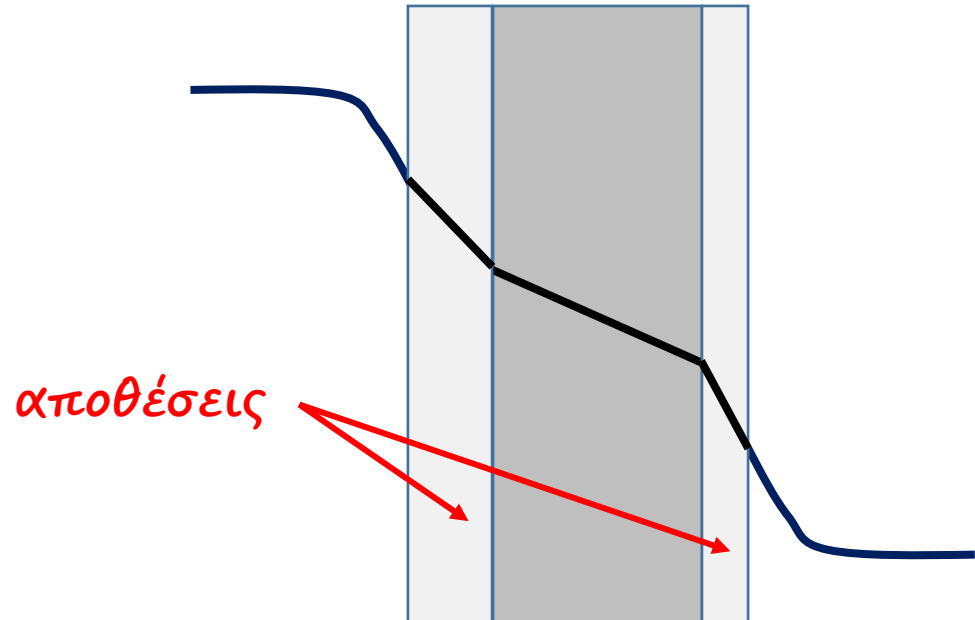
Θερμική Αγωγιμότητα



Επιφανειακοί Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας



Συντελεστές Αποθέσεων

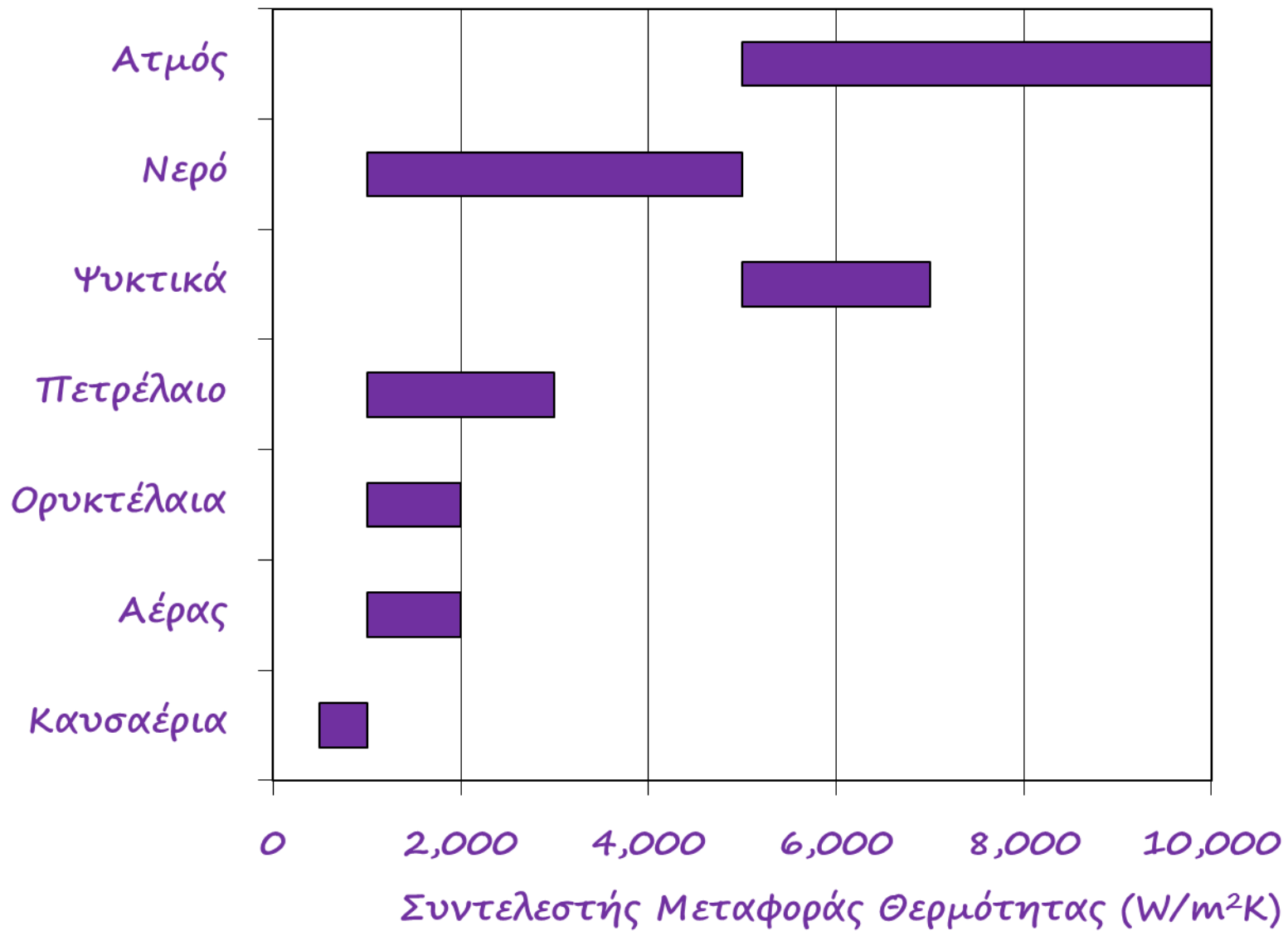


$$Q/A = U (T_i - T_o)$$

$$1/U = 1/h_i + 1/h_{di} + x/k + 1/h_o + 1/h_{do}$$

h_d W/m^2K Συντελεστής αποθέσεων

Συντελεστές Αποθέσεων



το πρόβλημα

Πολύ μεγάλη αβεβαιότητα εκτίμησης του Επιφανειακού Συντελεστή Μεταφοράς Θερμότητας καθώς και των συναρτησιακών του εξαρτήσεων από τη γεωμετρία, τη ρευστοδυναμική κατάσταση, τις ιδιότητες του ρευστού, το είδος της διεργασίας κλπ

μια Προσπάθεια

Επιφανειακοί Συντελεστές
Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζας
για πολλές διεργασίες, γεωμετρίες
ρευστοδυναμικές συνθήκες, υλικά
κλπ

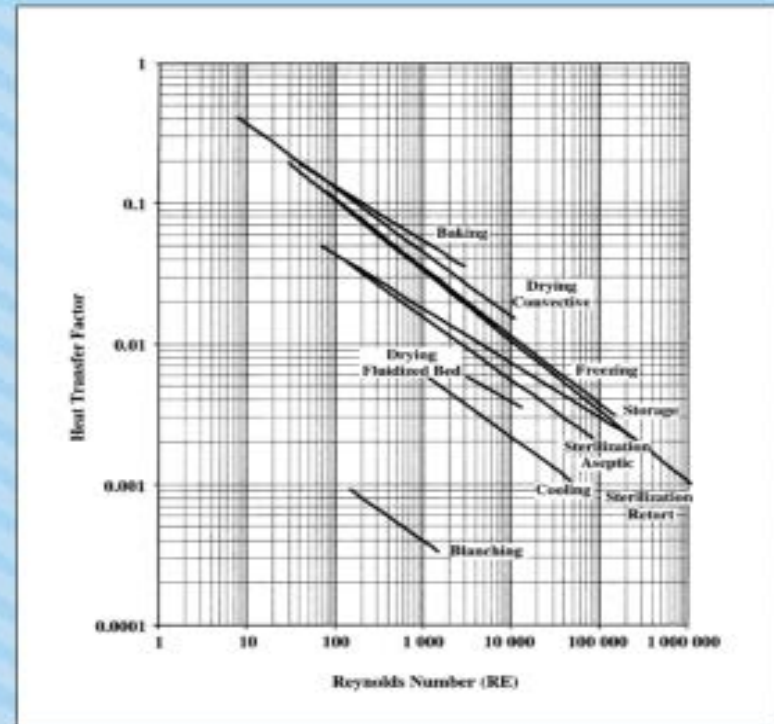
Προσαρμογή
γενικευμένων εξισώσεων
στο σύνολο των δεδομένων
της βιβλιογραφίας

Δομικά Μοντέλα

Επιπλέον για
Θερμική Αγωγιμότητα
Συντελεστή Διάχυσης
Ιξώδες

George D. Saravacos
Zacharias B. Maroulis

Transport Properties of Foods



και η Πρόταση

Στο πρόβλημα σχεδιασμού

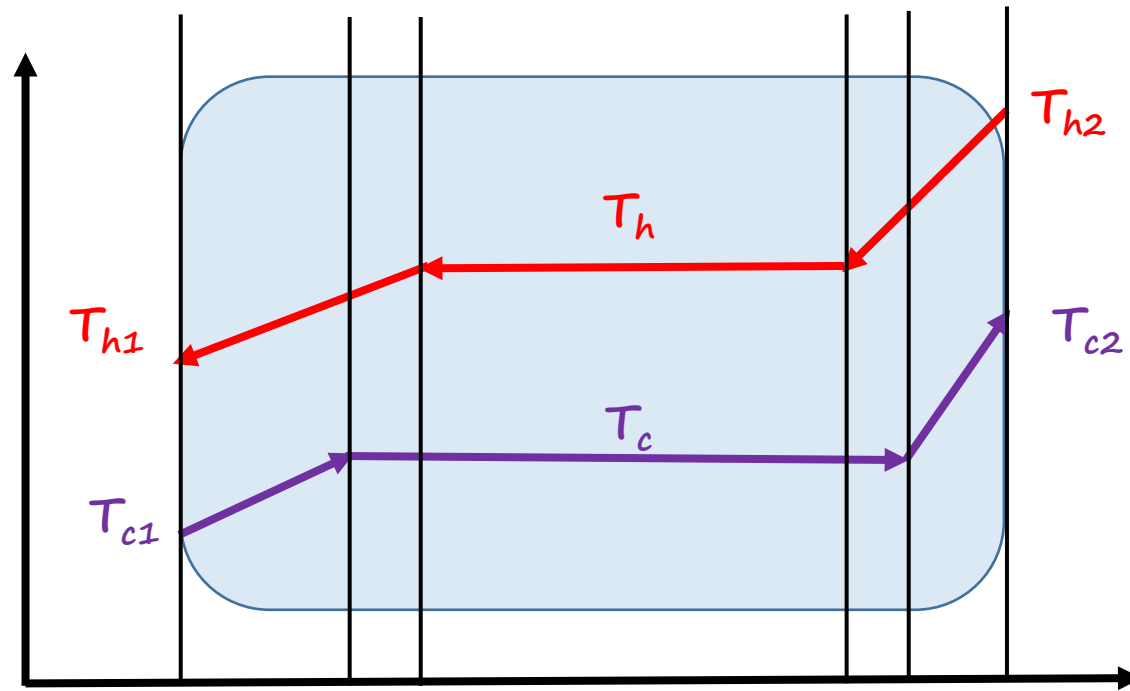
→ προσεγγιστικές τιμές με ανάλυση ευαισθησίας.

Στο πρόβλημα λειτουργίας

→ πειραματικές εκτιμήσεις, οπωσδήποτε.

.... οικονομικό ανάλογο.

Ισοζύγιο Ενέργειας



$$Q = F_h C_{pHL} (T_h - T_{h1}) + F_h \Delta H_h + F_h C_{pHV} (T_{h2} - T_h)$$

$$Q = F_c C_{pCL} (T_c - T_{c1}) + F_c \Delta H_c + F_c C_{pCV} (T_{c2} - T_c)$$

Θερμοφυσικές Ιδιότητες

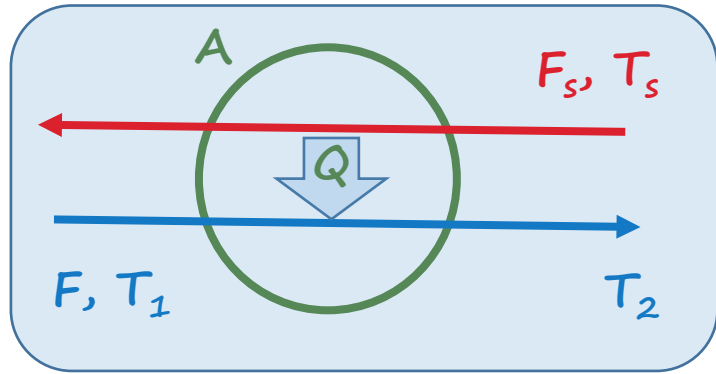
ΔH	kJ/kg	Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης
C_{PL}	kJ/kgK	Ειδική Θερμότητα Υγρού
C_{PV}	kJ/kgK	Ειδική Θερμότητα Ατμού

πχ το νερό:

ΔH	$= 2.25 \text{ MJ/kg}$	στους 100°C
C_{PL}	$= 4.18 \text{ kJ/kgK}$	μέση τιμή $0-100^\circ\text{C}$
C_{PV}	$= 1.87 \text{ kJ/kgK}$	μέση τιμή $100-200^\circ\text{C}$
C_{PA}	$= 1.10 \text{ kJ/kgK}$	του αέρα για σύγκριση

Απλό Μαθηματικό Μοντέλο

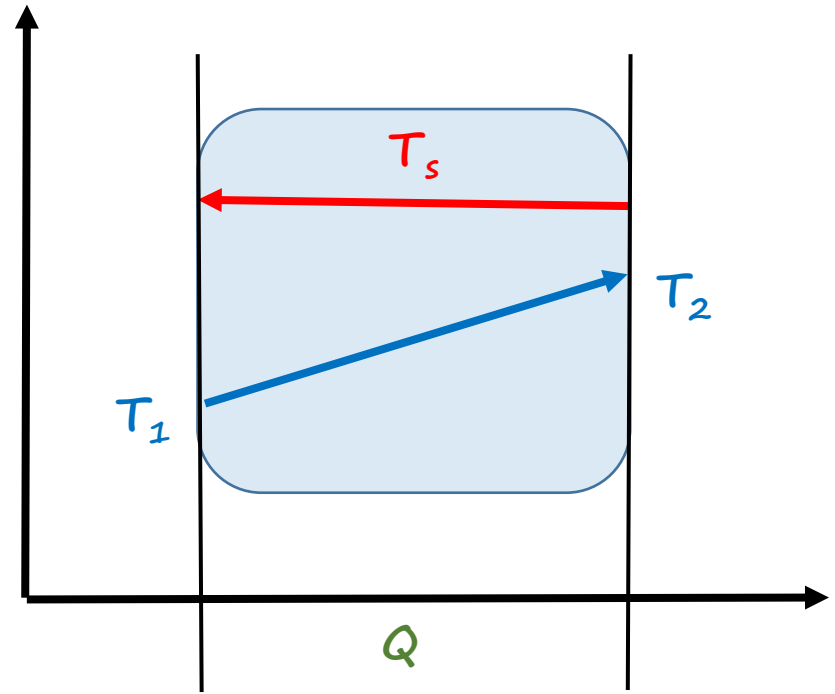
Θέρμανση υγρού με ατμό



$$Q = F_s \Delta H_s$$

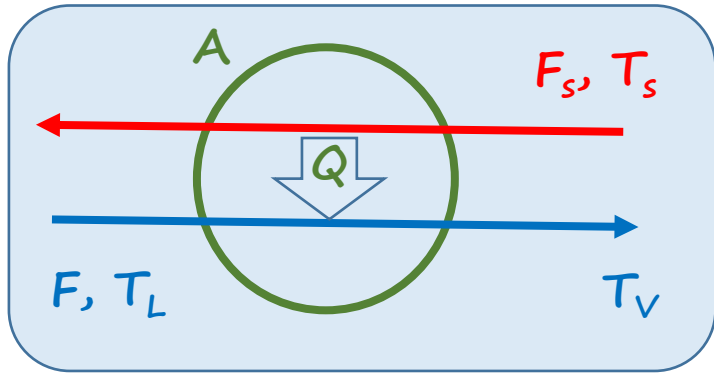
$$Q = F C_p (T_2 - T_1)$$

$$Q = A U \Delta T_L (T_s - T_1, T_s - T_2)$$



Απλό Μαθηματικό Μοντέλο

Εξάτμιση και υπερθέρμανση υγρού με ατμό



$$Q = F_s \Delta H_s$$

$$Q_L = F C_p (T_b - T_L)$$

$$Q_b = F \Delta H_b$$

$$Q_V = F C_p (T_V - T_b)$$

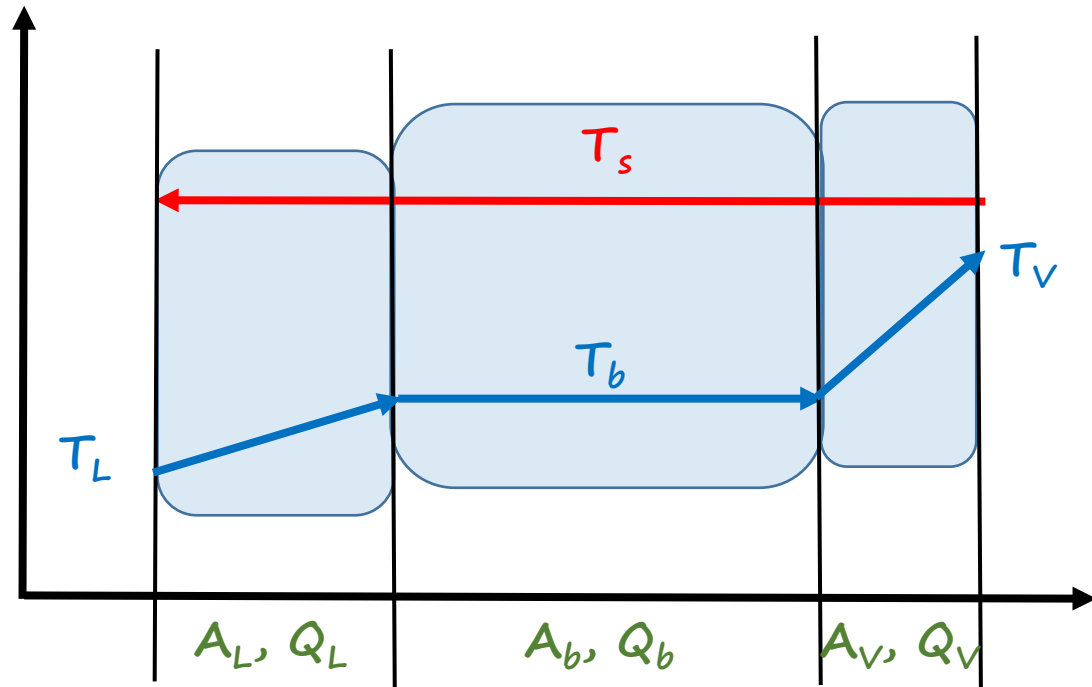
$$Q = Q_L + Q_b + Q_V$$

$$Q_L = A_L U_L \Delta T_L (T_s - T_1, T_s - T_b)$$

$$Q_b = A_b U_b (T_s - T_b)$$

$$Q_V = A_V U_V \Delta T_L (T_s - T_2, T_s - T_b)$$

$$A = A_L + A_b + A_V$$



$$\pi \chi U_L = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\pi \chi U_b = 5000 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\pi \chi U_V = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ενδεικτικό Κόστος

Εναλλάκτη κελύφους και σωλήνων

$$C_1 = 2 \text{ k€}/\text{m}^2$$

$$n = 2/3$$

Ηλεκτρισμού

$$C_e = 120 \text{ €/MWh}$$

Ατμού

$$C_s = 20 \text{ €/MWh}$$

Νερού ψύξης

$$C_w = 10 \text{ €/MWh}$$

$$C_w = 0.35 \text{ €/tn}$$

Άσκηση 1 Συμπύκνωση ατμών ακετόνης

Να υπολογιστεί η απαιτούμενη επιφάνεια ενός εναλλάκτη θερμότητας για τη συμπύκνωση κορεσμένων ατμών ακετόνης.

Προδιαγραφές Σχεδιασμού

Παροχή ατμών ακετόνης $F=25\text{kg/s}$

Θερμοκρασία συμπύκνωσης ατμών ακετόνης $T=85^\circ\text{C}$ (Πίεση $P=2.5\text{bar}$).

Λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωση ακετόνης $\Delta H=500\text{kJ/kg}$

Βοηθητικές Παροχές (Νερό Ψύξης)

Αρχική θερμοκρασία $T_{w1}=15\text{C}$

Τελική θερμοκρασία $T_{w2}=45\text{C}$

Ειδική θερμότητα $C_{pw}=4.18\text{kJ/kgK}$

Επιφανειακοί Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας

Συμπύκνωση ατμών ακετόνης $h_a=5.00\text{kW/m}^2\text{K}$

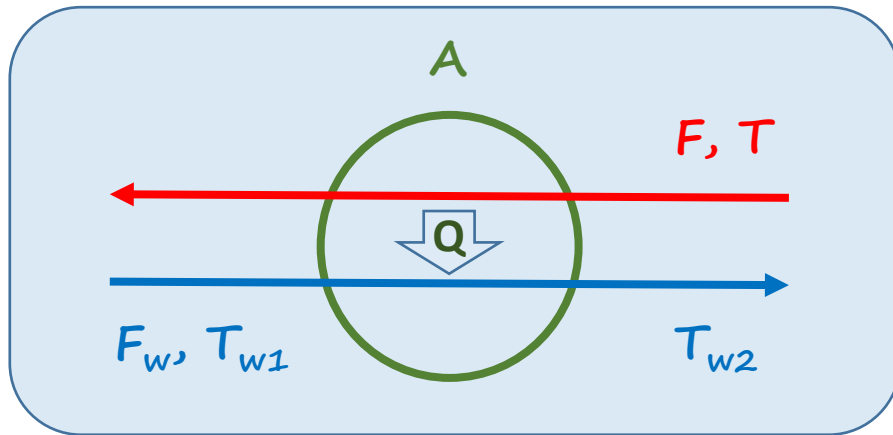
Νερού Ψύξης $h_w=3.50\text{kW/m}^2\text{K}$

Παραδοχές

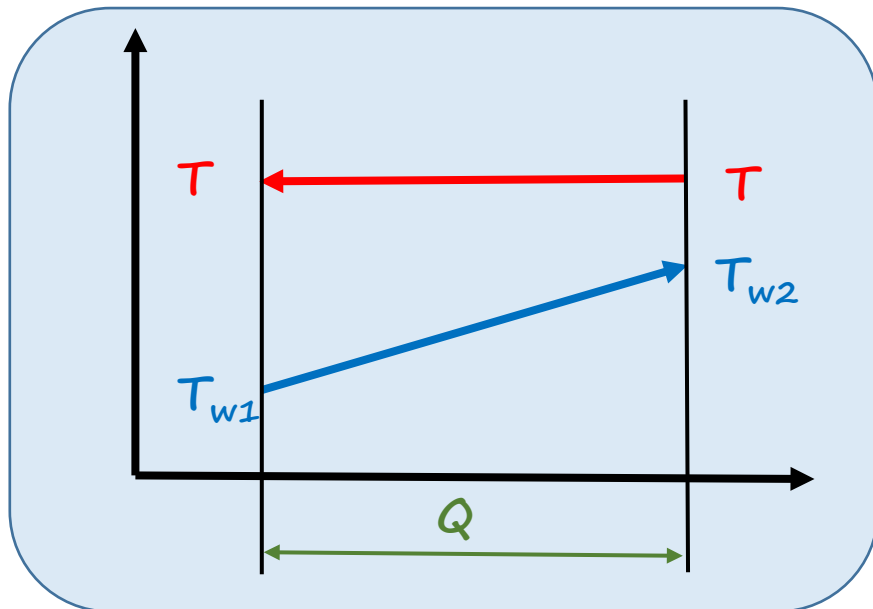
Σταθεροί επιφανειακοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας

Αμελητέα θερμική αντίσταση τοιχώματος διαχωρισμού των ρευστών

Διάγραμμα ροής



Διάγραμμα Ενθαλπίας-Θερμοκρασίας



Μαθηματικό Μοντέλο

Ισοζύγιο ενέργειας

$$(1) Q = F \Delta H$$

$$(2) Q = F_w C_{pw} (T_{w2} - T_{w1})$$

Εξίσωση θερμοροής

$$(3) 1/U = 1/h_w + 1/h_a$$

$$(4) \Delta T_L = \frac{[(T - T_{w2}) - (T - T_{w1})]}{\ln[(T - T_{w2}) / (T - T_{w1})]}$$

$$(5) Q = A U \Delta T_L$$

Επίλυση

$$(1) \rightarrow Q = 12.5 \text{ MW}$$

$$(2) \rightarrow F_w = 100 \text{ kg/s}$$

$$(3) \rightarrow U = 2.06 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$(4) \rightarrow \Delta T_L = 53.6^\circ\text{C}$$

$$(5) \rightarrow A = 115 \text{ m}^2$$

Εκτίμηση κόστους

Να υπολογιστεί το ετήσιο συνολικό κόστος της εγκατάστασης TAC

Μοναδιαίο κόστος εναλλάκτη θερμότητας $C_{exc} = 5.00 \text{ k€}/\text{m}^2$

Συντελεστής κλίμακας $n_{exc} = 0.75$

Επιβάρυνση της επένδυσης στο ετήσιο κόστος λειτουργίας $e = 0.20$

Ετήσιος χρόνος λειτουργίας της εγκατάστασης $t_y = 4000 \text{ h}/\text{y}$

Κόστος νερού ψύξης $C_w = 2 \text{ €}/\text{MWh}$

Κόστος εξοπλισμού

$$(6) C_{eq} = C_{1exc} A^{n_{exc}}$$

Κόστος λειτουργίας

$$(7) C_{op} = C_w Q t_y$$

Συνολικό Ετήσιο Κόστος

$$(8) TAC = e C_{eq} + C_{op}$$

Επίλυση

$$(6) \rightarrow C_{eq} = 174 \text{ k€}$$

$$(7) \rightarrow C_{op} = 100 \text{ k€/y}$$

$$(8) \rightarrow TAC = 135 \text{ k€/y}$$

Άσκηση 2 Συμπύκνωση υπέρθερμου ατμού

Να υπολογιστεί η απαιτούμενη επιφάνεια ενός εναλλάκτη θερμότητας για τη συμπύκνωση υπέρθερμων ατμών ακετόνης προς υπόψυκτο υγρό

Προδιαγραφές Σχεδιασμού

Παροχή ατμών ακετόνης $F=25\text{kg/s}$

Αρχική Θερμοκρασία υπέρθερμων ατμών $T_2=130\text{ }^\circ\text{C}$

Τελική Θερμοκρασία υπόψυκτου υγρού $T_1=20\text{ }^\circ\text{C}$

Θερμοκρασία συμπύκνωσης ατμών ακετόνης $T=85\text{ }^\circ\text{C}$ (Πίεση $P=2.5\text{bar}$).

Λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωση ακετόνης $\Delta H=500\text{kJ/kg}$

Μέση ειδική θερμότητα ατμών ακετόνης $C_{pV}=1.18\text{kJ/kgK}$

Μέση ειδική θερμότητα υγρής ακετόνης $C_{pL}=2.18\text{kJ/kgK}$

Βοηθητικές Παροχές (Νερό Ψύξης)

Αρχική Θερμοκρασία $T_{w1}=15\text{ }^\circ\text{C}$

Τελική Θερμοκρασία $T_{w2}=45\text{ }^\circ\text{C}$

Ειδική Θερμότητα $C_{pw}=4.18\text{kJ/kgK}$

Επιφανειακοί Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας

Συμπύκνωση ατμών ακετόνης $h_a=5.00\text{kW/m}^2\text{K}$

Νερού Ψύξης $h_w=3.50\text{kW/m}^2\text{K}$

Υγρή ακετόνη $h_L=1.00\text{kW/m}^2\text{K}$

Ατμοί ακετόνης $h_v=0.10\text{kW/m}^2\text{K}$

Κόστος εξοπλισμού

Μοναδιαίο κόστος εναλλάκτη θερμότητας $C_{exc} = 5.00 \text{ k€}/\text{m}^2$

Συντελεστής κλίμακας $n_{exc} = 0.75$

Επιβάρυνση της επένδυσης στο ετήσιο κόστος λειτουργίας $e = 0.20$

Κόστος λειτουργίας

Κόστος νερού ψύξης $C_w = 2 \text{ €}/\text{MWh}$

Ετήσιος χρόνος λειτουργίας της εγκατάστασης $t_y = 4000 \text{ h}/\text{y}$

Παραδοχές

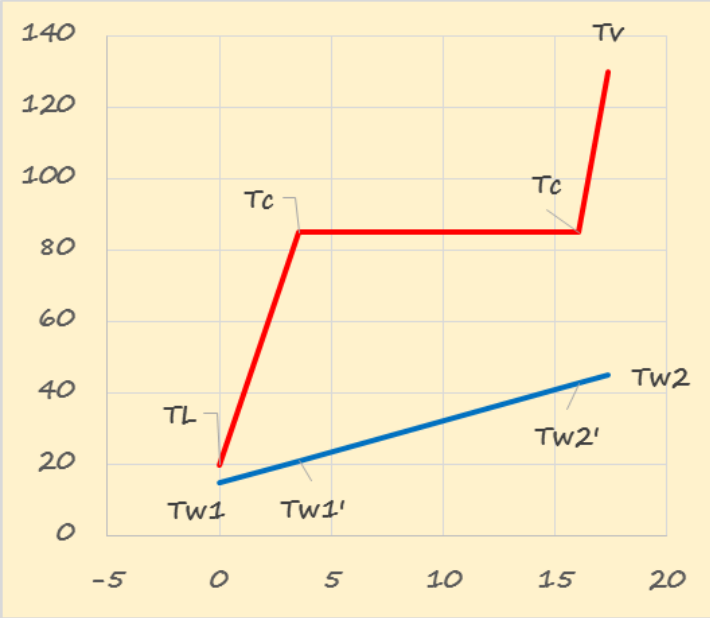
Σταθεροί επιφανειακοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας

Αμελητέα θερμική αντίσταση τοιχώματος διαχωρισμού των ρευστών

Δεν απαιτείται διόρθωση

της λογαριθμικής μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς

Αμελητέο κόστος αντλίας



$$Q_v = F C_{pv} (T_v - T_c)$$

$$\rightarrow Q_v = 1.33 \text{ MW}$$

$$Q_c = F \Delta H_c$$

$$\rightarrow Q_c = 12.5 \text{ MW}$$

$$Q_L = F C_{pL} (T_c - T_L)$$

$$\rightarrow Q_L = 3.54 \text{ MW}$$

$$Q = Q_v + Q_c + Q_L$$

$$\rightarrow Q = 17.4 \text{ MW}$$

$$Q = F_w C_{pw} (T_{w2} - T_{w1})$$

$$\rightarrow F_w = 139 \text{ kg/s}$$

$$Q_v = F_w C_{pw} (T_{w2} - T_{w2}^*)$$

$$\rightarrow T_{w2}^* = 42.7^\circ \text{C}$$

$$Q_L = F_w C_{pw} (T_{w1}^* - T_{w1})$$

$$\rightarrow T_{w1}^* = 21.1^\circ \text{C}$$

$$1/U_v = 1/h_g + 1/h_w$$

$$\rightarrow U_v = 0.10 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$1/U_c = 1/h_c + 1/h_w$$

$$\rightarrow U_c = 2.06 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$1/U_L = 1/h_L + 1/h_w$$

$$\rightarrow U_L = 0.78 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$\Delta T_v = \Delta T_L (T_v - T_{w2}, T_c - T_{w2}^*)$$

$$\rightarrow \Delta T_v = 61.2^\circ \text{C}$$

$$\Delta T_c = \Delta T_L (T_c - T_{w2}^*, T_c - T_{w1}^*)$$

$$\rightarrow \Delta T_c = 52.3^\circ \text{C}$$

$$\Delta T_L = \Delta T_L (T_c - T_{w1}^*, T_L - T_{w1})$$

$$\rightarrow \Delta T_L = 23.1^\circ \text{C}$$

$$A_v = Q_v / U_v / \Delta T_v$$

$$\rightarrow A_v = 223 \text{ m}^2$$

$$A_c = Q_c / U_c / \Delta T_c$$

$$\rightarrow A_c = 116 \text{ m}^2$$

$$A_L = Q_L / U_L / \Delta T_L$$

$$\rightarrow A_L = 197 \text{ m}^2$$

$$C_{eq} = C_1 A^n$$

$$\rightarrow C_{eq} = 557 \text{ k€}$$

$$C_{op} = C_w Q$$

$$\rightarrow C_{op} = 695 \text{ k€/y}$$

$$TAC = e C_{eq} + C_{op}$$

$$\rightarrow TAC = 806 \text{ k€/y}$$

$$A = A_v + A_c + A_L$$

$$\rightarrow A = 536 \text{ m}^2$$

Άσκηση 3 Ανάκτηση Θερμότητας (Απλό πρόβλημα σύνθεσης δικτύων εναλλακτών)

Σε βιομηχανική εγκατάσταση ζητείται να σχεδιαστεί το κατάλληλο δίκτυο εναλλακτών θερμότητας για τις θερμικές απαιτήσεις ως εξής:

(1) η ψύξη υγρού οργανικού διαλύτη παροχής $F_g = 25 \text{ kg/s}$
από αρχική θερμοκρασία $T_{g1} = 100^\circ\text{C}$
σε τελική $T_{g2} = 25^\circ\text{C}$

(2) Η θέρμανση αέριου μίγματος παροχής $F_a = 35 \text{ kg/s}$
από αρχική θερμοκρασία $T_{a1} = 25^\circ\text{C}$
σε τελική $T_{a2} = 140^\circ\text{C}$

Ειδικές Θερμότητες Ρευμάτων:

(1) Υγρού Οργανικού Διαλύτη $C_{pg}=3.10\text{kJ/kgK}$

(2) Αέριου Μίγματος $C_{pa}=1.04\text{kJ/kgK}$

Βοηθητικές παροχές:

(1) Κορεσμένος Ατμός θέρμανσης

Θερμοκρασία $T_s=160\text{C}$

Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης $\Delta H_s=2.10\text{kJ/kg}$

(2) Νερό Ψύξης

Αρχική Θερμοκρασία $T_{w1}=15\text{C}$

Τελική Θερμοκρασία $T_{w2}=45\text{C}$

Ειδική Θερμότητα $C_{pw}=4.18\text{kJ/kgK}$

Επιφανειακοί Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας:

στην πλευρά του:

- (1) Συμπυκνούμενου Ατμού
- (2) Νερού Ψύξης
- (3) Οργανικού Διαλύτη
- (4) Αέριου Μίγματος

$$h_s = 5.00 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$h_w = 2.00 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$h_g = 0.75 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$h_a = 0.10 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

Κόστος Εξοπλισμού

Εναλλάκτη Θερμότητας

$$C_{1exc} = 5.00 \text{ k€}$$

$$\eta_{exc} = 0.75$$

Βοηθητικών Παροχών

Ατμού Θέρμανσης $C_s = 20 \text{ €/MWh}$

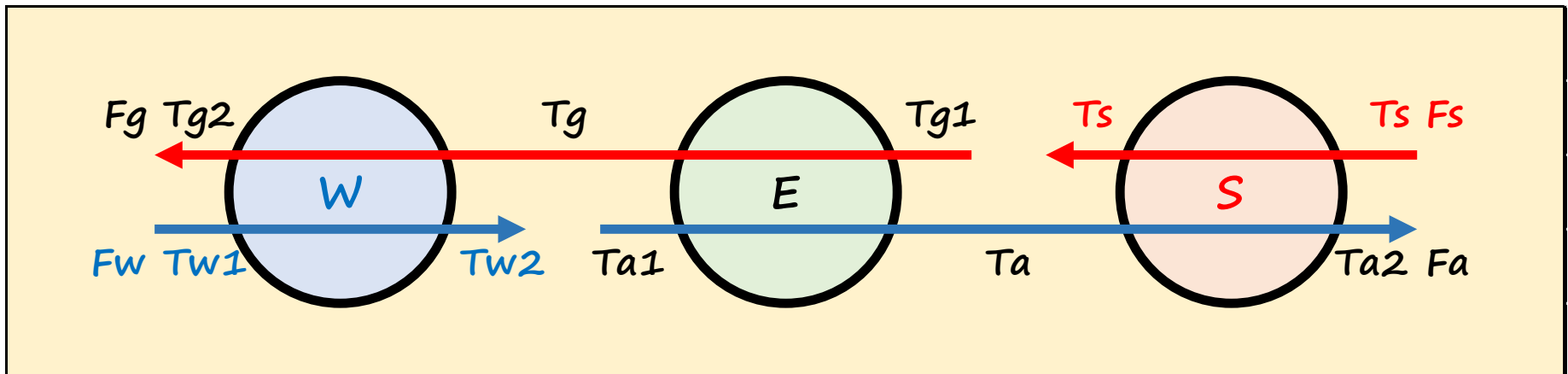
Νερού Ψύξης $C_w = 10 \text{ €/MWh}$

Διάγραμμα Ροής

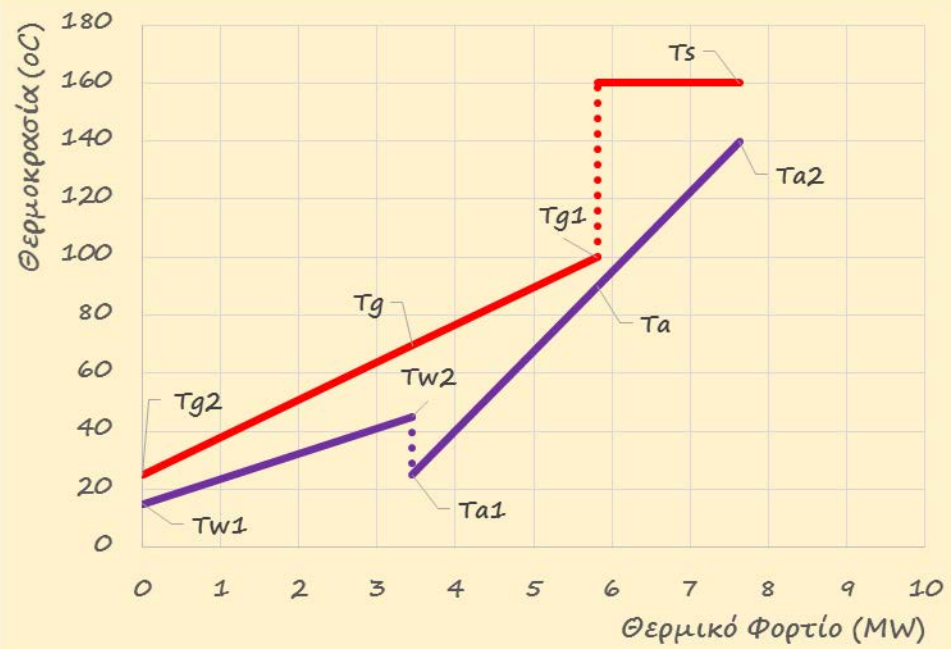
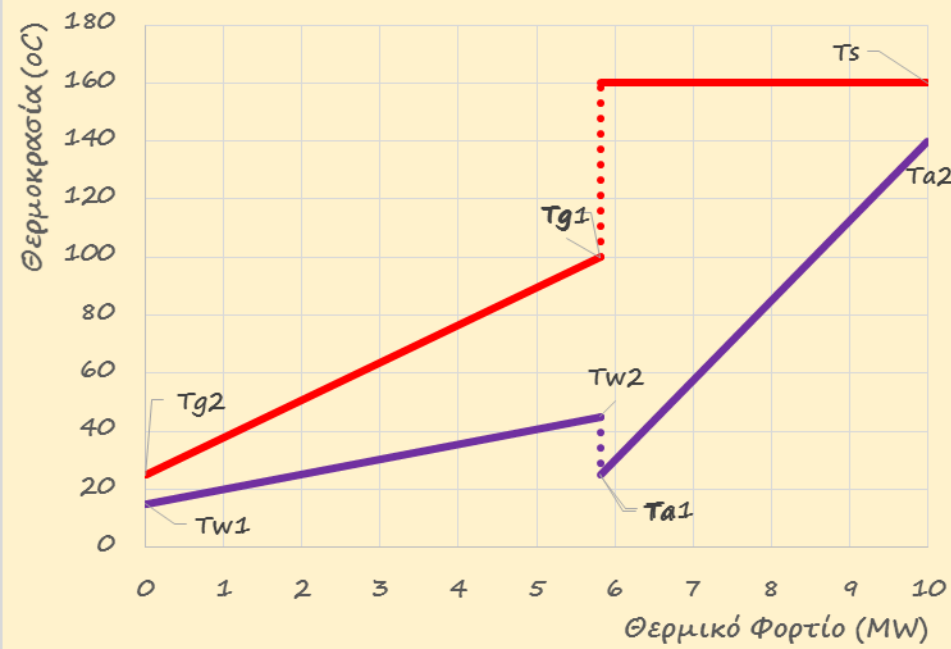
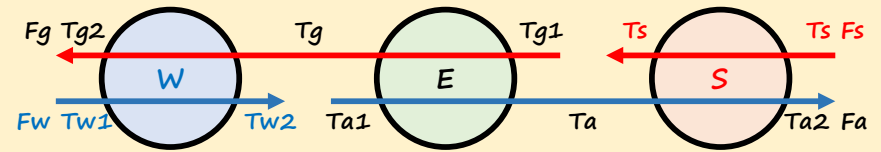
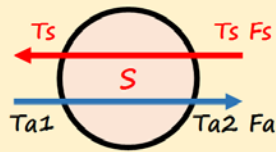
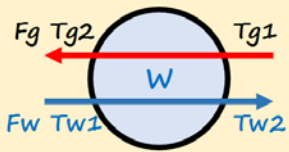
Ανεξάρτητο δίκτυο

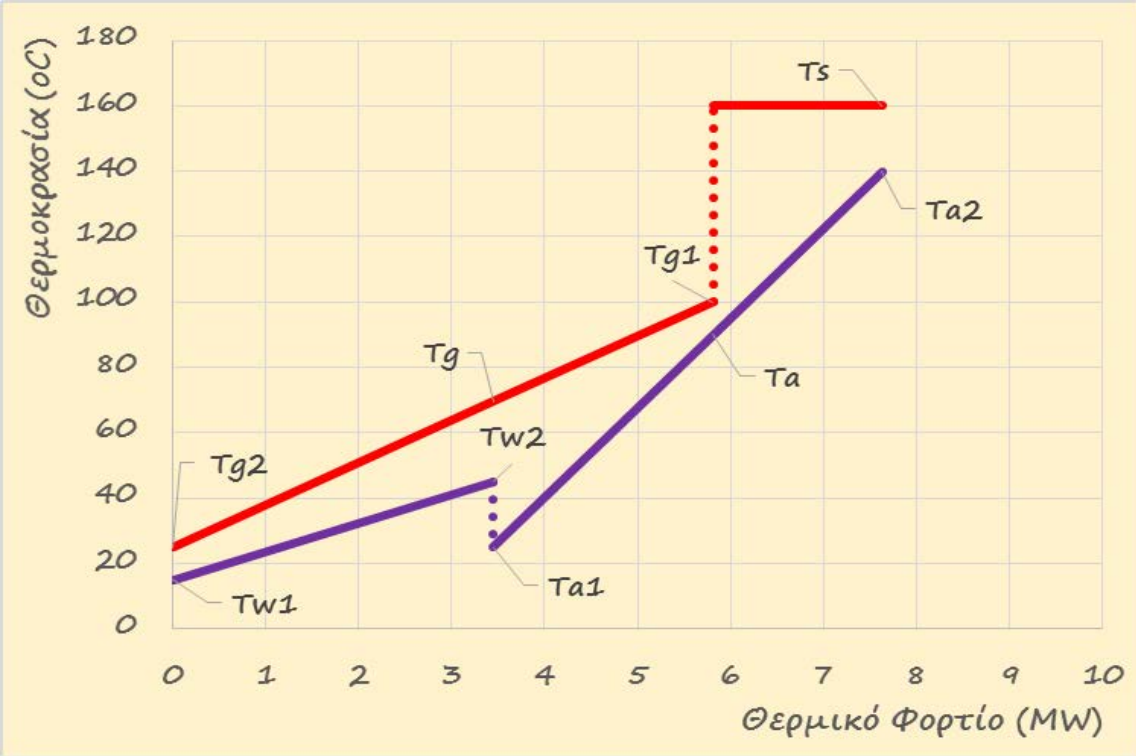


Με ενεργειακή ολοκλήρωση



Διάγραμμα Ενθαλπίας-Θερμοκρασίας





$$\text{Ορισμός } \Delta T_{\min} = T_{g1} - T_a$$

$\Delta T_{\min} :=$ μεταβλητή σχεδιασμού

$$T_{a1} < T_a < T_{g1}$$

$$\rightarrow 0 < \Delta T_{\min} < T_{g1} - T_{a1}$$

Αν $T_a = T_{a1}$
δεν συμβαίνει ανάκτηση

$$\rightarrow \Delta T_{\min} = T_{g1} - T_{a1}$$

Ισοζύγια Ενέργειας

$$(1) Q_e = F_a C_{pa} (T_a - T_{a1})$$

$$(2) Q_e = F_g C_{pg} (T_{g1} - T_g)$$

$$(3) Q_s = F_a C_{pa} (T_{a2} - T_a)$$

$$(4) Q_s = F_s \Delta H_s$$

$$(5) Q_w = F_a C_{pa} (T_a - T_{a1})$$

$$(6) Q_w = F_w C_{pw} (T_{w2} - T_{w1})$$

$$\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$$

$$T_a = 90^\circ\text{C}$$

$$(1) \rightarrow Q_e = 2.37 \text{ MW}$$

$$(2) \rightarrow T_g = 69.5^\circ\text{C}$$

$$(3) \rightarrow Q_s = 1.82 \text{ MW}$$

$$(4) \rightarrow F_s = 0.867 \text{ kg/s}$$

$$(5) \rightarrow Q_w = 3.45 \text{ MW}$$

$$(6) \rightarrow F_w = 27.5 \text{ kg/s}$$

Εξίσωση θερμοροής

$$(1) 1/U_e = 1/h_g + 1/h_a$$

$$(2) 1/U_s = 1/h_g + 1/h_s$$

$$(3) 1/U_w = 1/h_a + 1/h_w$$

$$(1) \rightarrow U_e = 0.088 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$(2) \rightarrow U_s = 0.098 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$(3) \rightarrow U_w = 0.545 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

$$(4) \Delta T_e = \Delta T_L (T_{g1} - T_a, T_g - T_{a1})$$

$$(5) \Delta T_s = \Delta T_L (T_s - T_{a2}, T_s - T_a)$$

$$(6) \Delta T_w = \Delta T_L (T_g - T_{w2}, T_{g2} - T_{w1})$$

$$(4) \rightarrow \Delta T_e = 23.1 \text{ C}$$

$$(5) \rightarrow \Delta T_s = 39.9 \text{ C}$$

$$(6) \rightarrow \Delta T_w = 16.2 \text{ C}$$

$$(7) A_e = Q_e / U_e / \Delta T_e$$

$$(8) A_s = Q_s / U_s / \Delta T_s$$

$$(9) A_w = Q_w / U_w / \Delta T_w$$

$$(7) \rightarrow A_e = 1161 \text{ m}^2$$

$$(8) \rightarrow A_s = 465 \text{ m}^2$$

$$(9) \rightarrow A_w = 391 \text{ m}^2$$

Κόστος

$$(1) C_{eq} = C_1 A_e^n + C_1 A_s^n + C_1 A_w^n$$

$$(2) C_{eq} = C_s Q_s + C_w Q_w$$

$$(3) TAC = e C_{eq} + C_{op}$$

$$(1) \rightarrow C_{eq} = 1548 \text{ k€}$$

$$(2) \rightarrow C_{op} = 401 \text{ k€/y}$$

$$(3) \rightarrow TAC = 711 \text{ €/y}$$

Αριστοποίηση

Χωρίς ανάκτηση:
 $TAC=1038\text{k€}/y$

Με ανάκτηση
και άριστο $\Delta T_{min}=10^\circ\text{C}$:
 $TAC=710\text{k€}/y$

Δηλαδή
Εξοικονόμηση 32% !!!

