



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ  
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



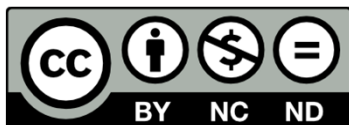
# ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ενότητα 5: Εναλλάκτες θερμότητας

Χατζηαθανασίου Βασίλειος

Καδή Στυλιανή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



# Άδειες Χρήσης

---

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ  
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



# Εναλλάκτες Θερμότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην κοινωνία της γνώσης*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα ενότητας

---

1. Τύποι εναλλακτών
2. Συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας
3. Υπολογισμός μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς
4. Ενεργειακά ισοζύγια
5. Μέθοδος των μονάδων μεταφοράς
6. Αποτελεσματικότητα



# Εναλλάκτες Θερμότητας

---

- Οι συσκευές στις οποίες έχουμε μεταφορά ενέργειας, με τη μορφή θερμότητας, μεταξύ δύο ρευστών που βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες και διαχωρίζονται συνήθως από κάποιο στερεό τοίχωμα.



# Τύποι εναλλακτών (1/2)

---

- Κατηγορίες ανάλογα:
  - με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας,
  - τον τύπο της ροής
  - την κατασκευαστική τους διάταξη.



# Τύποι εναλλακτών (2/2)

---

- Κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας:
  - άμεσης.
  - έμμεσης.
  - ημιάμεσης μετάδοσης.





# Εναλλάκτες άμεσης μετάδοσης (1/3)

---

- Η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό ρευστό στο ψυχρό με άμεση επαφή ή ανάμιξη των δύο ρευστών.
- Παράδειγμα: πύργοι ψύξης του νερού των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



# Εναλλάκτες άμεσης μετάδοσης (2/3)

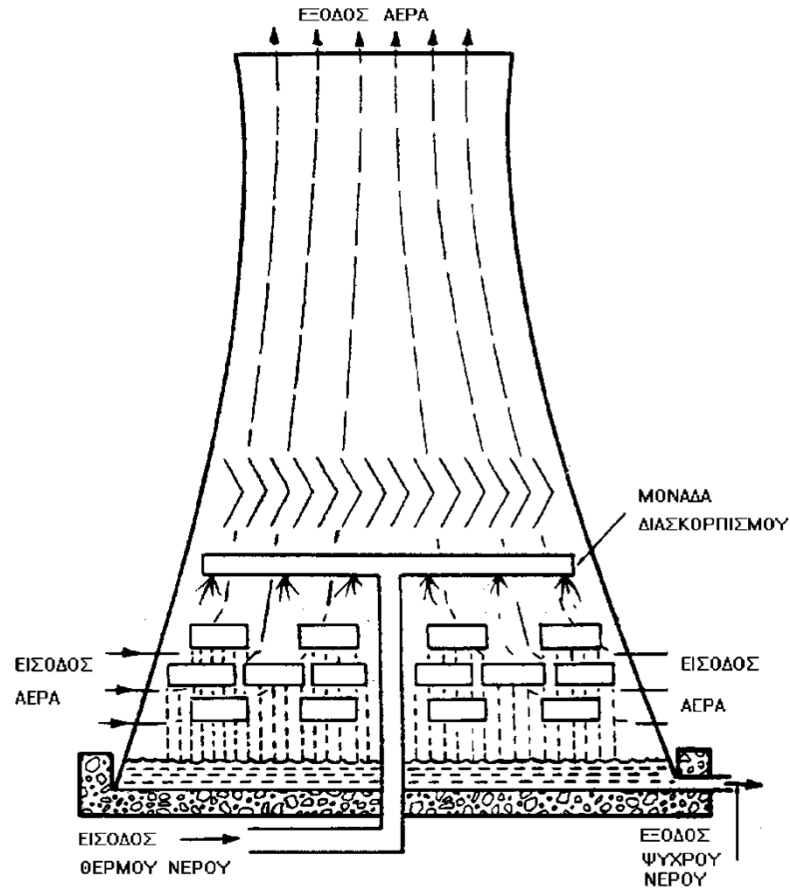
---



**Εικόνα 1:** Πύργοι ψύξης σε εργοστάσιο ΔΕΗ



# Εναλλάκτες άμεσης μετάδοσης (3/3)

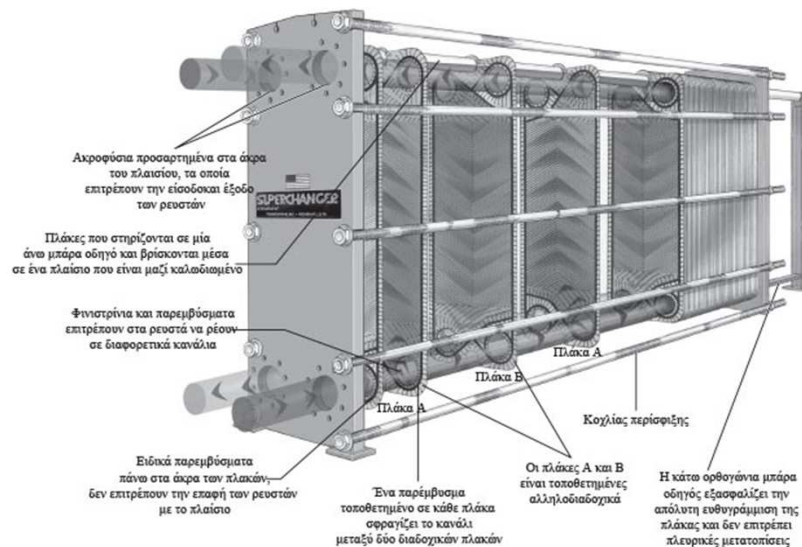


Εικόνα 2: Πύργος ψύξης φυσικού ελκυσμού



# Εναλλάκτες έμμεσης μετάδοσης

- Το θερμό και το ψυχρό ρευστό ρέουν ταυτόχρονα μέσα στον εναλλάκτη, διαχωρίζονται δε από ενδιάμεσα τοιχώματα μέσω των οποίων και γίνεται η μεταφορά θερμότητας.
- Παράδειγμα: ατμολέβητες, συμπυκνωτές θερμαντικά σώματα.

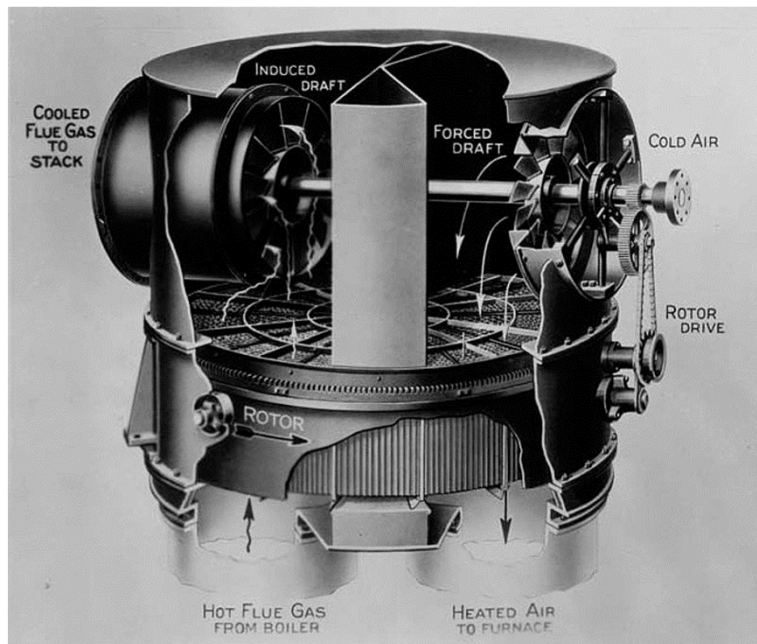


Εικόνα 3: Εναλλάκτης θερμότητας ρευστού-ρευστού τύπου πλάκας και πλαισίου



# Εναλλάκτες ημιάμεσης μετάδοσης

- Διατάξεις στις οποίες η ίδια επιφάνεια θέρμανσης εκτίθεται διαδοχικά στο θερμό και το ψυχρό ρευστό.
- Παράδειγμα: προθερμαντές αέρα τύπου Ljungstrom.



Εικόνα 4: Προθερμαντής αέρα τύπου Ljungstrom



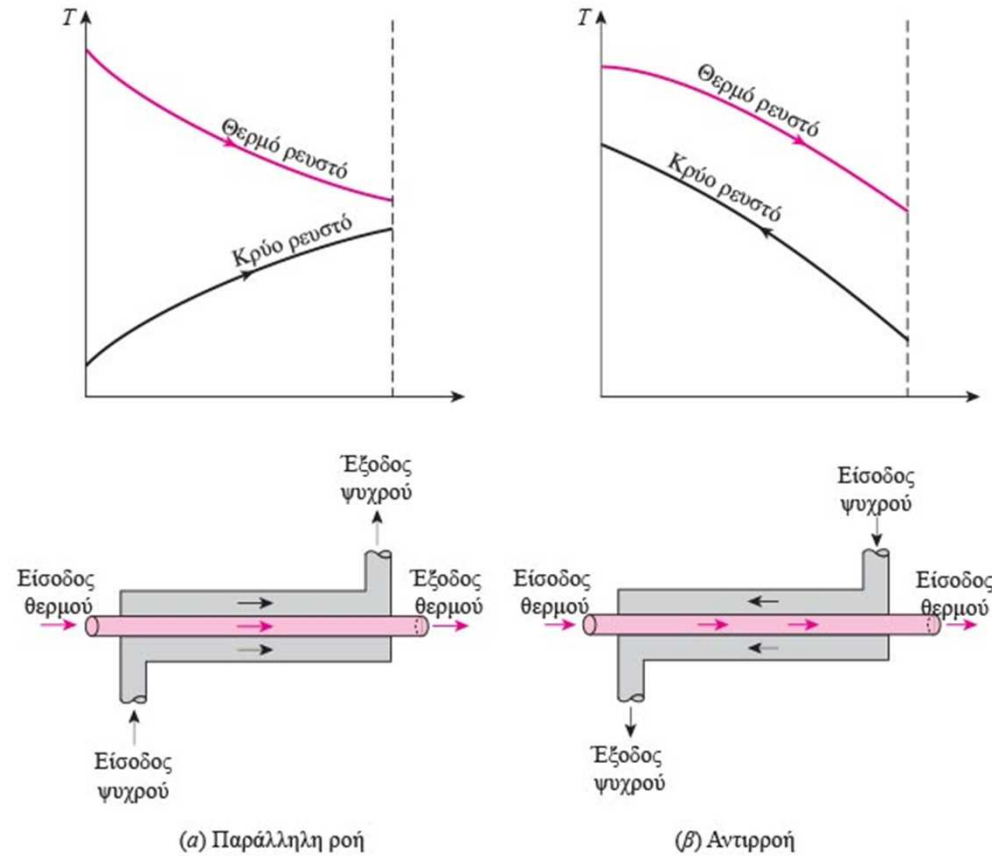
# Τύποι εναλλακτών (1/6)

---

- Κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο της ροής και την κατασκευαστική τους διάταξη.
  - ομορροής.
  - αντιρροής.
  - πτερυγιοφόρων ή μη σωλήνων (ροές μιγνυόμενες ή μη μιγνυόμενες).
  - δέσμης σωλήνων κελύφους.



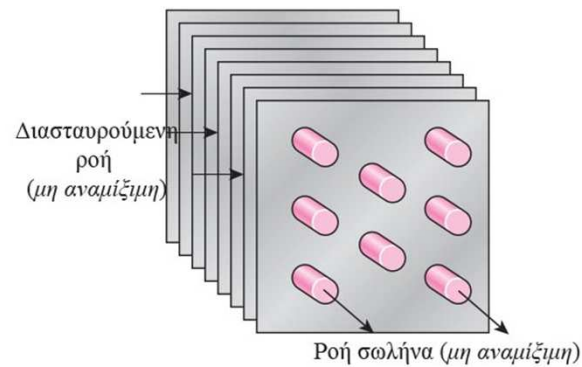
# Τύποι εναλλακτών (2/6)



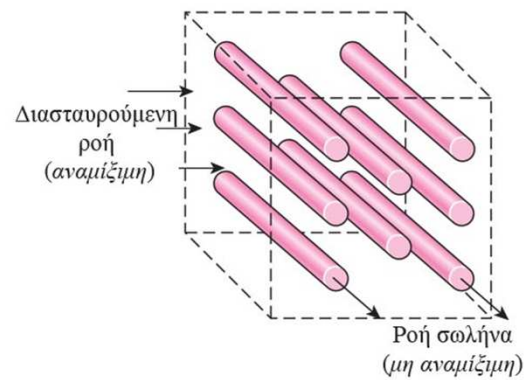
**Εικόνα 5:** Οι διαφορετικοί τύποι ροής και τα σχετιζόμενα με αυτούς προφίλ θερμοκρασιών σε έναν εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα



# Τύποι εναλλακτών (3/6)



(α) Αμφότερες οι ροές είναι μη αναμίξιμες



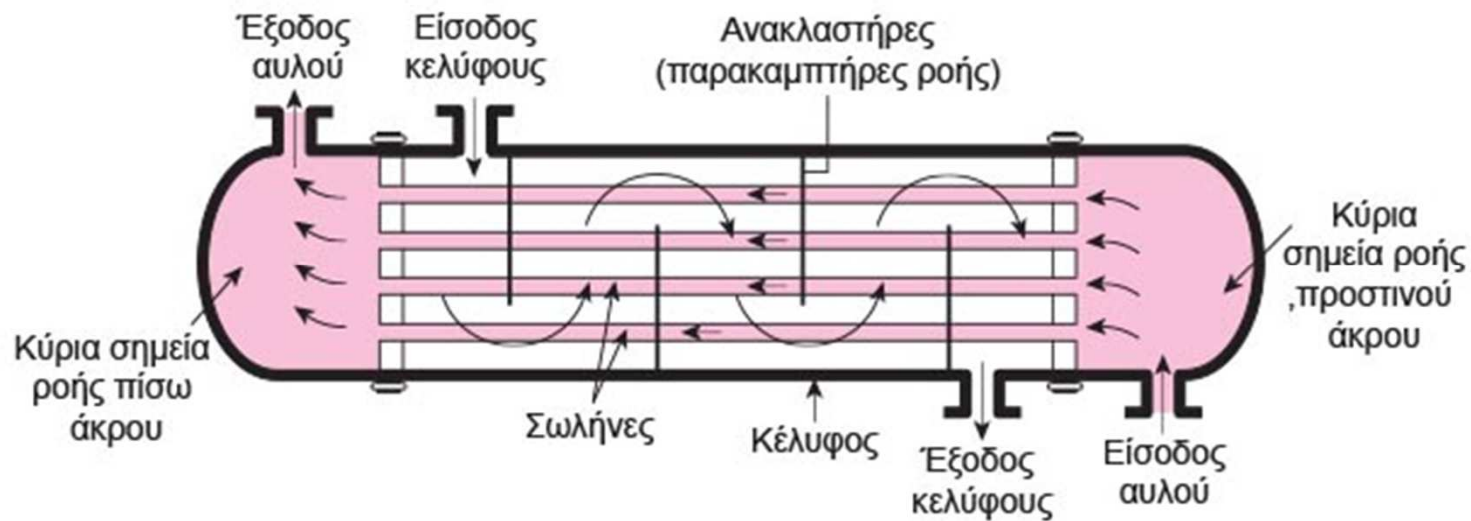
(β) Ένα ρευστό αναμίξιμο, ένα μη αναμίξιμο

**Εικόνα 6:** Διαφορετικές διαμορφώσεις ροής σε εναλλάκτες θερμότητας σταυρωτής ροής





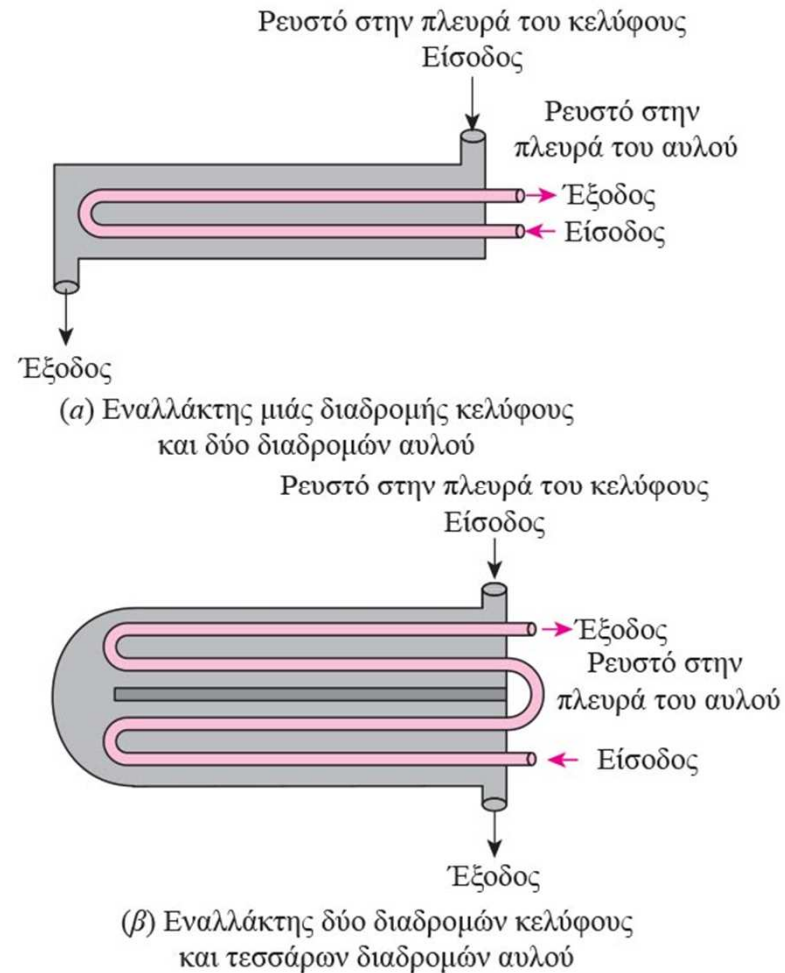
# Τύποι εναλλακτών (4/6)



**Εικόνα 7:** Σχηματικό διάγραμμα ενός εναλλάκτη θερμότητας κελύφους αυλού (μιας διαδρομής διαφράγματος και μιας διαδρομής σωλήνα)



# Τύποι εναλλακτών (5/6)



**Εικόνα 8:** Διατάξεις ροής πολλαπλών διαδρομών σε εναλλάκτες θερμότητας κελύφους - αυλού



# Τύποι εναλλακτών (6/6)

---

- Κατηγορίες ανάλογα με τη φύση του ρευστού.
  - αερίου-αερίου (προθερμαντής αέρα).
  - αερίου-υγρού (ψυγείο αυτοκινήτου).
  - υγρού-υγρού.
  - συμπύκνωσης ατμού με υγρό (συμπυκνωτής ΑΗΣ).
  - συμπύκνωσης ατμού με αέριο (συμπυκνωτής ψυγείων).
  - εξάτμισης υγρού με θερμό αέριο ή υγρό (ψύκτες πόσιμου νερού).



# Συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας (1/6)

---

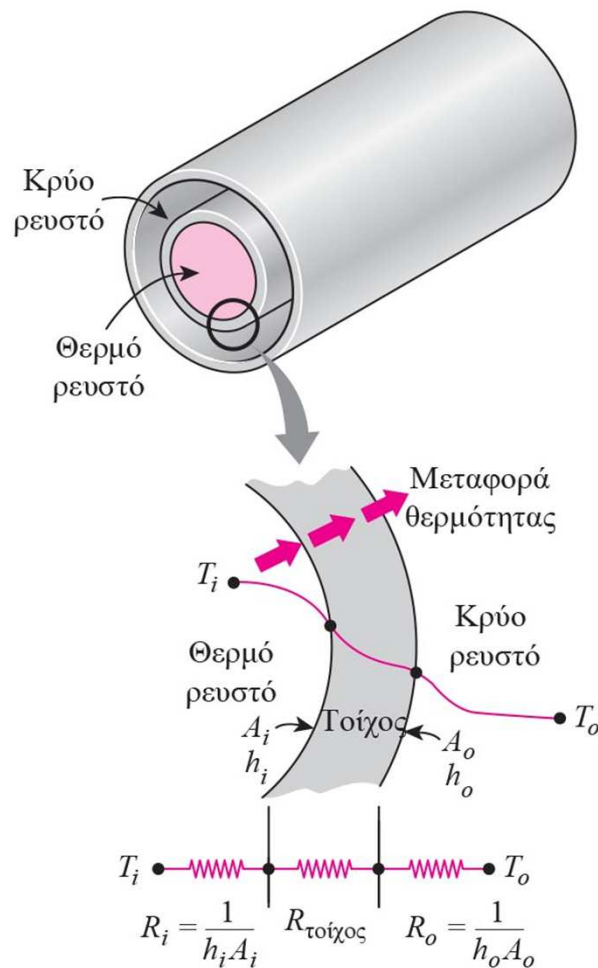
- Θερμορροή :

$$\dot{Q} = kA\Delta T_m$$

- $k$ : ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του εναλλάκτη [ $W / m^2 \cdot K$ ]
- $A$ : η συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του εναλλάκτη [ $m^2$ ]
- $\Delta T_m$ : η μέση θερμοκρασιακή διαφορά στον εναλλάκτη [ $^{\circ}C$ ]



# Συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας (2/6)



**Εικόνα 9:** Δίκτυο θερμικής αντίστασης που σχετίζεται με τη μεταφορά θερμότητας σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα



# Συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας (3/6)

---

- $kA=1/R_{ολ}$
- Συνολική θερμική αντίσταση για κυλινδρικό τοίχωμα

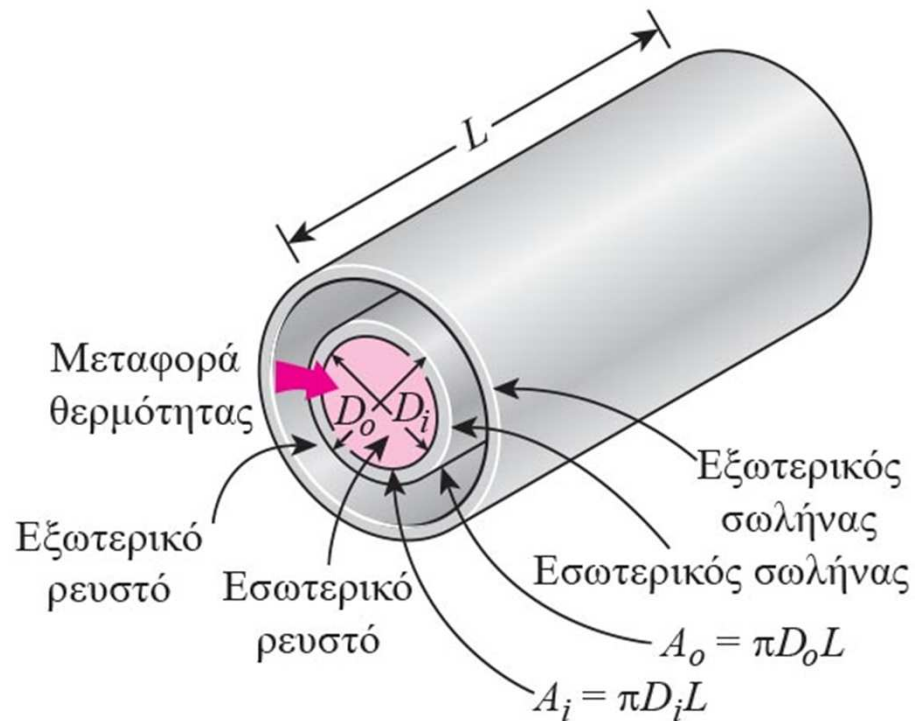
$$R_{ολ} = R_i + R_w + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi\lambda L} + \frac{1}{h_o A_o}$$

- Συντελεστής θερμοπερατότητας:

$$\frac{1}{k} = R_{ολ} A$$



# Συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας (4/6)



Εικόνα 10: Οι δύο επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας που σχετίζονται με τον εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα



# Συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας (5/6)

---

- Συντελεστής θερμοπερατότητας με ρύπανση:

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,1}''}{A_i} + R_w + \frac{R_{f,2}''}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$





# Συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας (6/6)

- Συνολικός συντελεστής:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \frac{\Delta T_m}{R} \\ &= kA\Delta T_m = k_i A_i \Delta T_m = k_o A_o \Delta T_m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{kA} &= \frac{1}{k_i A_i} = \frac{1}{k_o A_o} = \\ &\frac{1}{h_i A_i} + R_w + \frac{1}{h_o A_o}\end{aligned}$$



# Τυπικές τιμές $k$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

Νερό – νερό	850 – 1700
Νερό – έλαιο	110 – 350
Συμπυκνωτής ατμού (νερό στους σωλήνες)	1000-6000
Συμπυκνωτής αμμωνίας (νερό στους σωλήνες)	800 – 1400
Συμπυκνωτής αλκοόλης (νερό στους σωλήνες)	250 – 700
Πτερυγιοφόρων σωλήνων	25 - 50



# Ανάλυση εναλλακτών θερμότητας

---

- Σχεδιασμός:
  - $T_o$  δεδομένο
  - $A=?$
  
- Λειτουργία:
  - $m, T_i$ : δεδομένα  $\dot{Q}, T_o=?$



# Σχεδιασμός

---

- προεκτίμηση  $k$ .
- υπολογισμός  $\Delta T_m$ .
- υπολογισμός  $A$ .
- καθορισμός γεωμετρίας:  $A$ .
- γεωμετρία: Συντελεστές συναγωγής  $h$ .
- υπολογισμός  $k$ .
- σύγκριση  $k$  με προεκτίμηση.



# Ανάλυση εναλλακτών θερμότητας (1/3)

---

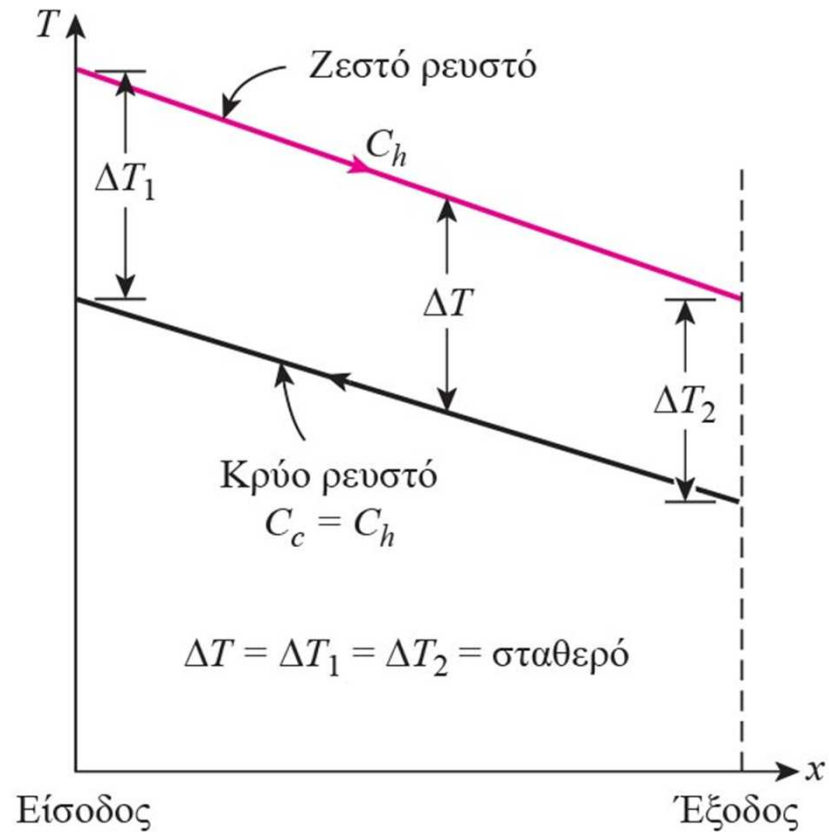
- Συνολική θερμορροή μεταξύ θερμού και ψυχρού ρευστού:

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 c_{p,1} (T_{1,i} - T_{1,o}) = \dot{m}_2 c_{p,2} (T_{2,o} - T_{2,i})$$

- Σύμβαση:
  - 1: θερμό ρευστό
  - 2: ψυχρό ρευστό
  - i: είσοδος
  - o: έξοδος



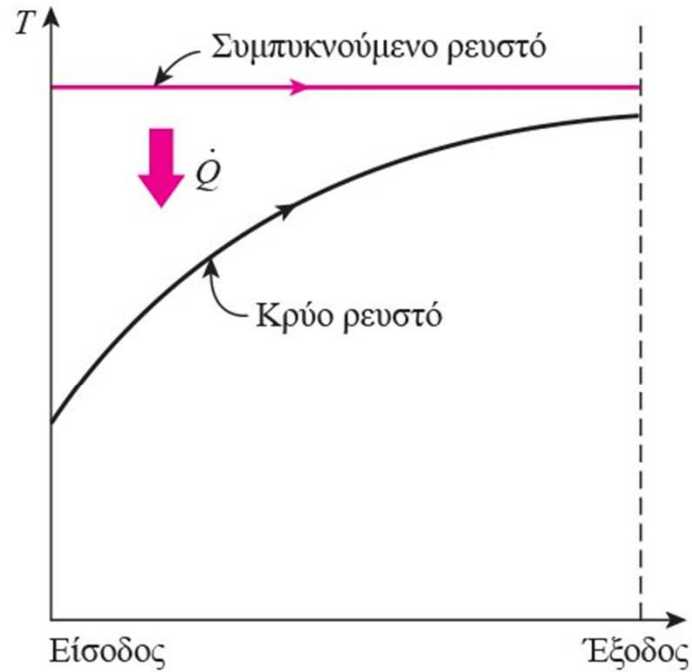
# Ανάλυση εναλλακτών θερμότητας (2/3)



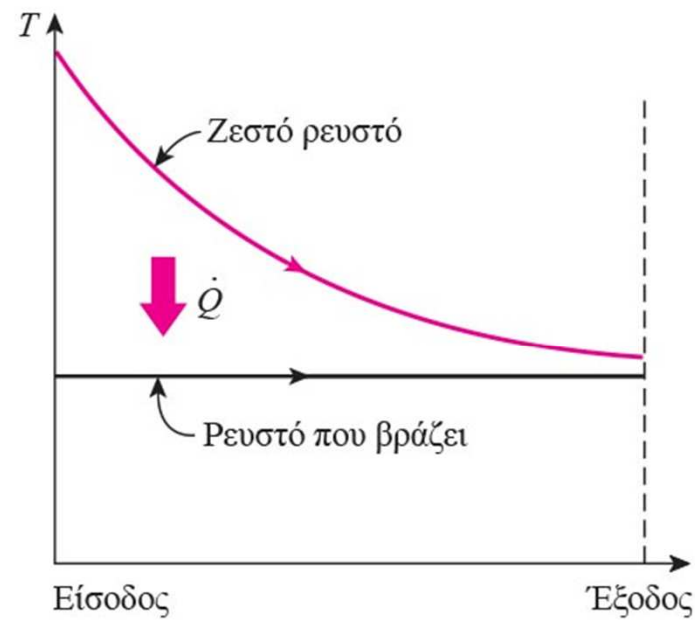
**Εικόνα 11:** Δύο ρεύματα ρευστού που έχουν τους ίδιους ρυθμούς θερμοχωρητικότητας υφίστανται την ίδια θερμοκρασιακή μεταβολή σε έναν καλά μονωμένο εναλλάκτη θερμότητας



# Ανάλυση εναλλακτών θερμότητας (3/3)



(a) Συμπυκνωτής ( $C_h \rightarrow \infty$ )



(B) Βραστήρας ( $C_c \rightarrow \infty$ )

**Εικόνα 12:** Μεταβολή των θερμοκρασιών του ρευστού σε έναν εναλλάκτη θερμότητας όταν το ένα από τα δύο ρευστά συμπυκνώνεται ή βράζει



# Υπολογισμός μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς (1/2)

---

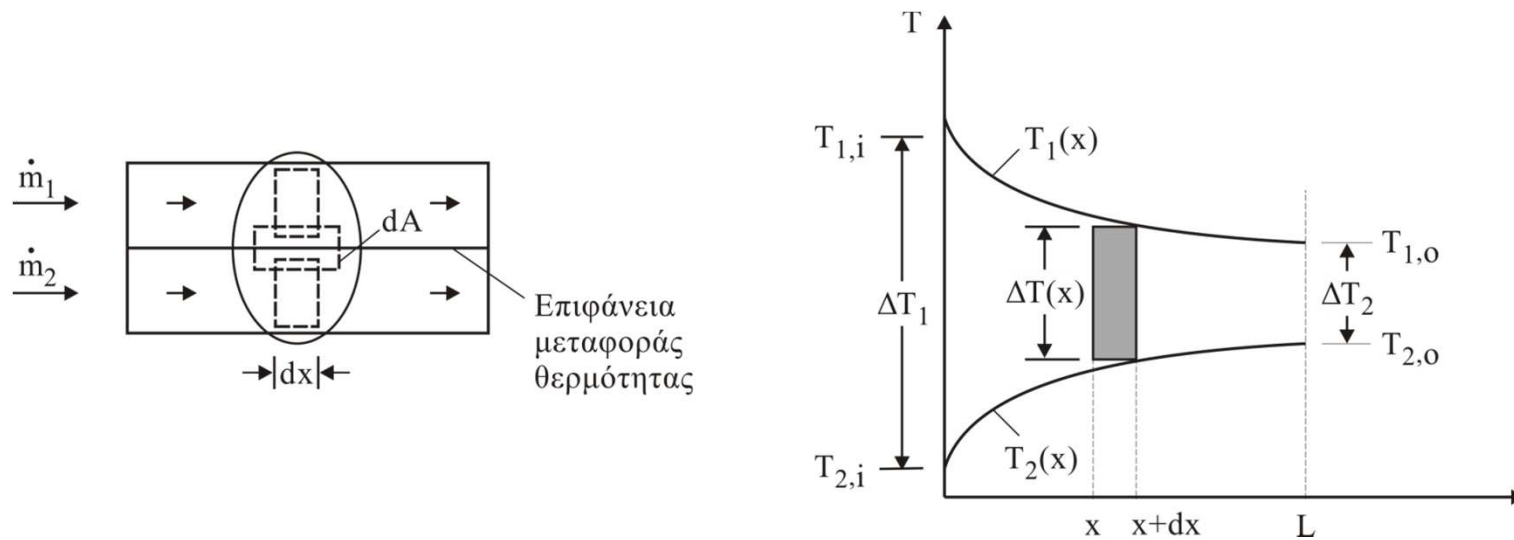
$$\dot{Q} = kA\Delta T_m$$

- Εναλλάκτες ομορροής
- $\Delta T(x) = T_1(x) - T_2(x)$
- $T_{2,o} < T_{1,o}$





# Υπολογισμός μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς (2/2)



Εικόνα 13: Θερμοκρασιακές κατανομές σε εναλλάκτη ομορροής



# Ενεργειακά ισοζύγια (1/7)

---

$$\dot{m}_1 c_{p1} T_1 = \dot{m}_1 c_{p1} \left( T_1 + \frac{dT_1}{dx} dx \right) + k(T_1 - T_2) dx$$

$$\dot{m}_2 c_{p2} T_2 + k(T_1 - T_2) dx = \dot{m}_2 c_{p2} \left( T_2 + \frac{dT_2}{dx} dx \right)$$



# Ενεργειακά ισοζύγια (2/7)

---

$$\frac{dT_1}{dx} = -\frac{ka}{\dot{m}_1 c_{p1}} (T_1 - T_2) = -\frac{ka}{\dot{m}_1 c_{p1}} \Delta T$$

$$\frac{dT_2}{dx} = \frac{ka}{\dot{m}_2 c_{p2}} (T_1 - T_2) = \frac{ka}{\dot{m}_2 c_{p2}} \Delta T$$

- Τοπική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θερμού και ψυχρού ρευστού:

$$\Delta T = \Delta T(x) = T_1(x) - T_2(x)$$



# Ενεργειακά ισοζύγια (3/7)

$$\frac{d\Delta T}{dx} = -\left(\frac{1}{\dot{m}_1 c_{p1}} + \frac{1}{\dot{m}_2 c_{p2}}\right) ka\Delta T = -B_o ka\Delta T$$

$$B_o \equiv \frac{1}{\dot{m}_1 c_{p1}} + \frac{1}{\dot{m}_2 c_{p2}}$$

$$\int_{\Delta T_1}^{\Delta T} \frac{d\Delta T}{\Delta T} = -B_o ka \int_0^x dx$$

$$\ln\left(\frac{\Delta T}{\Delta T_1}\right) = -B_o kax$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_1} = e^{-B_o kax}$$



# Ενεργειακά ισοζύγια (4/7)

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -B_o kA \qquad \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = e^{-B_o kA}$$

$A = aL$  η συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας.

$$\dot{m}_1 c_{p1} = \frac{\dot{Q}}{T_{1,i} - T_{1,o}} \qquad \dot{m}_2 c_{p2} = \frac{\dot{Q}}{T_{2,o} - T_{2,i}}$$



# Ενεργειακά ισοζύγια (5/7)

$$\begin{aligned}\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) &= -B_o kA = -\left(\frac{1}{\dot{m}_1 c_{p1}} + \frac{1}{\dot{m} c_{p2}}\right) kA = \\ &= -kA \left( \frac{T_{1,i} - T_{1,o}}{\dot{Q}} + \frac{T_{2,o} - T_{2,i}}{\dot{Q}} \right) = \\ &= -\frac{kA}{\dot{Q}} \left[ (T_{1,i} - T_{2,i}) - (T_{1,o} - T_{2,o}) \right] = \\ &= -\frac{kA}{\dot{Q}} (\Delta T_1 - \Delta T_2)\end{aligned}$$



# Ενεργειακά ισοζύγια (6/7)

---

$$\dot{Q} = kA \left( \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \right)$$

$$\dot{Q} = kA \Delta T_{lm}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$



# Ενεργειακά ισοζύγια (7/7)

---

- Για εναλλάκτη ομορροής:

$$\Delta T_1 \equiv T_{1,i} - T_{2,i}$$

$$\Delta T_2 \equiv T_{1,o} - T_{2,o}$$

- Για εναλλάκτη αντιρροής:

$$\Delta T_1 \equiv T_{1,i} - T_{2,o}$$

$$\Delta T_2 \equiv T_{1,o} - T_{2,i}$$





# Εναλλάκτες πολλαπλών και διασταυρωμένων ρευμάτων

$$\Delta T_{\ell m} = F \cdot \Delta T_{\ell m, a}$$

- F: συντελεστής διόρθωσης

$$P = \frac{t_0 - t_i}{T_i - t_i} \quad R = \frac{T_i - T_0}{t_0 - t_i} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{W}_T}$$

- t: στις σωληνώσεις

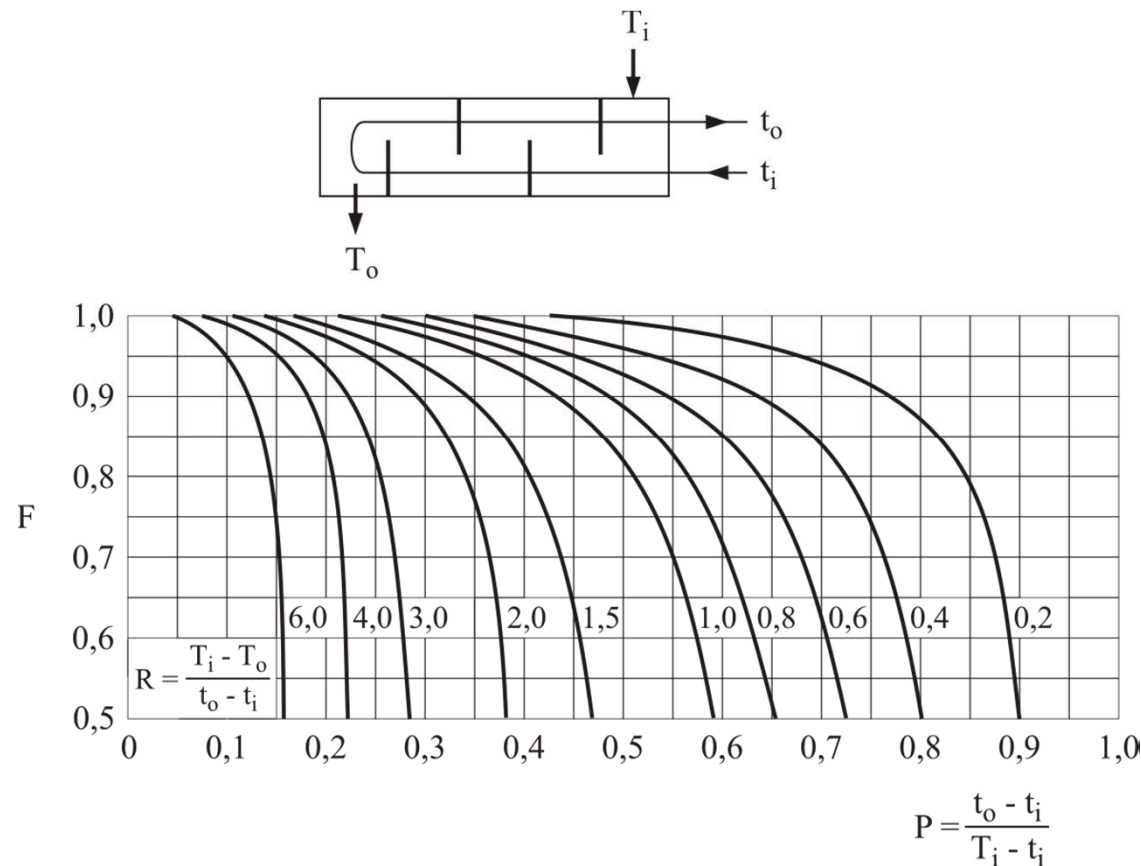
$$\dot{W}_t = \dot{m}_t \cdot c_{p_t} \quad \dot{W}_T = \dot{m}_T c_{p_T}$$

- Πολλαπλές διασταυρώσεις:

$$\Delta T_{\ell m} = \sqrt[n]{F_{n=1}} \cdot \Delta T_{\ell m, a}$$



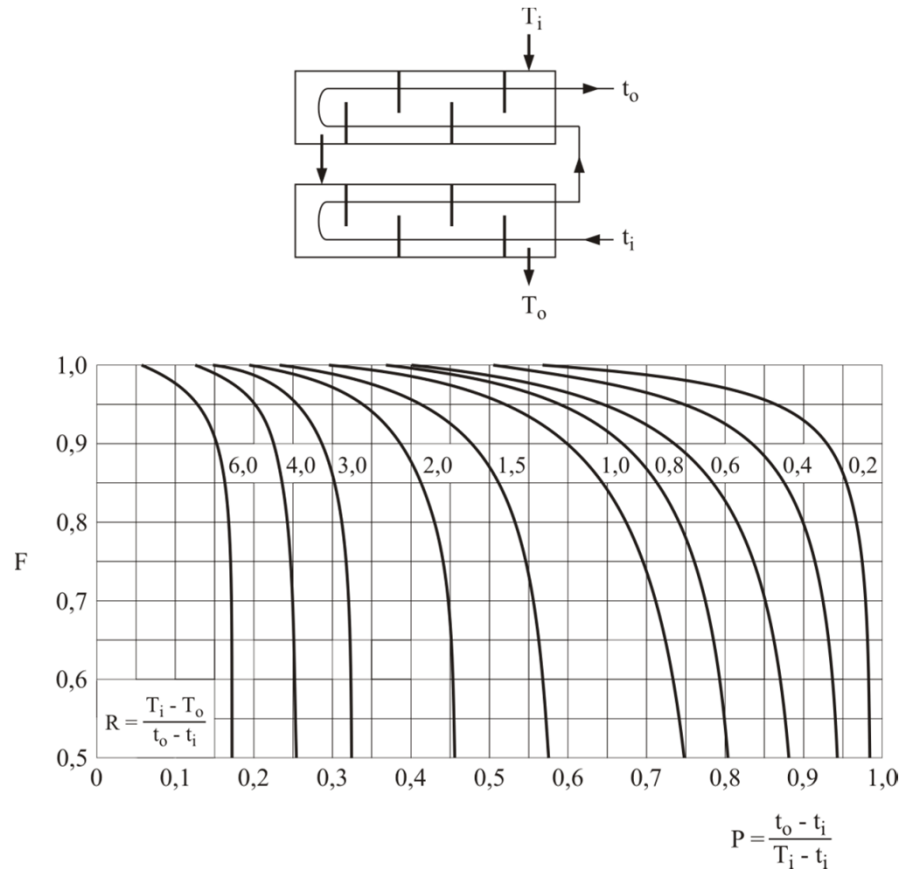
# Διαγράμματα συντελεστή διόρθωσης (1/4)



**Εικόνα 14:** Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη δέσμης σωλήνων – κελύφους μιας εξωτερικής και πολλαπλάσιες των 2 εσωτερικών διαδρομών



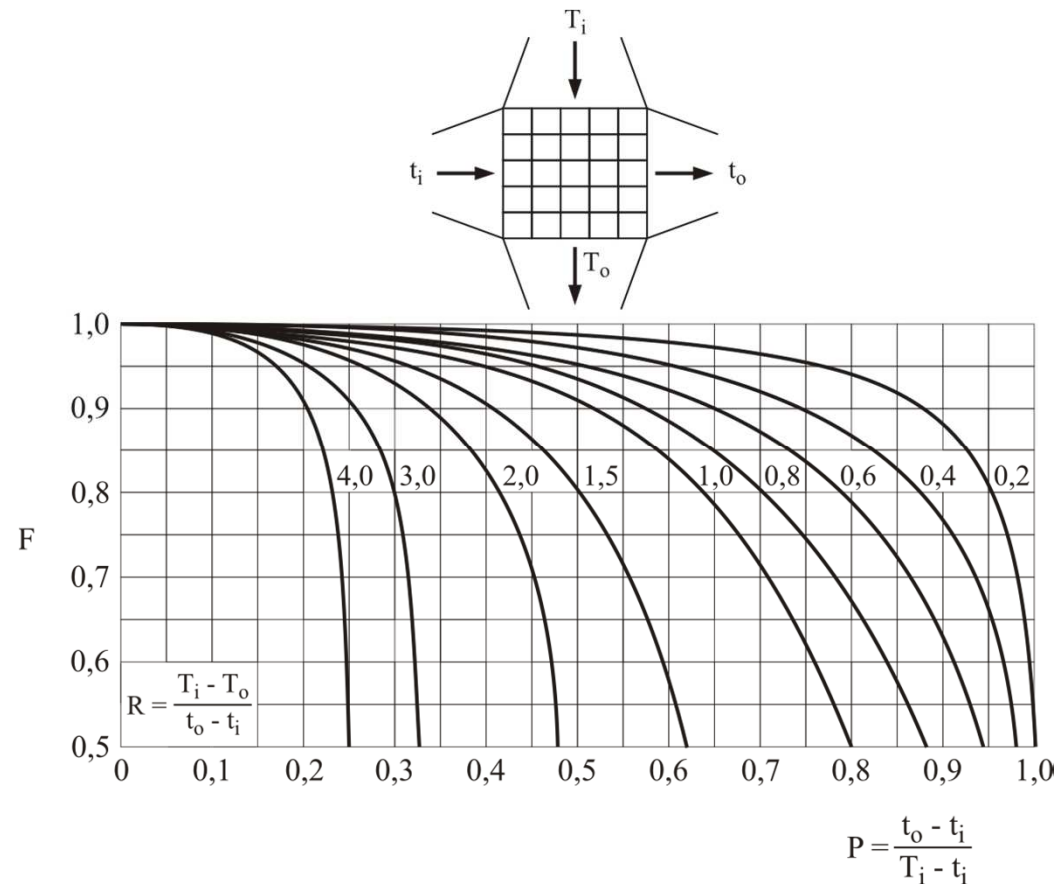
# Διαγράμματα συντελεστή διόρθωσης (2/4)



**Εικόνα 15:** Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη δέσμης σωλήνων –  
κελύφους δύο εξωτερικών και πολλαπλάσιες των 4 εσωτερικών διαδρομών



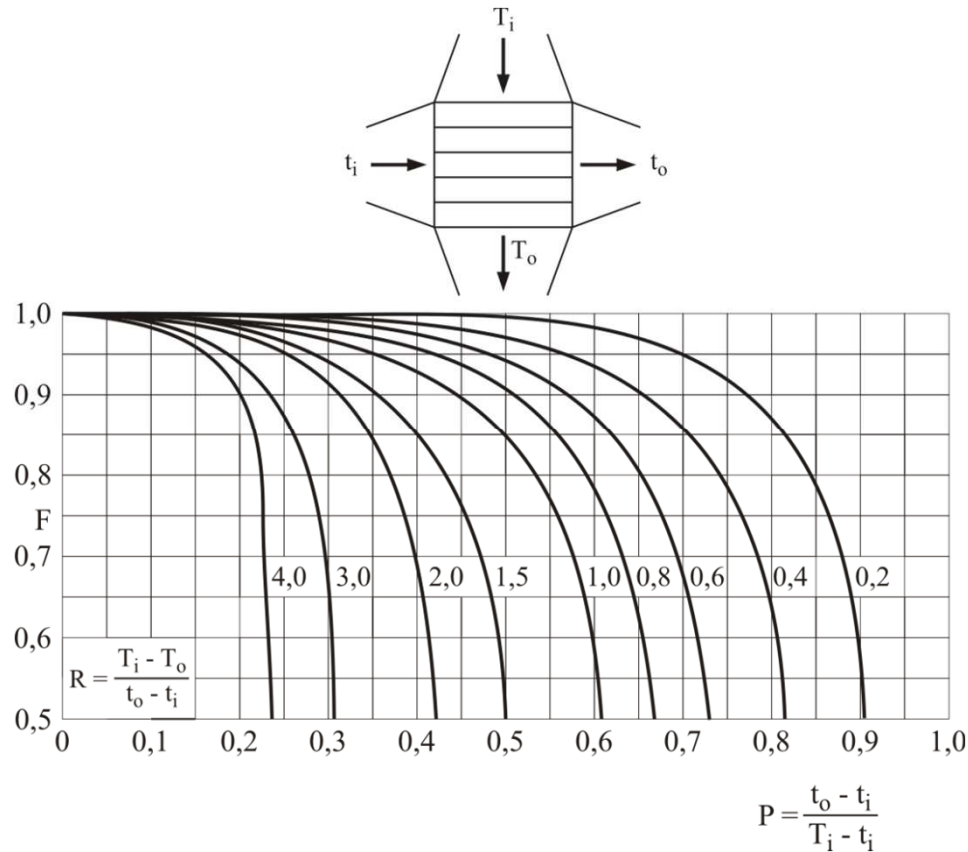
# Διαγράμματα συντελεστή διόρθωσης (3/4)



**Εικόνα 16:** Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη σταυρωτής ροής με αμφότερες τις ροές μη μιγνυόμενες



# Διαγράμματα συντελεστή διόρθωσης (4/4)



**Εικόνα 17:** Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη σταυρωτής ροής με τη μία ροή μιγνυόμενη και την άλλη μη μιγνυόμενη



# Μέθοδος των μονάδων μεταφοράς (NTU) (1/2)

---

- Μέγιστη πιθανή θερμορροή:  
σε εναλλάκτη αντιρροής άπειρου μήκους.
- Μέγιστη πιθανή θερμοκρασιακή διαφορά:

$$T_{1,i} - T_{2,i}$$



# Μέθοδος των μονάδων μεταφοράς (NTU) (2/2)

---

- Μέγιστη πιθανή θερμορροή:

$$\dot{Q}_{\max} = \dot{w}_{\min} \left( T_{1,i} - T_{2,i} \right), \quad \dot{w} = \dot{m} c_p$$

- Η θερμοχωρητική παροχή  $w$  και οι θερμοκρασίες εισόδου καθορίζουν την μέγιστη θερμορροή.



# Αποτελεσματικότητα (βαθμός απόδοσης) (1/3)

---

$$\eta \equiv \varepsilon \equiv \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}}$$

- Εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη διάταξη της ροής.





# Αποτελεσματικότητα (βαθμός απόδοσης) (2/3)

---

$$\eta \equiv \varepsilon = \frac{\dot{w}_1 (T_{1,i} - T_{1,0})}{\dot{w}_{\min} (T_{1,i} - T_{2,i})} \quad \text{ή}$$

$$\eta \equiv \varepsilon = \frac{\dot{w}_2 (T_{2,0} - T_{2,i})}{\dot{w}_{\min} (T_{1,i} - T_{2,i})}$$



# Αποτελεσματικότητα (βαθμός απόδοσης) (3/3)

---

- Αν η αποτελεσματικότητα  $\varepsilon$  ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ) και οι θερμοκρασίες εισόδου των ρευστών είναι γνωστές, η πραγματική θερμοροή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{W}_{\min} (T_{1,i} - T_{2,i})$$

- Η αποτελεσματικότητα είναι συνάρτηση:

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}}\right)$$



# Αριθμός μονάδων μεταφοράς (AMM ή NTU)

---

$$\text{NTU}(= \text{AMM}) = \frac{kA}{\dot{W}_{\min}}$$

- $kA$ : μέτρο της ικανότητας του εναλλάκτη να μεταβιβάζει θερμότητα από το ένα ρευστό στο άλλο
- $\dot{W}_{\min}$ : ικανότητα ρευστού με την μικρότερη θερμοχωρητική παροχή να μεταφέρει θερμότητα
- $\text{NTU} \sim A$
- $\text{NTU}$ : Έκφραση της ικανότητας μεταφοράς του εναλλάκτη



# ΑΜΜ: εναλλάκτης ομορροής (1/5)

---

- Αν  $\dot{W}_{\min} = \dot{W}_1$  τότε:

$$\varepsilon \equiv \eta = \frac{T_{1,i} - T_{1,0}}{T_{1,i} - T_{2,i}} \quad (1)$$

- Είναι:

$$\frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}} = \frac{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}} = \frac{T_{2,0} - T_{2,i}}{T_{1,i} - T_{1,0}} \quad (2)$$



# ΑΜΜ: εναλλάκτης ομορροής (2/5)

- Ομορροή:

$$\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \ln \frac{T_{1,0} - T_{2,0}}{T_{1,i} - T_{2,i}} = -\frac{kA}{\dot{w}_{\min}} \left( 1 + \frac{\dot{w}_{\min}}{\dot{w}_{\max}} \right) \quad (3)$$

- ή

$$\frac{T_{1,0} - T_{2,0}}{T_{1,i} - T_{2,i}} = \exp \left[ -NTU \left( 1 + \frac{\dot{w}_{\min}}{\dot{w}_{\max}} \right) \right] \quad (4)$$



# ΑΜΜ: εναλλάκτης ομορροής (3/5)

- Είναι γνωστό ότι:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = e^{-B_o h A}, \quad B_o \equiv \frac{1}{\dot{m}_1 c_1} + \frac{1}{\dot{m}_2 c_2} = \frac{1}{\dot{W}_{\min}} + \frac{1}{\dot{W}_{\max}}$$

- Γράφουμε:

$$\frac{T_{1,0} - T_{2,0}}{T_{1,i} - T_{2,i}} = \frac{T_{1,0} - T_{1,i} + T_{1,i} - T_{2,0}}{T_{1,i} - T_{2,i}}$$



# ΑΜΜ: εναλλάκτης ομορροής (4/5)

- Αντικατάσταση  $T_{2,0}$  από (2):

$$\frac{T_{1,0} - T_{2,0}}{T_{1,i} - T_{2,i}} = \frac{(T_{1,0} - T_{1,i}) + (T_{1,i} - T_{2,i}) - \left( \frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}} \right) (T_{1,i} - T_{1,0})}{T_{1,i} - T_{2,i}}$$

- ή από την (1)

$$\frac{T_{1,0} - T_{2,0}}{T_{1,i} - T_{2,i}} = -\varepsilon + 1 - \left( \frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}} \right) \varepsilon \quad (5)$$



# ΑΜΜ: εναλλάκτης ομορροής (5/5)

---

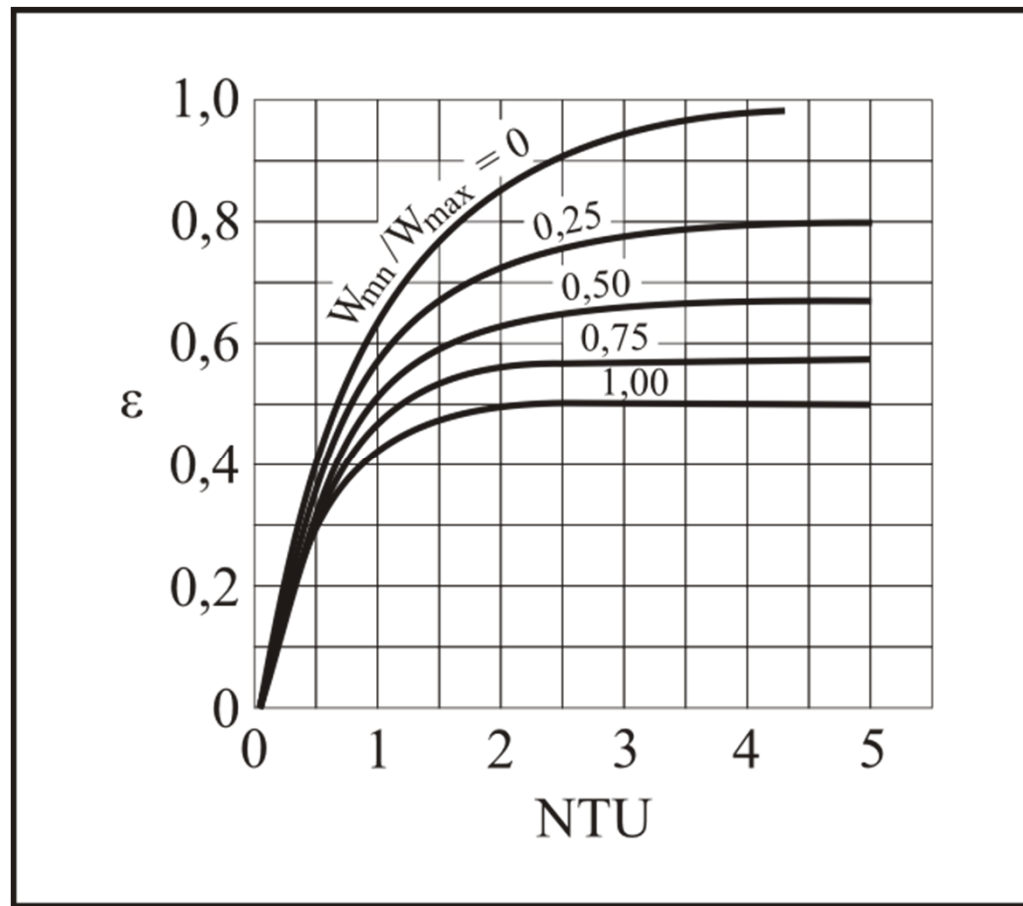
- Από τις (4,5)

$$\varepsilon = \eta = \frac{1 - \exp\left[-NTU \left[1 + \left(\frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}}\right)\right]\right]}{1 + \frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}}}$$





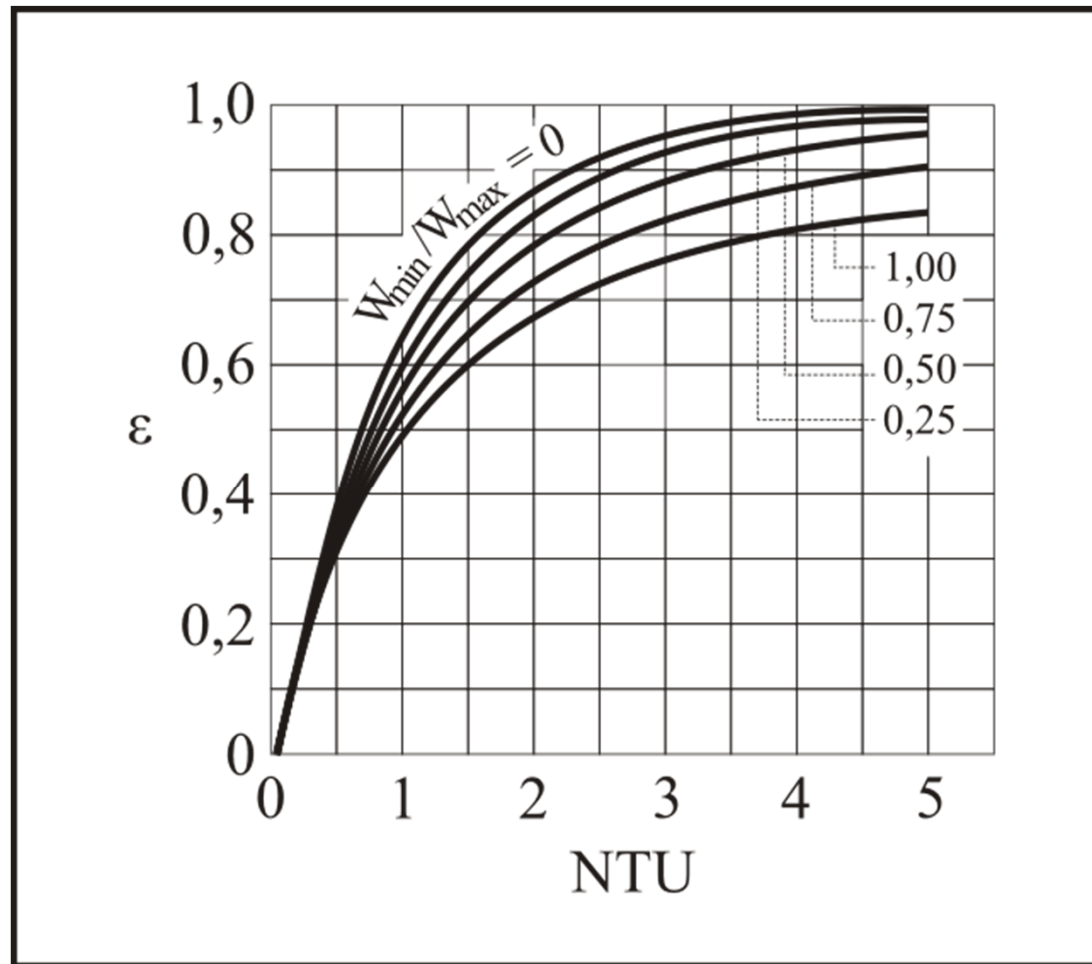
# Διάγραμμα αποτελεσματικότητας εναλλάκτη ομορροής



Εικόνα 18: Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη ομορροής



# Διάγραμμα αποτελεσματικότητας εναλλάκτη αντιρροής



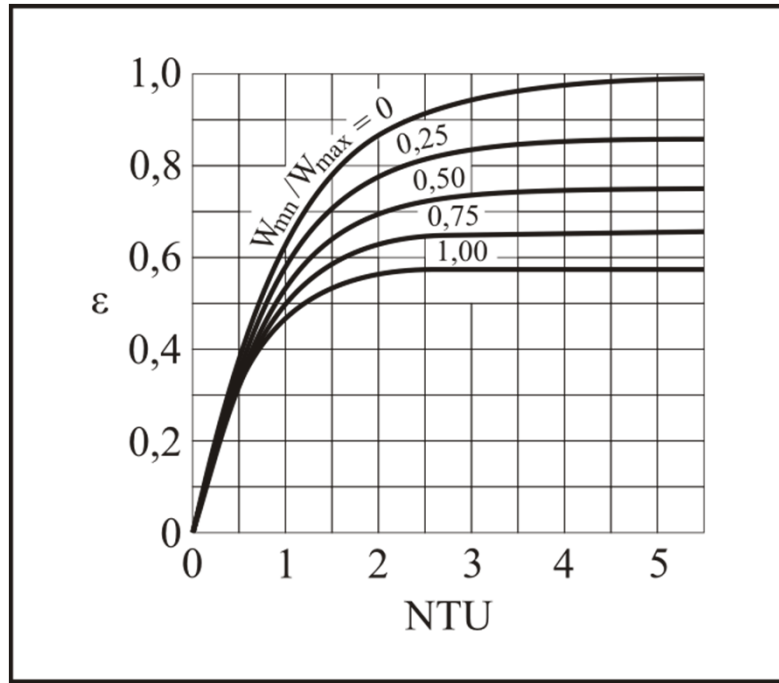
Εικόνα 19: Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη αντιρροής

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ



# Διάγραμμα αποτελεσματικότητας εναλλάκτη δέσμης σωλήνων κελύφους (1/2)

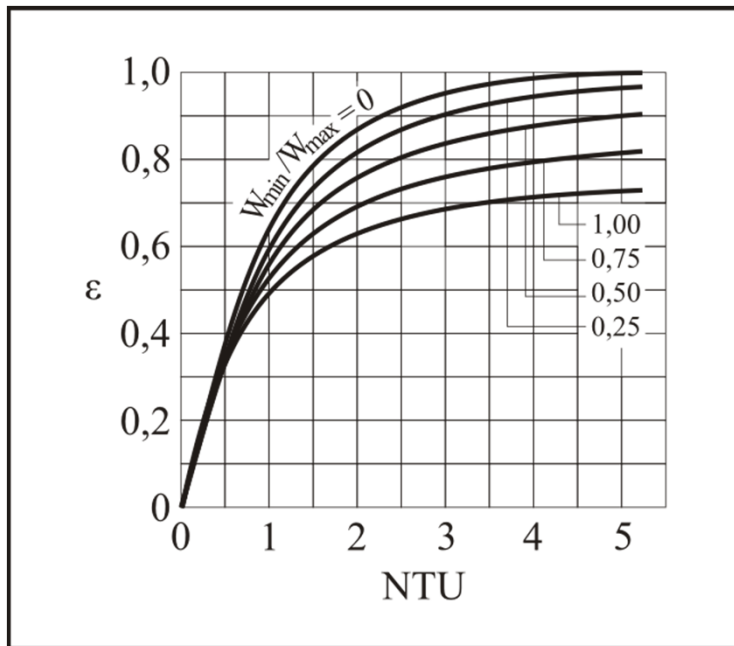


**Εικόνα 20:** Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη δέσμης σωλήνων κελύφους μιας εξωτερικής διαδρομής και πολλαπλάσιες των δύο εσωτερικών διαδρομών

Μιας εξωτερικής  
διαδρομής και  
πολλαπλάσιες των δύο  
(2,4,κλπ) εσωτερικών  
διαδρομών.



# Διάγραμμα αποτελεσματικότητας εναλλάκτη δέσμης σωλήνων κελύφους (2/2)

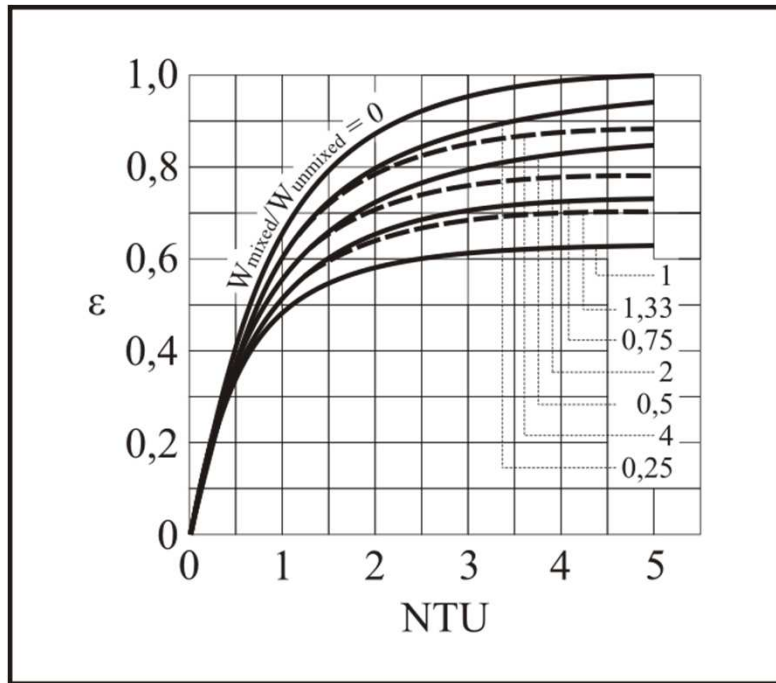


Εικόνα 21: Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη δέσμης σωλήνων κελύφους δύο εξωτερικών διαδρομών και πολλαπλάσιες των τεσσάρων εσωτερικών διαδρομών

**Δύο** εξωτερικών  
διαδρομών και  
πολλαπλάσιες των  
**τεσσάρων**  
(4,8,κλπ) εσωτερικών  
διαδρομών.



# Διάγραμμα αποτελεσματικότητας εναλλάκτη διασταυρουμένων ρευμάτων (1/2)

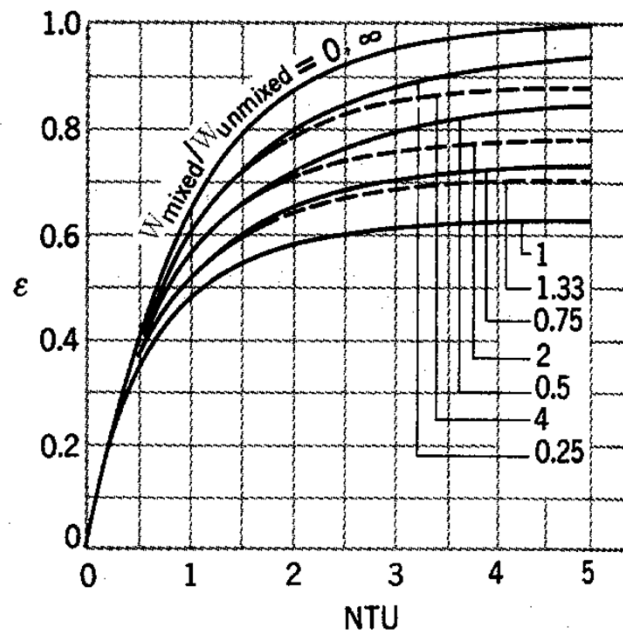


Με αμφότερες τις ροές  
μη μιγνυόμενες.

**Εικόνα 22:** Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη διασταυρουμένων ρευμάτων με αμφότερες τις ροές μη μιγνυόμενες



# Διάγραμμα αποτελεσματικότητας εναλλάκτη διασταυρουμένων ρευμάτων (2/2)

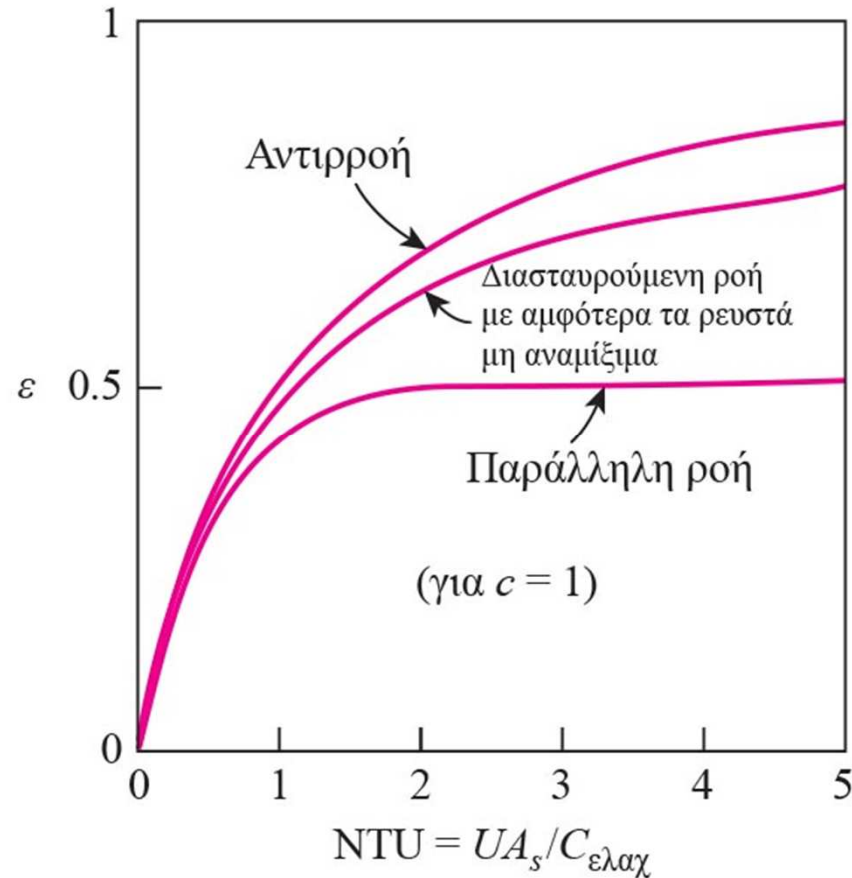


Με τη μία ροή  
μιγνυόμενη.

Εικόνα 23: Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη διασταυρουμένων ρευμάτων με τη μία ροή μιγνυόμενη



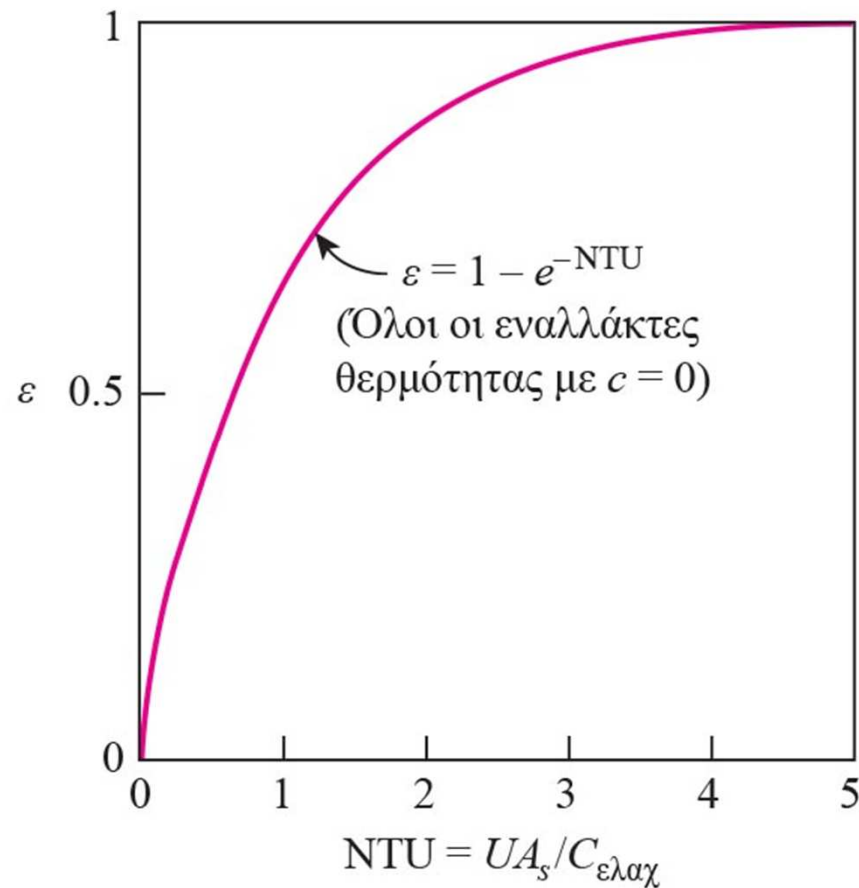
# Παρατηρήσεις στα διαγράμματα (1/6)



**Εικόνα 24:** Για συγκεκριμένες τιμές της NTU και του λόγου  $c$ , ο εναλλάκτης αντιρροής έχει την υψηλότερη αποτελεσματικότητα ενώ ο εναλλάκτης όμορροής τη χαμηλότερη



# Παρατηρήσεις στα διαγράμματα (2/6)



Εικόνα 25: Απλοποίηση της σχέσης της αποτελεσματικότητας για όλους τους εναλλάκτες με  $c=0$





# Παρατηρήσεις στα διαγράμματα (3/6)

---

$$\dot{W}_r = \frac{\dot{W}_{\min}}{\dot{W}_{\max}}$$

- $\dot{W}_r = 0$ : όλοι οι εναλλάκτες το ίδιο  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$$



# Παρατηρήσεις στα διαγράμματα (4/6)

---

- Αν  $NTU \leq 0,25$

τότε όλοι οι εναλλάκτες έχουν το ίδιο  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$ ) ανεξάρτητα από την τιμή του  $\dot{W}_r$ .

- Αν  $\dot{W}_r > 0$  και  $NTU \geq 0,25$

ο εναλλάκτης αντιρροής είναι ο πιο αποτελεσματικός.



# Παρατηρήσεις στα διαγράμματα (5/6)

---

- $\dot{W}_r = 0$ : όλοι οι εναλλάκτες το ίδιο  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$$



# Παρατηρήσεις στα διαγράμματα (6/6)

---

- Για όλους τους εναλλάκτες:
  - μέγιστες τιμές για  $\dot{W}_r = 0$  (λέβητας ή συμπυκνωτής).
  - ελάχιστες τιμές για  $\dot{W}_r = 1$ .



# Μέθοδος LMTD: σε προβλήματα σχεδιασμού

- - π.χ.  $\dot{m}_2, \dot{m}_1, T_{2,i}, T_{1,i}$  : δεδομένα
- Ζητείται ο τύπος εναλλάκτη για επιθυμητή  $T_{2,0}$

$$\left. \begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_2 c_{p,2} (T_{2,0} - T_{2,i}) \\ \dot{Q} &= \dot{m}_1 c_{p,1} (T_{1,i} - T_{1,0}) \end{aligned} \right\} \rightarrow \dot{Q} \text{ και } T_{1,0}$$

- Στη συνέχεια υπολογίζεται η  $\Delta T_{lm}$ , οπότε από τη σχέση

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

υπολογίζεται το μέγεθος του εναλλάκτη.



# Μέθοδος NTU: σε προβλήματα λειτουργίας

- Εφαρμογή της LMTD σε προβλήματα λειτουργίας οδηγεί σε επαναληπτική διαδικασία.
- Εφαρμογή NTU: ο τύπος, το μέγεθος του εναλλάκτη και οι παροχές μάζας των ρευστών καθορίζουν τα NTU και  $\dot{W}_r$ .

Στη συνέχεια υπολογίζεται η  $\epsilon$  και από τη σχέση  $\dot{Q} = \epsilon \dot{Q}_{\max}$  η θερμορροή.



# Επιλογή Ε.Θ.

---

- Ο συντελεστής  $k$  θεωρείται σταθερός. Η προεκτίμηση του  $k$  γίνεται με σφάλμα μέχρι και 30%. Άρα η σχεδίαση προς τα πάνω όρια.
- Αύξηση της θερμορροής  $\dot{Q}$  συνεπάγεται αύξηση της ισχύος των αντλιών και άρα αύξηση του κόστους.
- Ποιο υγρό θα περάσει από τους σωλήνες;  
Το παχύρρευστο στο κέλυφος.



# Παράγοντες επιλογής (1/2)

---

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p (T_i - T_o)$$

- Επιθυμητό  $\dot{Q}$  .
- Κόστος (προτίμηση σε τυποποιημένους).
- Ισχύς αντλιών: Ελαχιστοποίηση της πτώσης πίεση  $\Delta P$  οδηγεί σε ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας σε μεγιστοποίηση όμως του αρχικού κόστους (αύξηση του μεγέθους του εναλλάκτη).





# Παράγοντες επιλογής (2/2)

---

- Μέγεθος – Βάρος (Αυτοκινητοβιομηχανία – αεροναυπηγική).
- Τύπος (π.χ. αυλών - κελύφους για υγρού-υγρού).
- Υλικά :όταν  $\Delta P < 15 \text{ atm}$  ή  $T < 150 \text{ }^\circ\text{C}$  αμελούνται οι θερμικές και διατμητικές τάσεις, όχι όμως όταν  $\Delta P > 70 \text{ atm}$  ή  $T > 550 \text{ }^\circ\text{C}$ 
  - Αν  $\Delta T > 50 \text{ }^\circ\text{C}$  έχουμε διαφορικές θερμικές διαστολές.
- Άλλοι παράγοντες: Διαρροές (τοξικά ή ακριβά ρευστά).



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/7)

---

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

- Εικόνα 1:

Πύργοι ψύξης σε εργοστάσιο ΔΕΗ: <https://www.dei.gr/el/paragwgi/fwtografiko-uliko>

- Εικόνα 2:

Πύργος ψύξης φυσικού ελκυσμού: Σελίδα 121, Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων ΑΠΘ

- Εικόνα 3:

Εναλλάκτης θερμότητας ρευστού-ρευστού τύπου πλάκας και πλαισίου: Σελίδα 707, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 4:

Προθερμαντής αέρα τύπου Ljungstrom: [https://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_preheater](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_preheater)



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/7)

---

- Εικόνα 5:

Οι διαφορετικοί τύποι ροής και τα σχετιζόμενα με αυτούς προφίλ θερμοκρασιών σε έναν εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα: Σελίδα 704, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 6:

Διαφορετικές διαμορφώσεις ροής σε εναλλάκτες θερμότητας σταυρωτής ροής: Σελίδα 705, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 7:

Σχηματικό διάγραμμα ενός εναλλάκτη θερμότητας κελύφους αυλού (μιας διαδρομής διαφράγματος και μιας διαδρομής σωλήνα): Σελίδα 706, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 8:

Διατάξεις ροής πολλαπλών διαδρομών σε εναλλάκτες θερμότητας κελύφους - αυλού: Σελίδα 706, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/7)

---

- Εικόνα 9:

Δίκτυο θερμικής αντίστασης που σχετίζεται με τη μεταφορά θερμότητας σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα: Σελίδα 708, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 10:

Οι δύο επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας που σχετίζονται με τον εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα: Σελίδα 708, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 11:

Δύο ρεύματα ρευστού που έχουν τους ίδιους ρυθμούς θερμοχωρητικότητας υφίστανται την ίδια θερμοκρασιακή μεταβολή σε έναν καλά μονωμένο εναλλάκτη θερμότητας: Σελίδα 716, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 12:

Μεταβολή των θερμοκρασιών του ρευστού σε έναν εναλλάκτη θερμότητας όταν το ένα από τα δύο ρευστά συμπυκνώνεται ή βράζει: Σελίδα 717, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (4/7)

---

- Εικόνα 13:

Θερμοκρασιακές κατανομές σε εναλλάκτη ομορροής: Σελίδα 708, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα

- Εικόνα 14:

Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη δέσμης σωλήνων –κελύφους μιας εξωτερικής και πολλαπλάσιες των 2 εσωτερικών διαδρομών: Σελίδα 131, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 15:

Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη δέσμης σωλήνων –κελύφους δύο εξωτερικών και πολλαπλάσιες των 4 εσωτερικών διαδρομών : Σελίδα 131, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 16:

Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη σταυρωτής ροής με αμφότερες τις ροές μη μιγνυόμενες: Σελίδα 132, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (5/7)

---

- Εικόνα 17:

Συντελεστής διόρθωσης για εναλλάκτη σταυρωτής ροής με τη μία ροή μιγνυόμενη και την άλλη μη μιγνυόμενη: Σελίδα 132, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 18:

Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη ομορροής: Σελίδα 140, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 19:

Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη αντιρροής: Σελίδα 140, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 20:

Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη δέσμης σωλήνων κελύφου μιας εξωτερικής διαδρομής και πολλαπλάσιες των δύο εσωτερικών διαδρομών: Σελίδα 140, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (6/7)

---

- Εικόνα 21:

Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη δέσμης σωλήνων κελύφου δύο εξωτερικών διαδρομών και πολλαπλάσιες των τεσσάρων εσωτερικών διαδρομών: Σελίδα 140, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 22:

Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη διασταυρουμένων ρευμάτων με αμφότερες τις ροές μη μιγνυόμενες: Σελίδα 141, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 23:

Αποτελεσματικότητα εναλλάκτη διασταυρουμένων ρευμάτων με τη μία ροή μιγνυόμενη: Σελίδα 141, Εισαγωγή στη Μετάδοση Θερμότητας, Βασίλης Χατζηαθανασίου, εκδόσεις Σοφία

- Εικόνα 24:

Για συγκεκριμένες τιμές της NTU και του λόγου  $c$ , ο εναλλάκτης αντιρροής έχει την υψηλότερη αποτελεσματικότητα ενώ ο εναλλάκτης όμορροής τη χαμηλότερη: Σελίδα 734, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (7/7)

---

- Εικόνα 25:

Απλοποίηση της σχέσης της αποτελεσματικότητας για όλους τους εναλλάκτες με  $c=0$ : Σελίδα 734, Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar, εκδόσεις Τζιόλα





# Σημείωμα Αναφοράς

---

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζηαθανασίου Βασίλειος, Καδή Στυλιανή. «ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ. Εναλλάκτες θερμότητας». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://eclass.auth.gr/courses/OCRS421/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





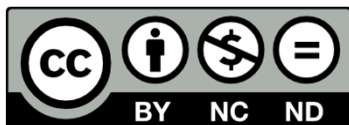
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ  
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2014-2015





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

---

# Σημειώματα

# Διατήρηση Σημειωμάτων

---

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

