



**ΙΔΕΠ**

Ινστιτούτο  
Χημικών  
Διεργασιών και  
Ενεργειακών  
Πόρων

Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

# Σχεδιασμός Χημικών Εγκαταστάσεων I

## Εναλλάκτες

---

Καλογιάννης Κων/νος, [kkalogia@cperi.certh.gr](mailto:kkalogia@cperi.certh.gr)

Θερινό εξάμηνο 2019-2020

# Κύριοι στόχοι μαθήματος

---

Στόχος του μαθήματος είναι η συστηματική ανασκόπηση σε θέματα διαμόρφωσης και επίλυσης προβλημάτων με εναλλάκτες θερμότητας.

Συνοπτικά επιμέρους στόχοι είναι:

- Η κατανόηση των βασικών στοιχείων και τύπων των εναλλακτών θερμότητας.
- Σύνδεση των βασικών αρχών της χημικής μηχανικής με την επίλυση τους.
- Κατανόηση εννοιών όπως ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, διεπιφάνεια εναλλαγής θερμότητας.
- Δυνατότητα κατάστρωσης των βασικών εξισώσεων που διέπουν την επίλυση τους.

# Περιεχόμενα μαθήματος

---

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

# Κύριοι στόχοι μαθήματος

---

Εναλλάκτης θερμότητας είναι μία συσκευή στην οποία μεταφέρεται θερμότητα από ένα ρευστό σε ένα άλλο, το οποίο διαχωρίζεται από το πρώτο με στερεό τοίχωμα.

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.

Αποτελεί βασικό στοιχείο εξοπλισμού πληθώρας χημικών εγκαταστάσεων.

# Τύποι εναλλακτών

---

Κατηγορίες ανάλογα:

- με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας
- τον τύπο της ροής
- την κατασκευαστική τους διάταξη

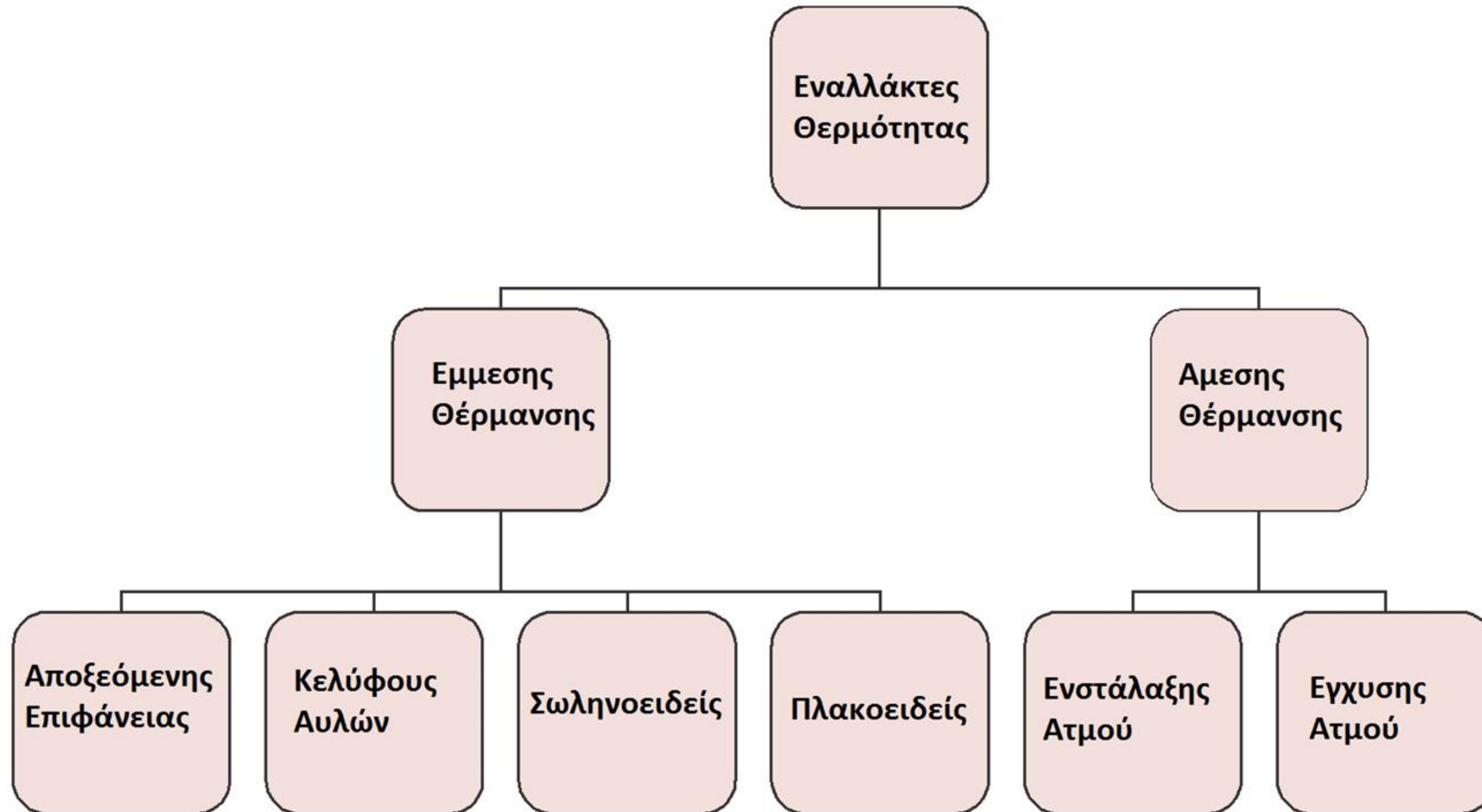
# Τύποι εναλλακτών

---

Κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας:

- άμεσης
- έμμεσης
- ημιάμεσης μετάδοσης

# Τύποι εναλλακτών



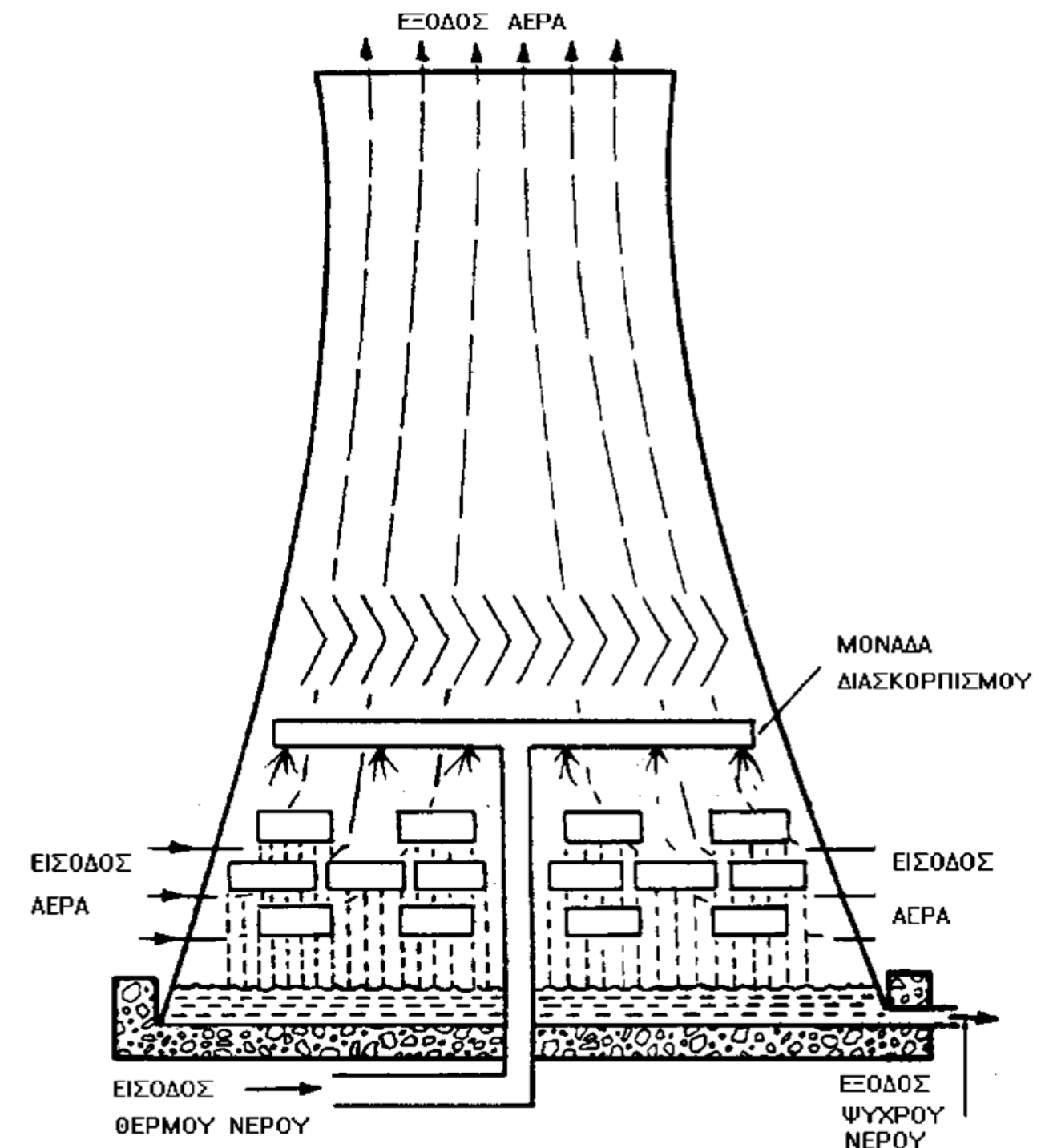


# Τύποι εναλλακτών

Κατηγορίες άμεσης μεταφοράς θερμότητας:

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.



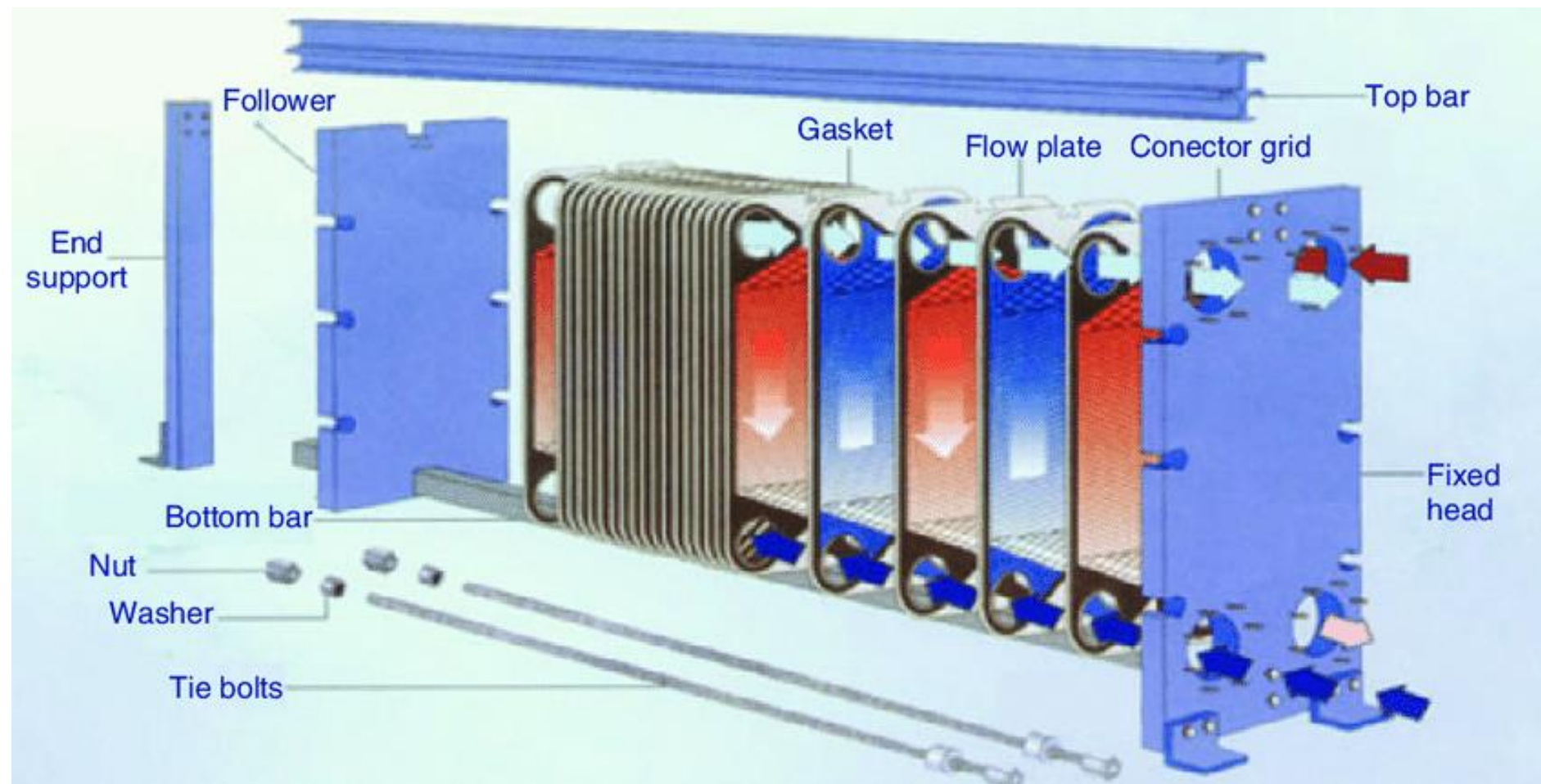


# Τύποι εναλλακτών

Κατηγορίες έμμεσης μεταφοράς θερμότητας:

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.



# Τύποι εναλλακτών

---

Κατηγορίες έμμεσης μεταφοράς θερμότητας:

Οι εναλλάκτες έμμεσης θέρμανσης ή μη επαφής μπορεί να είναι συσκευές **συνεχούς** ροής ή και **ασυνεχούς** ροής.

Στους ασυνεχούς ροής συμπεριλαμβάνονται στατικά δοχεία στα οποία είτε ρέει θερμό ρευστό (ατμός ή θερμό νερό) ή ψυχρό ρευστό (παγωμένο νερό ή αιθυλενογλυκόλη) σε σωληνοειδείς σερπαντίνες βυθισμένες εντός του ρευστού στο δοχείο ή σε εξωτερικό μανδύα που περικλείει το δοχείο.

# Τύποι εναλλακτών

---

Κατηγορίες ημιάμεσης μεταφοράς θερμότητας:

Διατάξεις στις οποίες η ίδια επιφάνεια θέρμανσης εκτίθεται διαδοχικά στο θερμό και το ψυχρό ρευστό.

- Παράδειγμα: προθερμαντές αέρα.

# Τύποι εναλλακτών

---

Κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο της ροής και την κατασκευαστική τους διάταξη.

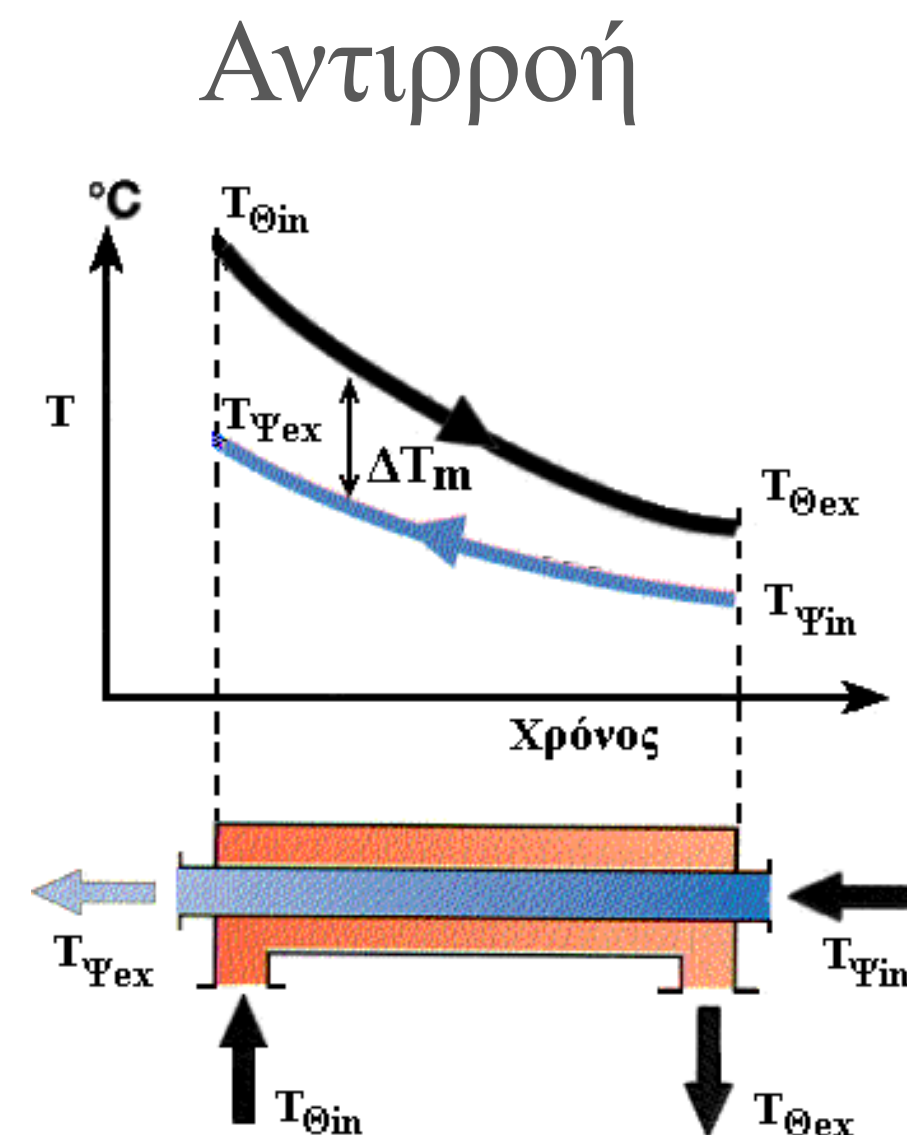
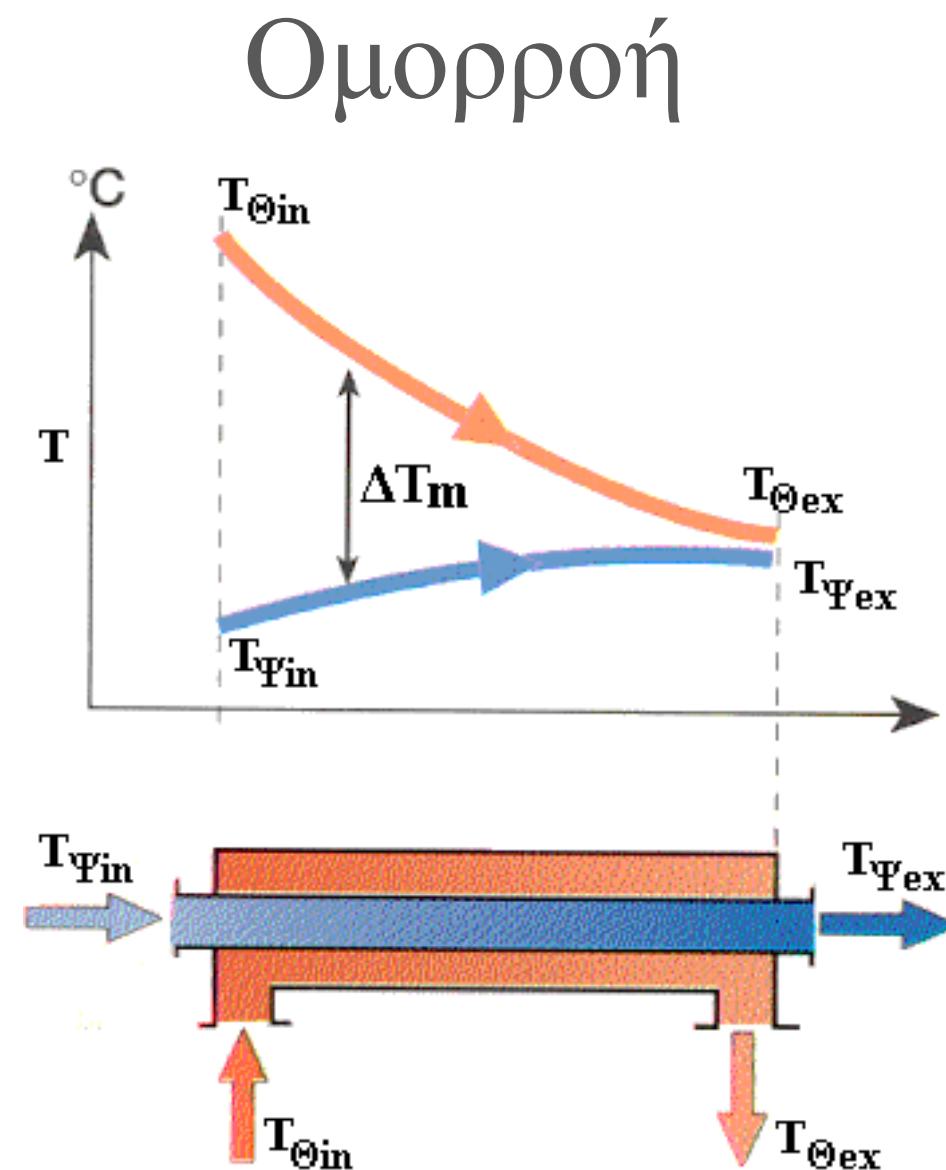
- ομορροής (cocurrent flow).
- αντιρροής (countercurrent flow).
- πτερυγιοφόρων ή μη σωλήνων (finned tube), (ροές μιγνυόμενες ή μη μιγνυόμενες).
- δέσμης σωλήνων κελύφους (tube and shell).



# Τύποι εναλλακτών

Διάκριση εναλλακτών σύμφωνα με την κατεύθυνση ροής:

- Συνθήκες ομορροής: θερμό και ψυχρό ρευστό ρέουν στην ίδια κατεύθυνση.
- Συνθήκες αντιρροής: τα δύο ρευστά ρέουν σε αντίθετη κατεύθυνση.





# Τύποι εναλλακτών

---

Υπάρχουν διάφοροι τύποι εναλλακτών όπως:

- σωληνοειδείς,
- πλακοειδείς,
- αποξεόμενης επιφάνειας,
- έκχυσης ατμού και
- ενστάλαξης σε ατμό.

Οι πρώτοι τρεις τύποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση ή ψύξη τροφίμων ενώ οι δύο τελευταίοι μόνο για σκοπούς θέρμανσης.

# Τύποι εναλλακτών

---

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).

# Ταξινόμηση εναλλακτών

---

Σε γενικές γραμμές, οι βιομηχανικοί εναλλάκτες θερμότητας έχουν ταξινομηθεί σύμφωνα με:

- την κατασκευή
- τις διαδικασίες μεταφοράς
- το βαθμό πυκνότητας της επιφάνειας
- ρυθμίσεις ροής
- ρυθμίσεις διαδρομών
- φάση των ρευστών κατά τη διαδικασία
- μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας

# Ταξινόμηση εναλλακτών

➤ Ο σχεδιασμός κάθε εναλλάκτη:

βασίζεται σε εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή τόσο στο προϊόν όσο και στο μέσο θέρμανσης ή ψύξης.

➤ Συχνά ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο προϊόν υποδηλώνει ότι: η αντίσταση του προϊόντος στην μεταφορά θερμότητας είναι  $\gg$  από αυτήν του μέσου.

➤ Αποτέλεσμα: ο συντελεστής μεταφοράς στο μέσο θέρμανσης ή ψύξης να επιδρά στον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε περιορισμένο βαθμό.

# Ταξινόμηση εναλλακτών

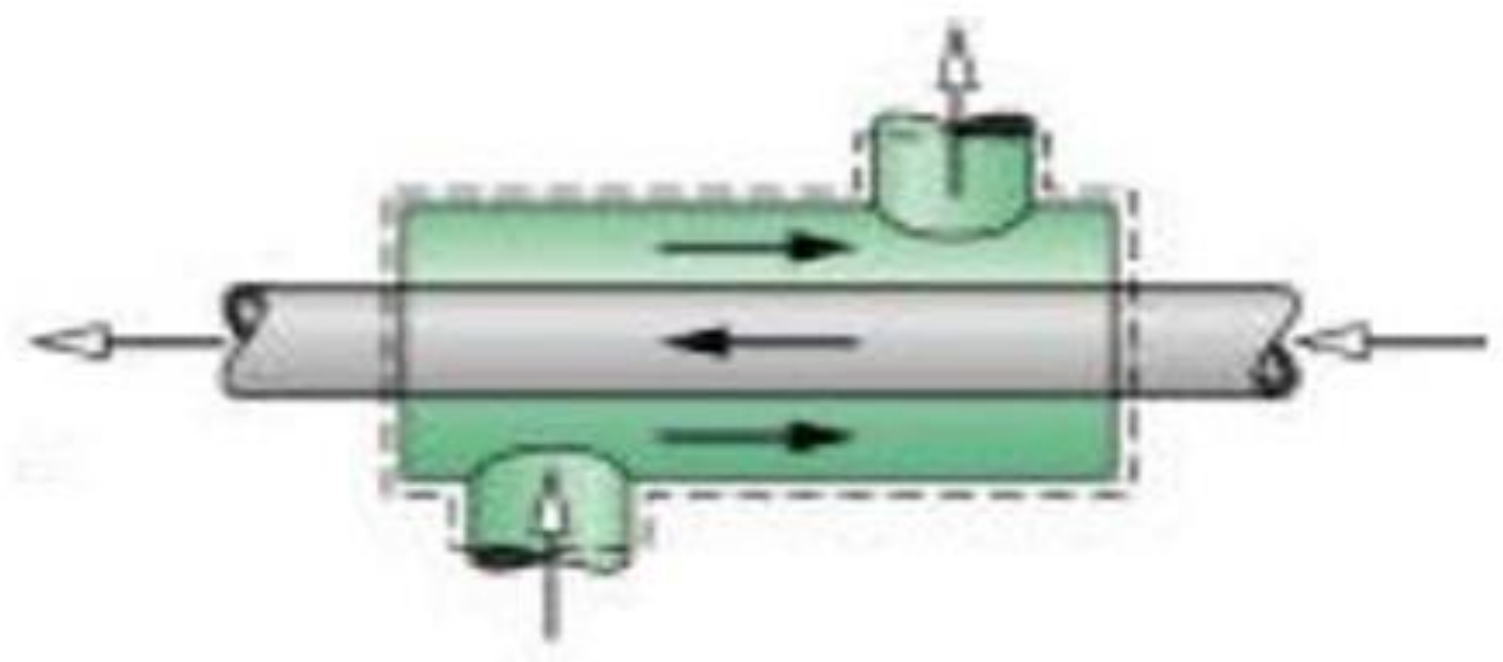
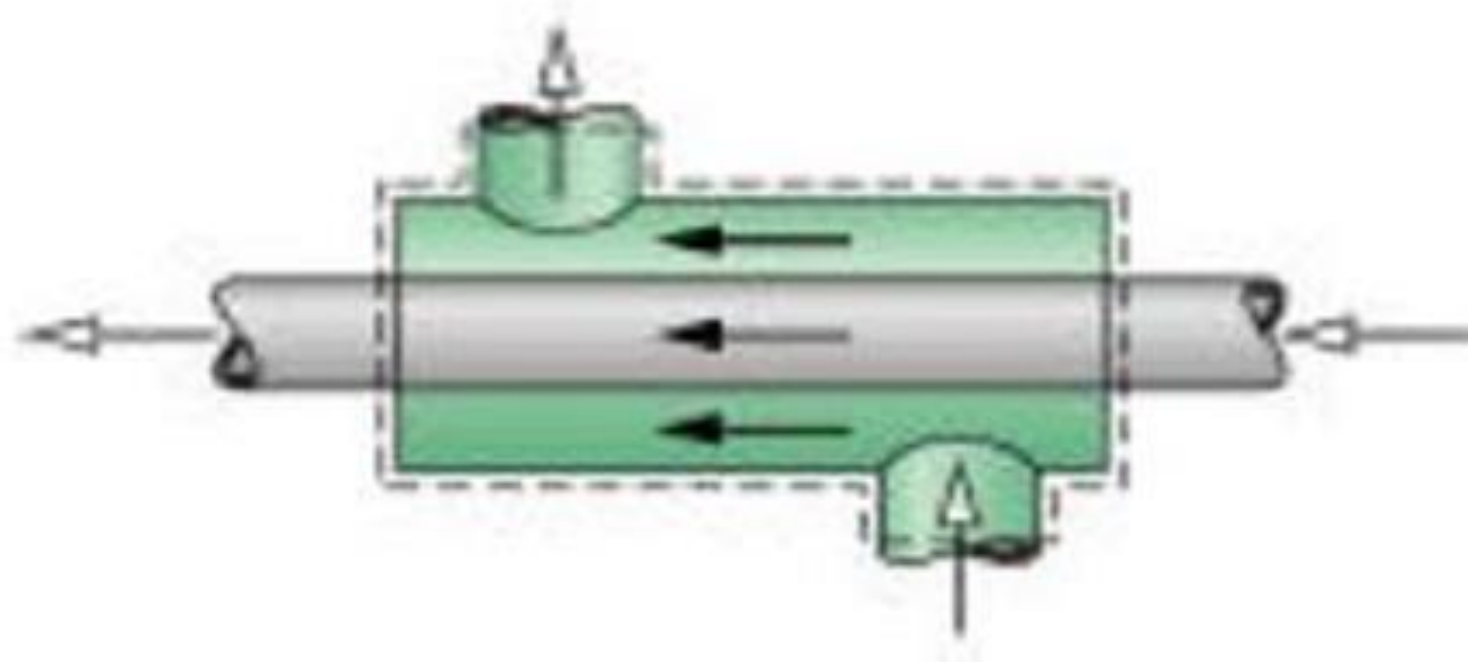
Ταξινόμηση σύμφωνα με την κατασκευή:

- Σωληνωτός εναλλάκτης θερμότητας – διπλού σωλήνα, αυλών – κελύφους (περίπου στο 90% των βιομηχανικών εφαρμογών) και σπειροειδούς (coil heat exchanger) σωλήνα (π.χ. σπειροειδής σερπαντίνα εντός δοχείου).
- Ο πιο κοινός είναι ο εναλλάκτης ομόκεντρου αγωγού.
- Το προϊόν ρέει στον εσωτερικό σωλήνα, ενώ το μέσο θέρμανσης ή ψύξης (συνήθως νερό) στον χώρο που περιβάλλει τον κεντρικό αγωγό δηλαδή στον μανδύα, είτε κατά την ίδια διεύθυνση (ομορροή) είτε κατά την αντίθετη (αντιρροή).



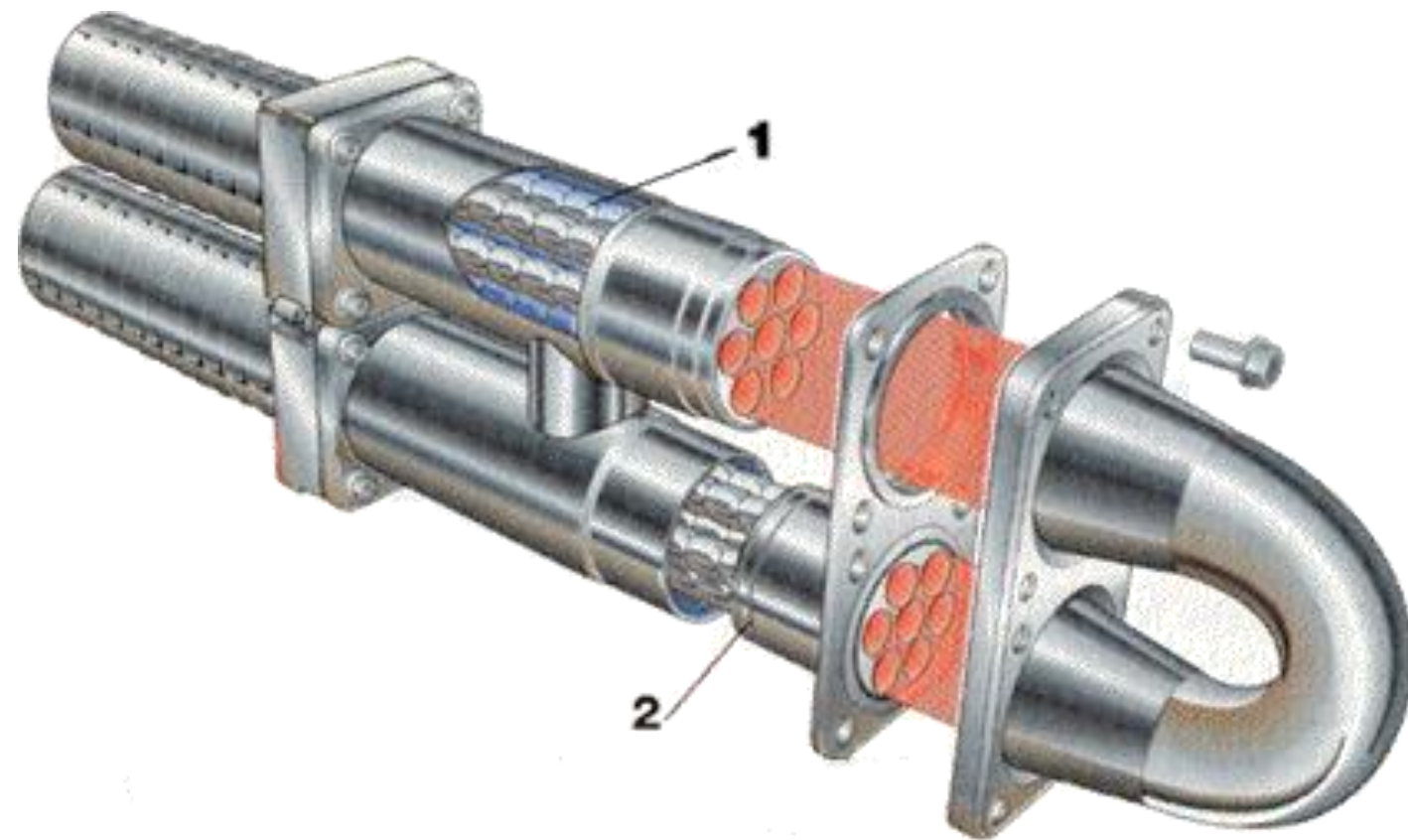
# Ταξινόμηση εναλλακτών

Ο πιο σημαντικός παράγοντας για την μεταφορά θερμότητας σε αυτόν τον τύπο εναλλάκτη είναι η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας



# Ταξινόμηση εναλλακτών

Οι σωληνοειδείς εναλλάκτες θερμότητας μπορεί επίσης να είναι και τύπου πολλαπλών σωλήνων



Στην περίπτωση αυτή το προϊόν ρέει σε διάφορους σωλήνες οι οποίοι είναι τοποθετημένοι μέσα σε ένα κέλυφος όπου ρέει το θερμαντικό ή ψυκτικό μέσο. Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις που ισχύουν για εναλλάκτη διπλού σωλήνα.

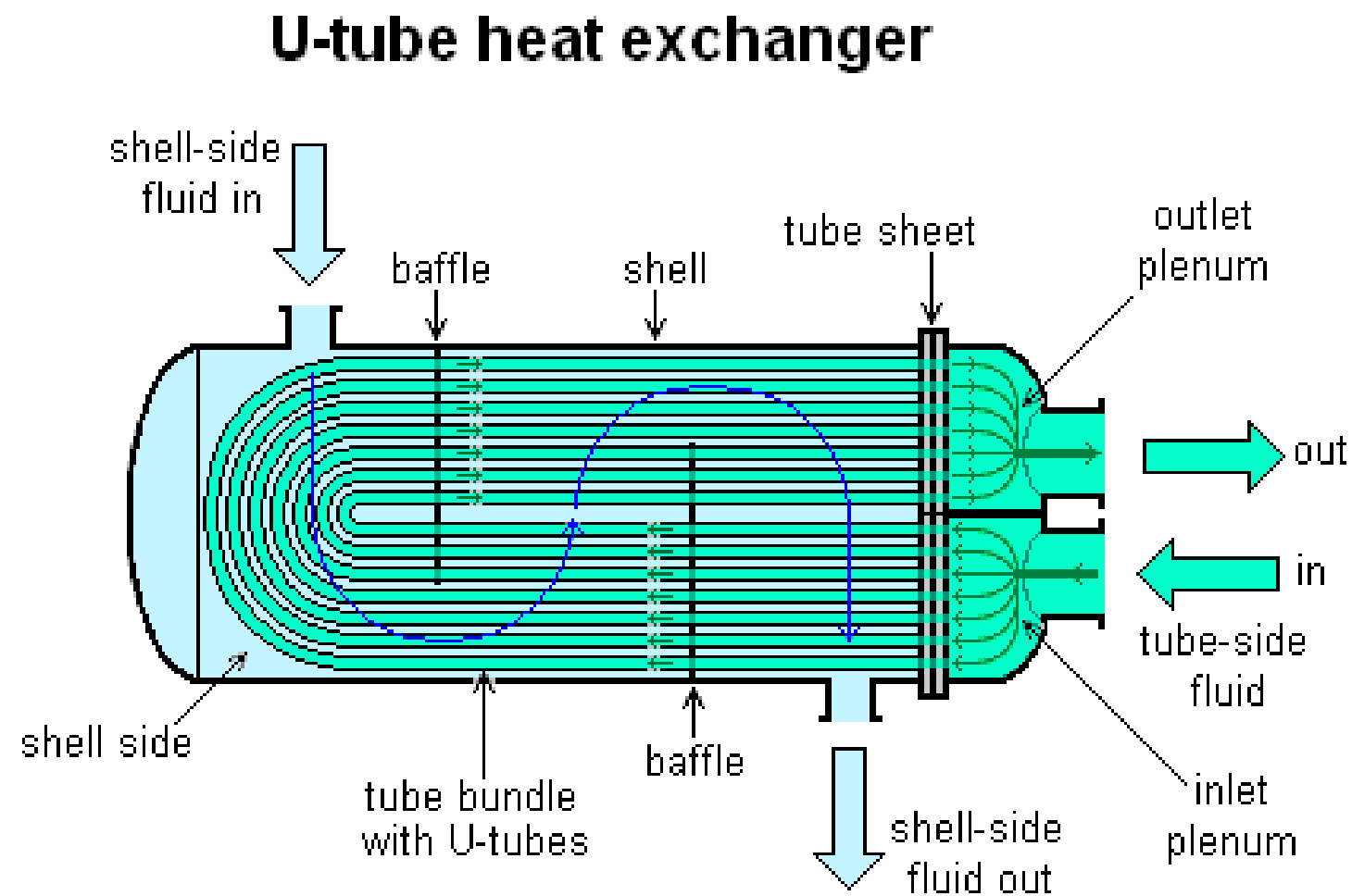
Κατάληξη ενός σωληνωτού εναλλάκτη θερμότητας πολλαπλών σωλήνων

1. Αυλοί προϊόντος περιβαλλόμενοι από ψυχρό μέσο.
2. Διπλή ασφάλεια τύπου δακτυλίου “Ο”.



# Ταξινόμηση εναλλακτών

## Σωληνοειδής εναλλάκτης θερμότητας τύπου κελύφους-αυλών



1. Αυλοί προϊόντος περιέχουν το θερμό μέσο.
2. Ο εξωτερικός μανδύας, κέλυφος, φέρει το ψυχρό μέσο.



# Ταξινόμηση εναλλακτών

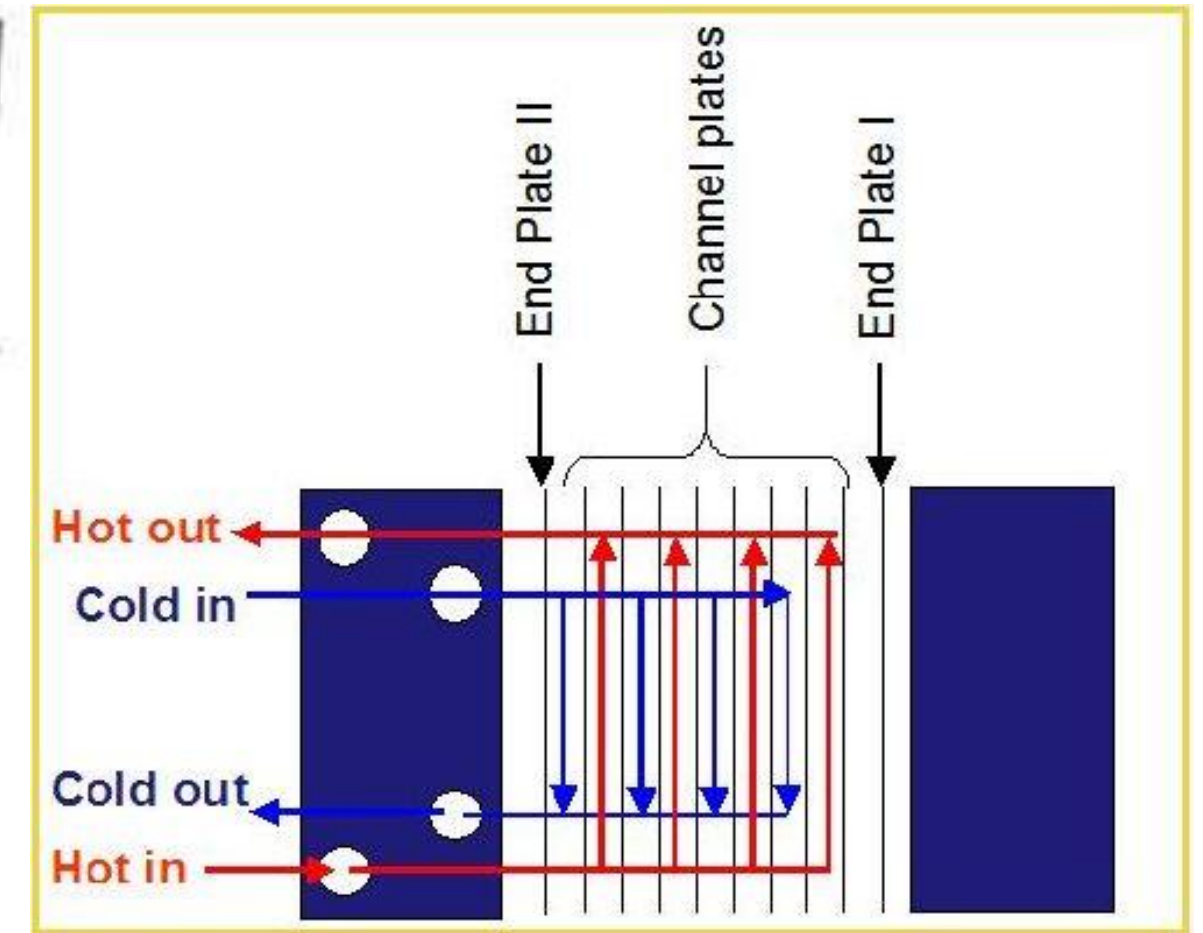
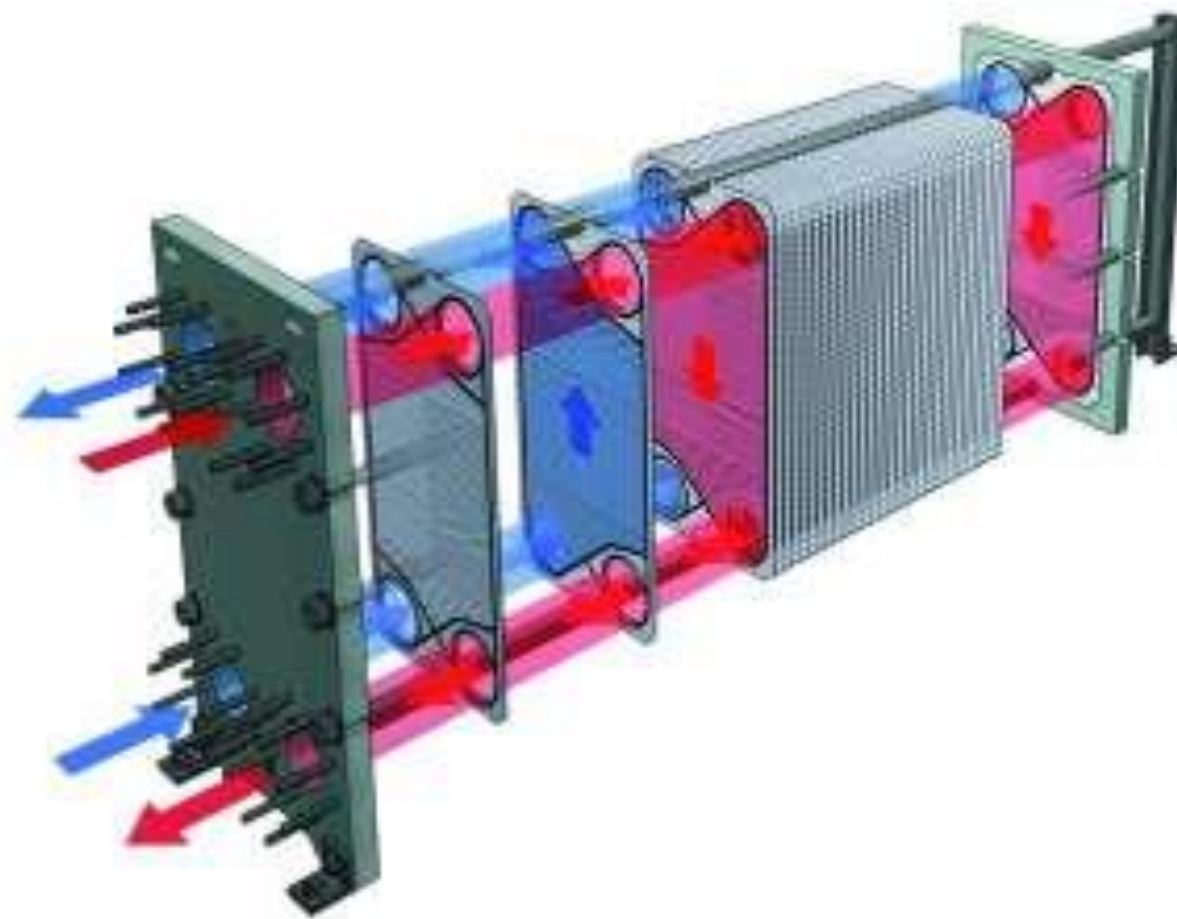
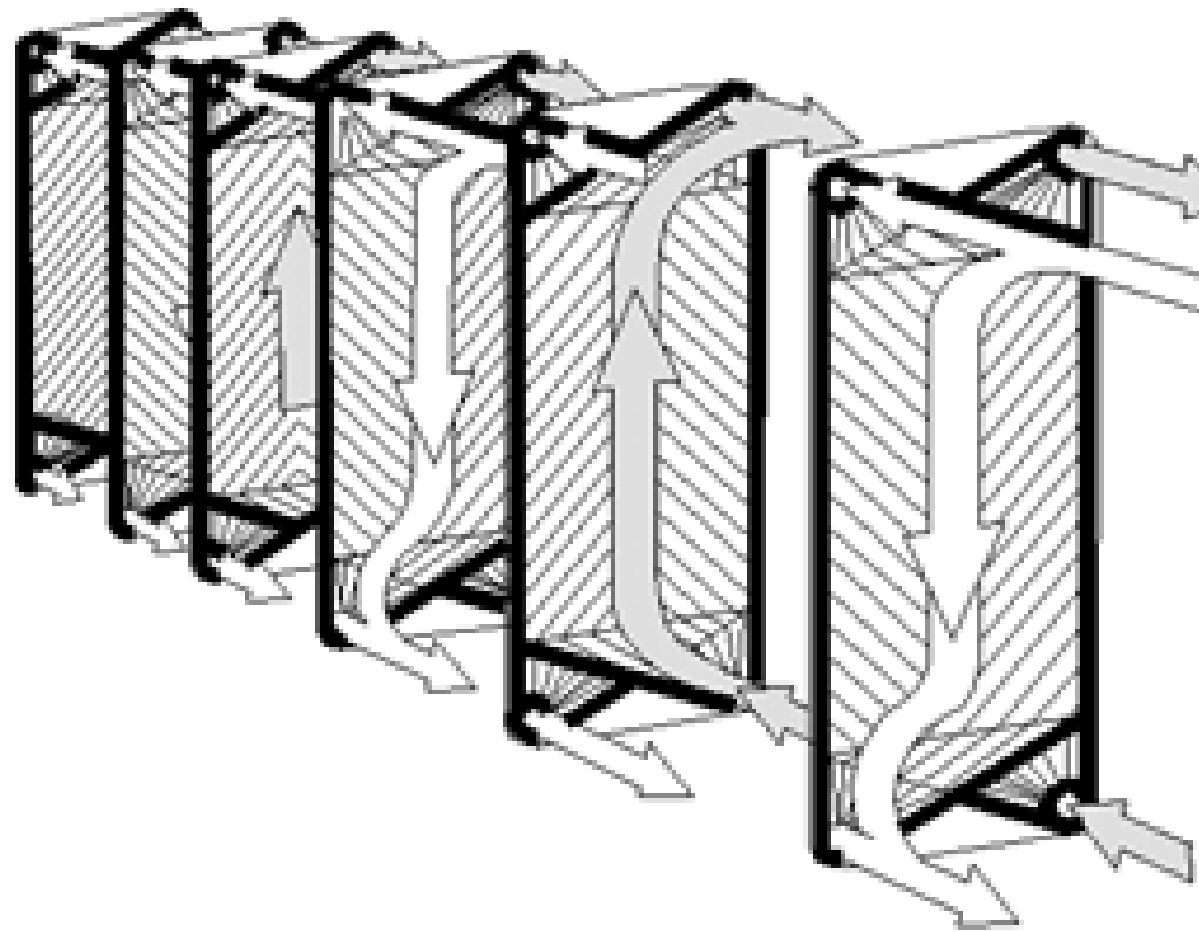
Σωληνοειδής εναλλάκτης θερμότητας σπειροειδούς σωλήνα (coil heat exchanger)



1. Ζεσταίνει/ψύχει συνεχή και ασυνεχή συστήματα.
2. Η σπείρα φέρει συνήθως το θερμό/ψυχρό μέσο.

# Ταξινόμηση εναλλακτών

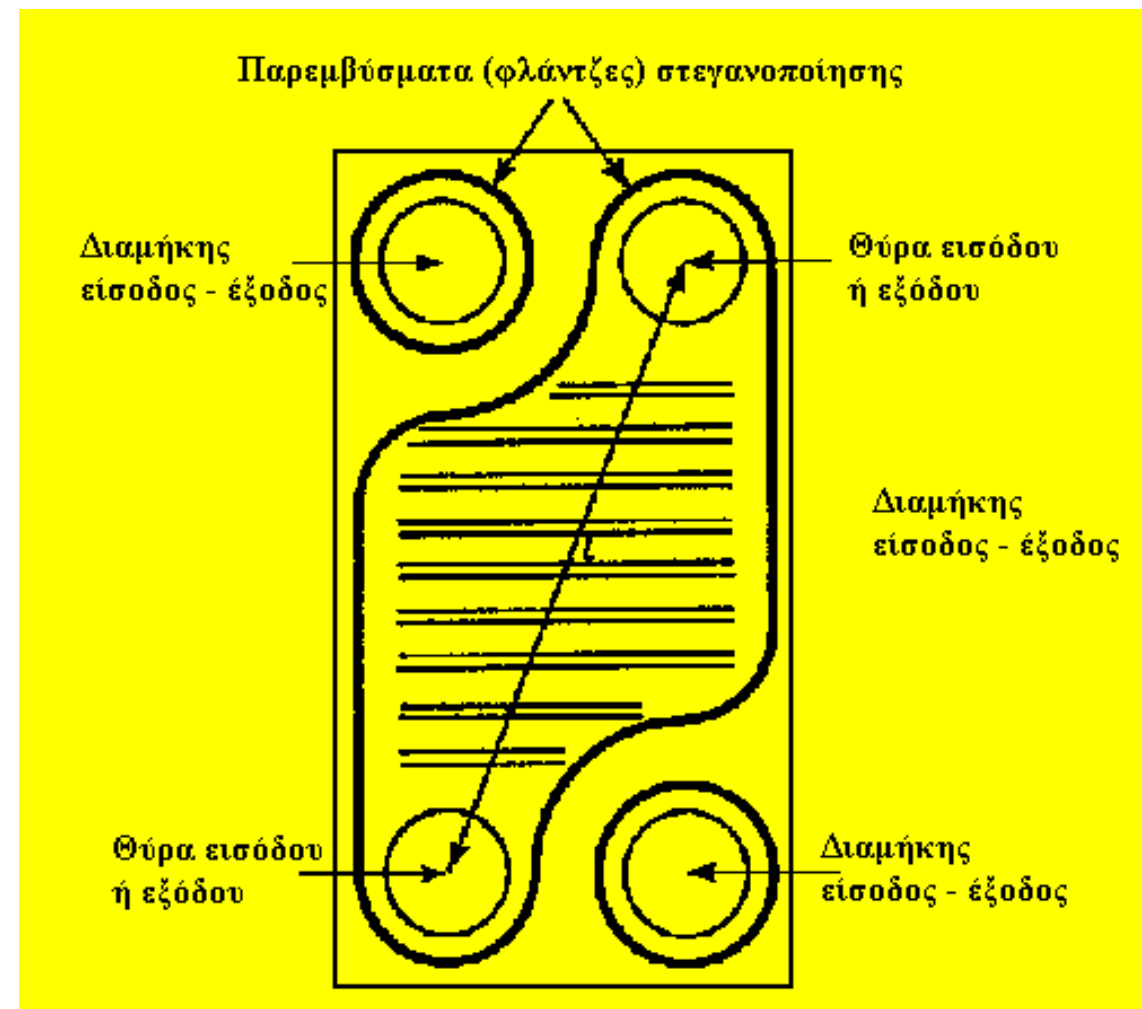
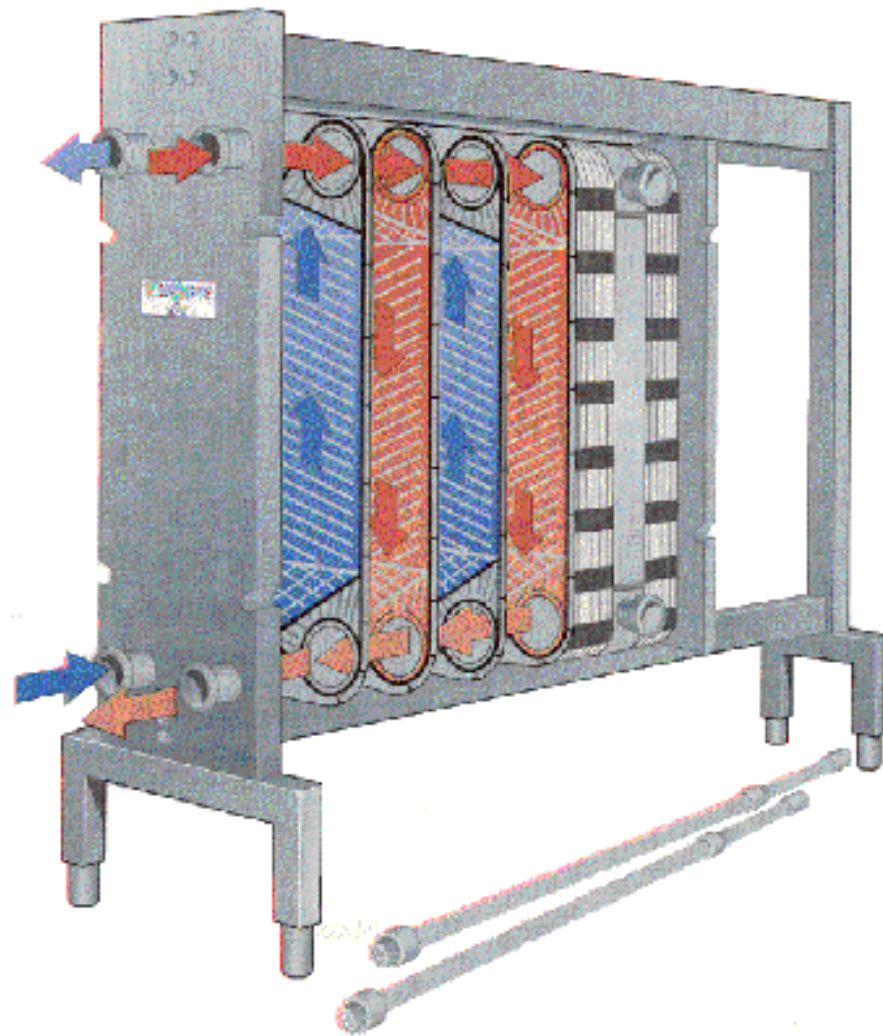
Εναλλάκτες πλάκας – στεγανοποιημένοι, σπирάλ, σπειροειδούς πλάκας, λεπτού ελάσματος





# Ταξινόμηση εναλλακτών

## Πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας (νευτωνικά ρευστά)

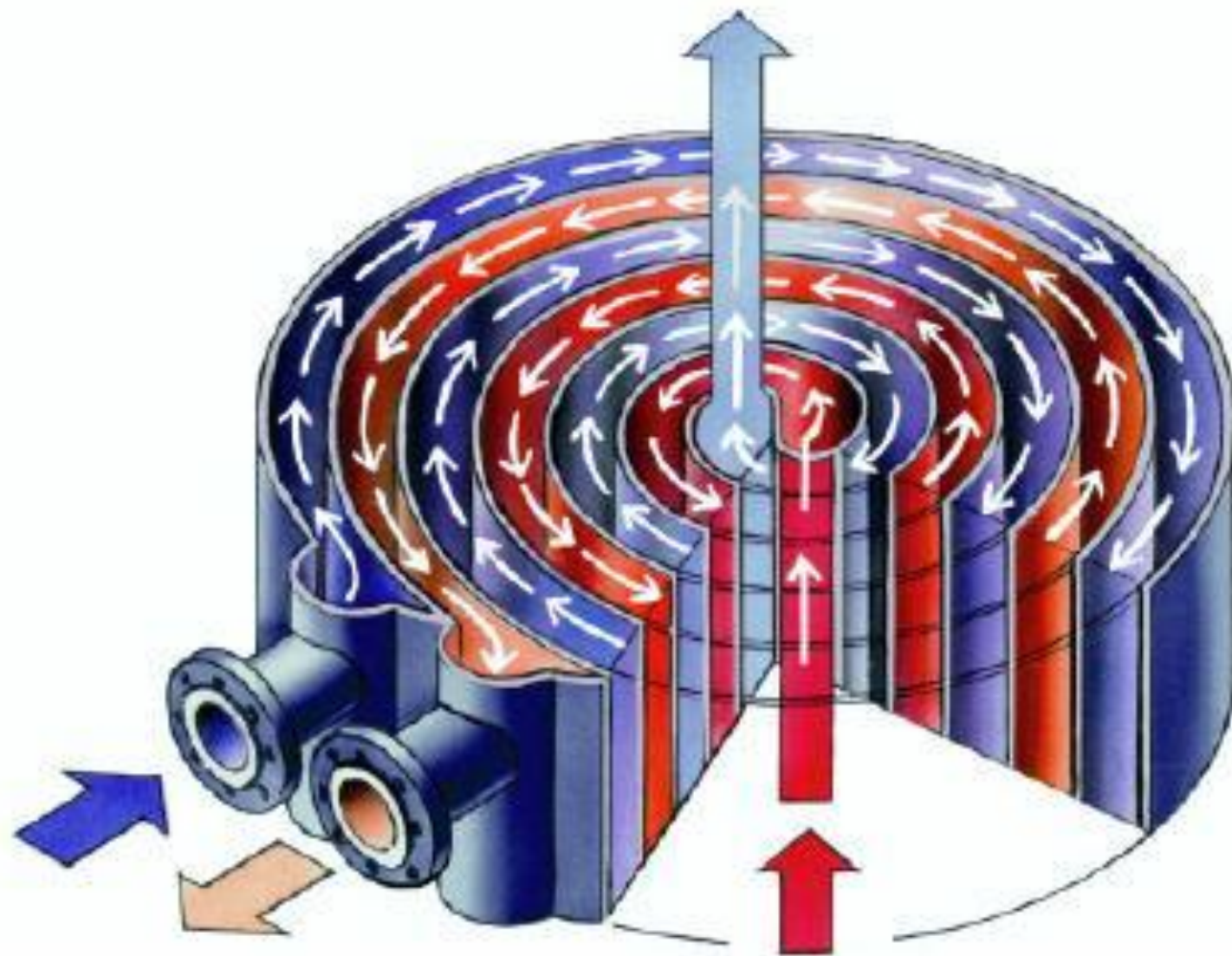


Το προϊόν ρέει υπό την μορφή ενός πολύ λεπτού φιλμ μεταξύ δύο θερμαινόμενων ή ψυχόμενων επιφανειών, με αποτέλεσμα την ταχεία αύξηση ή ελάττωση της θερμοκρασίας του με μία μόνο διέλευσή του πάνω από την συγκεκριμένη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας. Η εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας βασίζεται στα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας από το μέσο προς το προϊόν κατά μήκος της πλακοειδούς επιφάνειας θέρμανσης ή ψύξης.



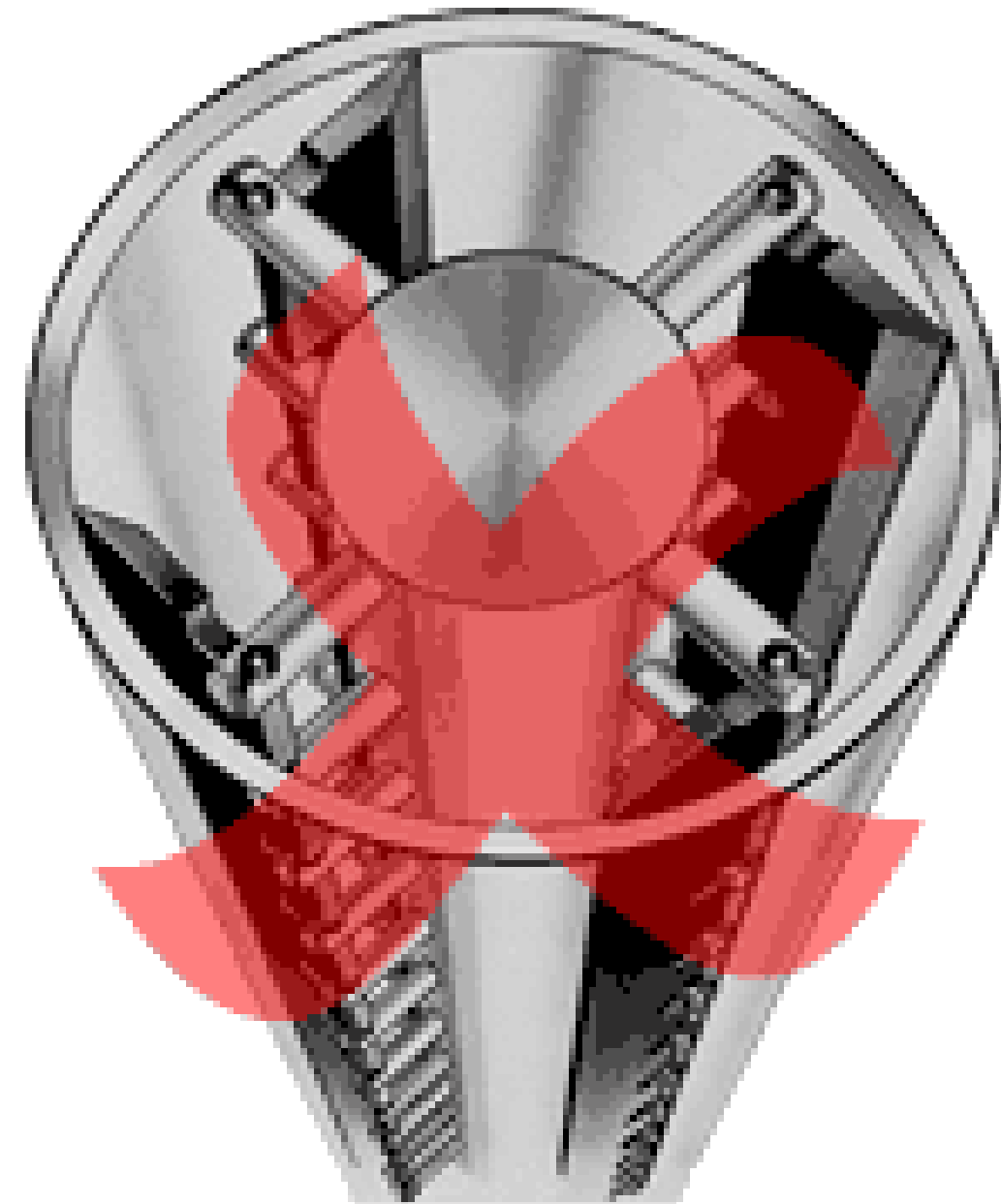
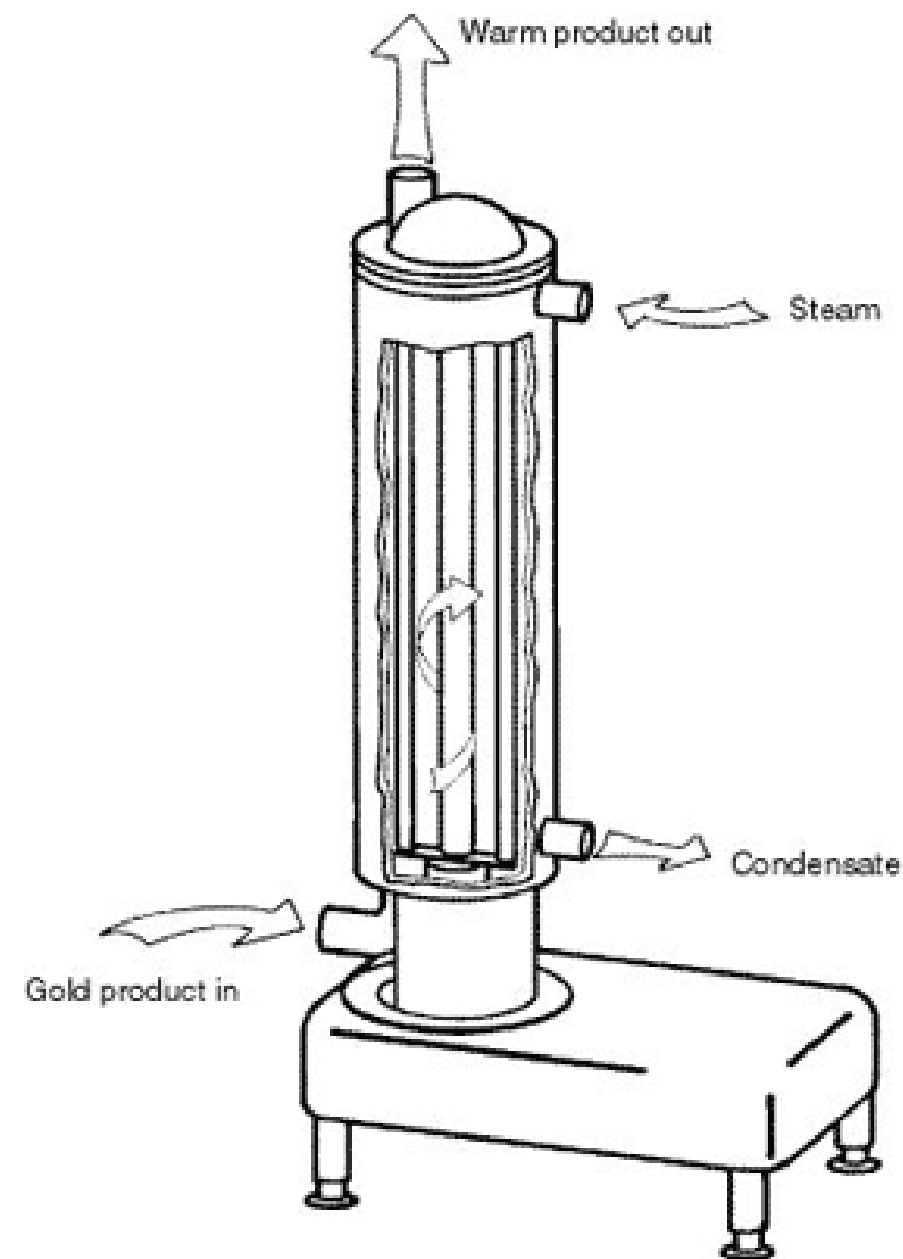
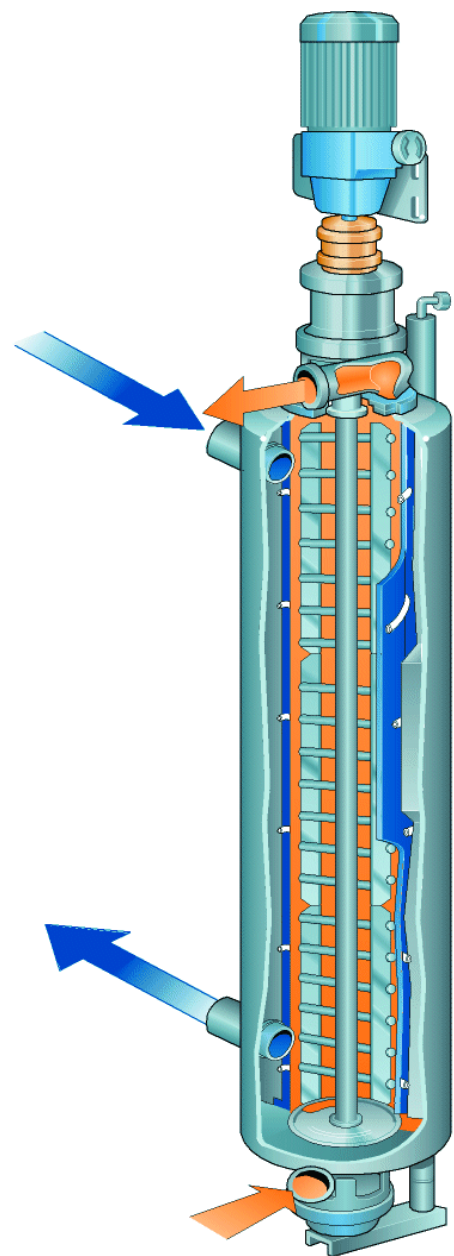
# Ταξινόμηση εναλλακτών

Σωληνοειδής εναλλάκτης θερμότητας σπειροειδούς σωλήνα (coil heat exchanger)



# Ταξινόμηση εναλλακτών

Αποξεομένης επιφάνειας εναλλάκτης θερμότητας (για πολύ ρευστά τρόφιμα) –κάθετος ή οριζόντιος σωλήνας με πτερύγιο απόξεσης επιφάνειας, πτερυγιοφόροι σπειροειδείς εναλλάκτες

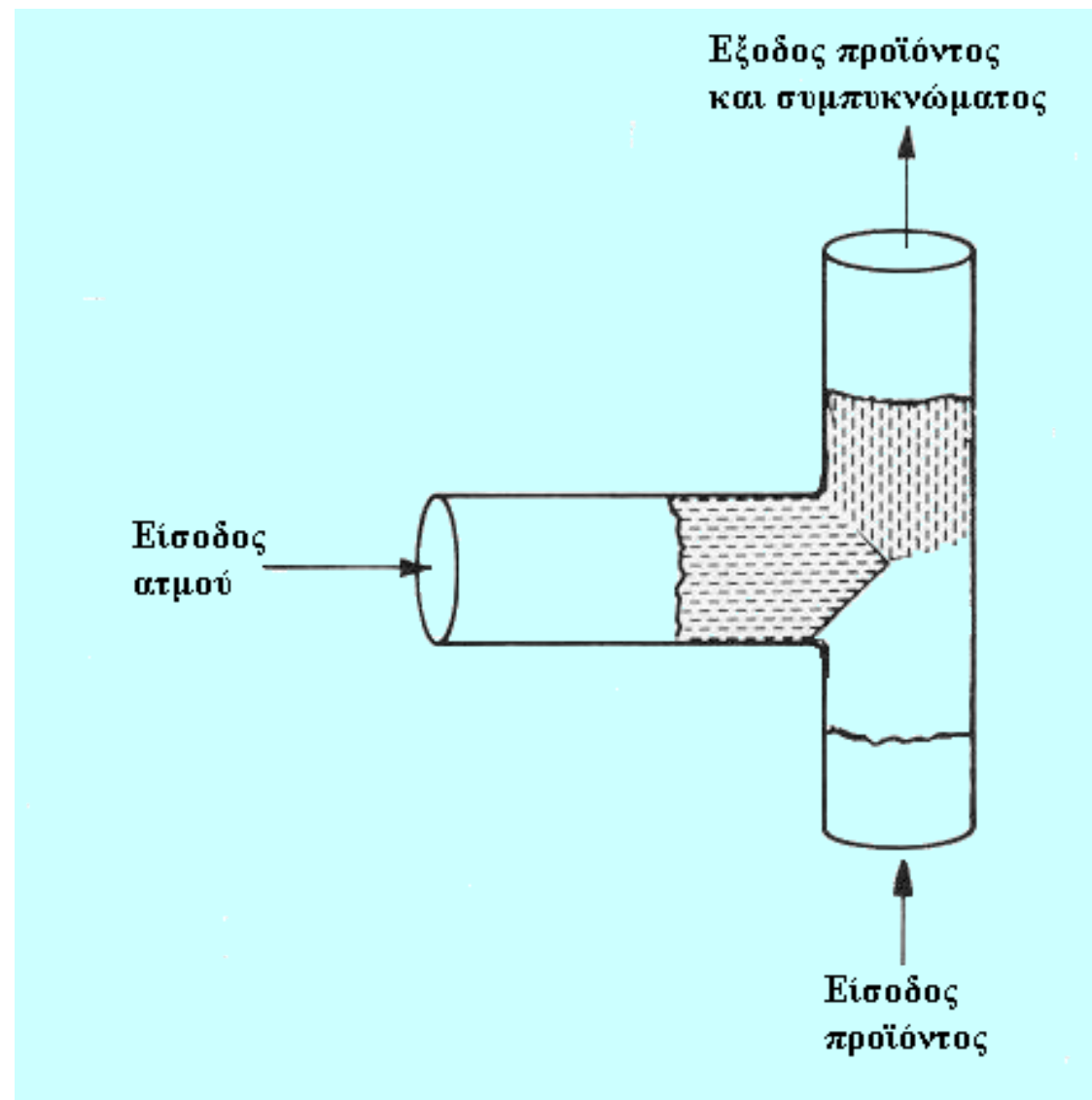




# Ταξινόμηση εναλλακτών – Άμεσης μεταφοράς

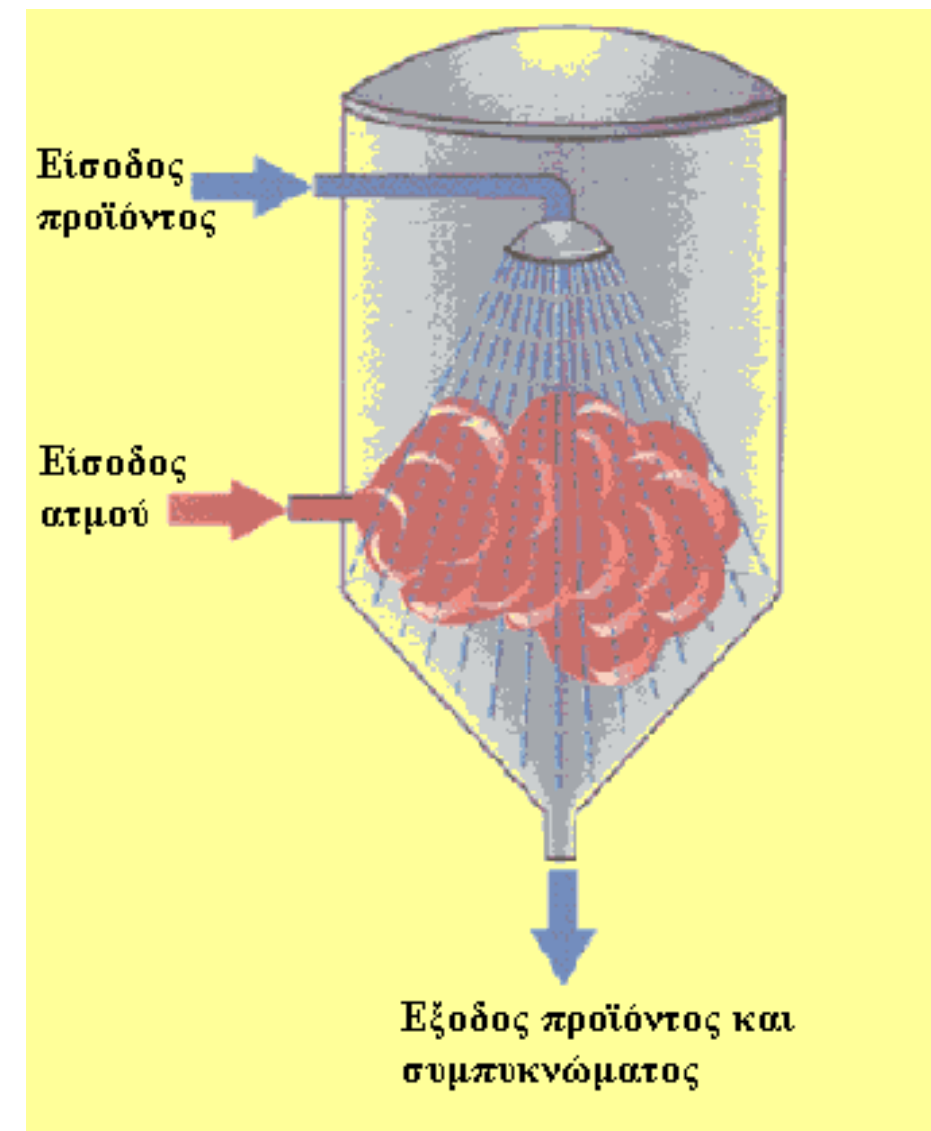
## Έγχυσης ατμού

Ατμός εγχύεται μέσα σε προϊόν που ρέει σε σωληνοειδή αγωγό με αποτέλεσμα την μεταφορά θερμότητας από τον ατμό προς το προϊόν και την πλήρη συμπύκνωση του ατμού.



## Ενστάλαξης σε ατμό

Το προϊόν ψεκάζεται σε θάλαμο όπου εισάγεται ατμός με αποτέλεσμα την μεταφορά θερμότητας από τον ατμό προς τα σταγονίδια προϊόντος, την συμπύκνωση του ατμού και την ανάμιξη τους.





# Ταξινόμηση εναλλακτών – θέρμανση/ψύξη με αναγέννηση

## Heat integration

Στις σύγχρονες χημικές βιομηχανίες υπάρχει ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους.

Πολλοί εναλλάκτες ανακτούν ενέργεια. Έτσι η θερμότητα του θερμού ρευστού, πχ έξοδος από ένα αντιδραστήρα υψηλών θερμοκρασιών, χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του εισερχόμενου ψυχρού ρευστού ενώ ταυτόχρονα το ψυχρό ρευστό ψύχει το ρεύμα εξόδου του αντιδραστήρα (θερμό) εξοικονομώντας ταυτόχρονα νερό ψύξης και ενέργεια θέρμανσης. Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε έναν εναλλάκτη θερμότητας και καλείται εναλλαγή θερμότητας με αναγέννηση ή κοινώς ανάκτηση θερμότητας.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται τα τελευταία χρόνια κυρίως στις μοντέρνες εγκαταστάσεις παστερίωσης και ο βαθμός απόδοσής της μπορεί να φτάσει μέχρι 94 – 95 %.

Ο βαθμός απόδοσης ενός εναλλάκτη αναγέννησης υπολογίζεται εφαρμόζοντας την εξίσωση:

$$R = \frac{(T_r - T_i)}{(T_p - T_i)} \times 100$$

R = Αποδοτικότητα εναλλάκτη αναγέννησης %

T<sub>r</sub> = Θερμοκρασία ρευστού μετά την αναγέννηση

T<sub>i</sub> = Θερμοκρασία εισερχόμενου ψυχρού ρευστού

T<sub>p</sub> = Θερμοκρασία παστερίωσης

# Σύνοψη ειδών εναλλακτών

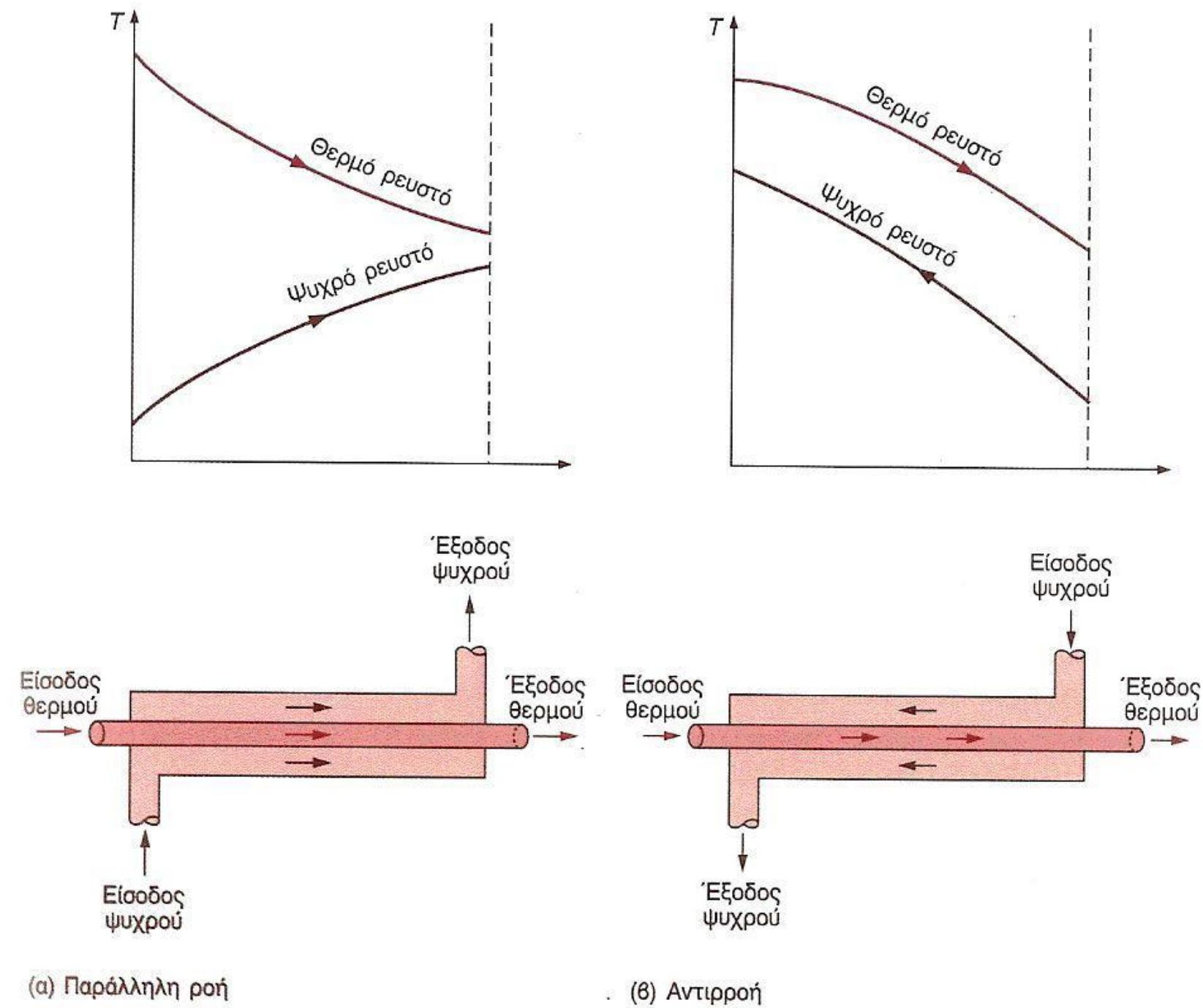
---

## Τα σημαντικότερα είδη:

1. Διπλού σωλήνα με ροή παράλληλη ή κατ'αντιρροή.
2. Κελύφους και σωλήνων.
3. Εγκάρσιας ροής με αναμίξιμα ή μη αναμίξιμα ρεύματα.

# Σύνοψη ειδών εναλλακτών

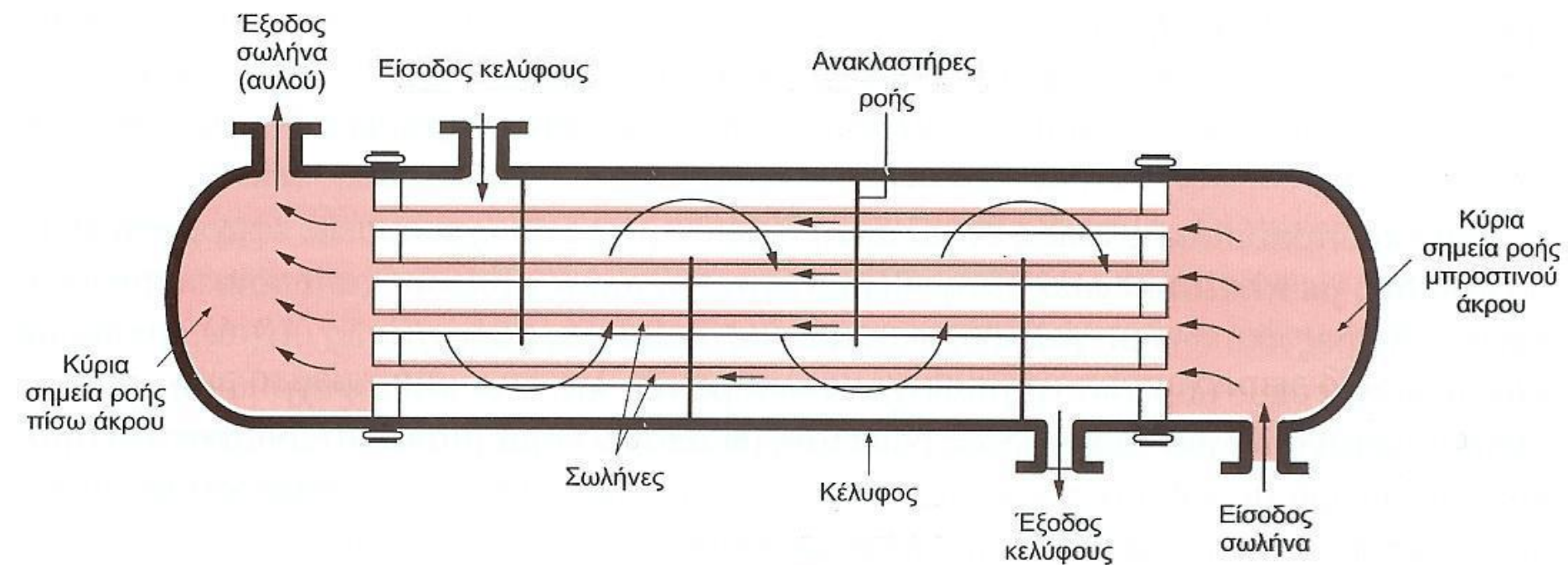
## Εναλλάκτες διπλού σωλήνα



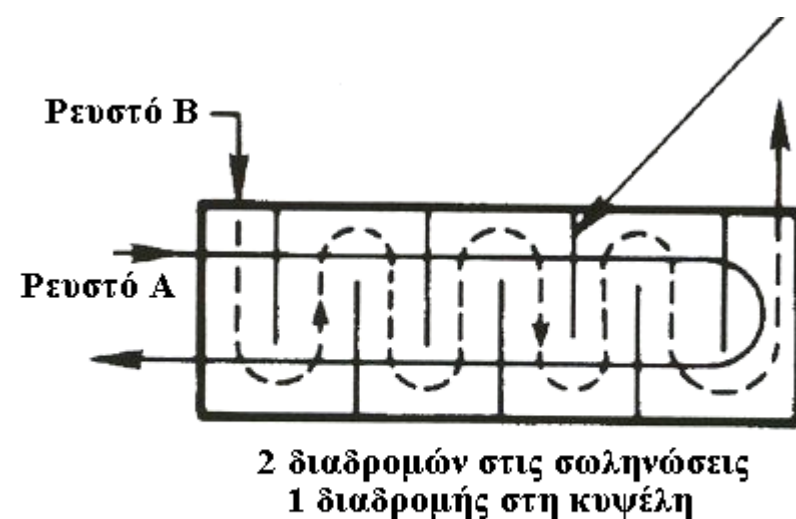
Σχήμα 8.1. Διαφορετικές καταστάσεις ροής και σχετικές θερμοκρασιακές κατανομές σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα.

# Σύνοψη ειδών εναλλακτών

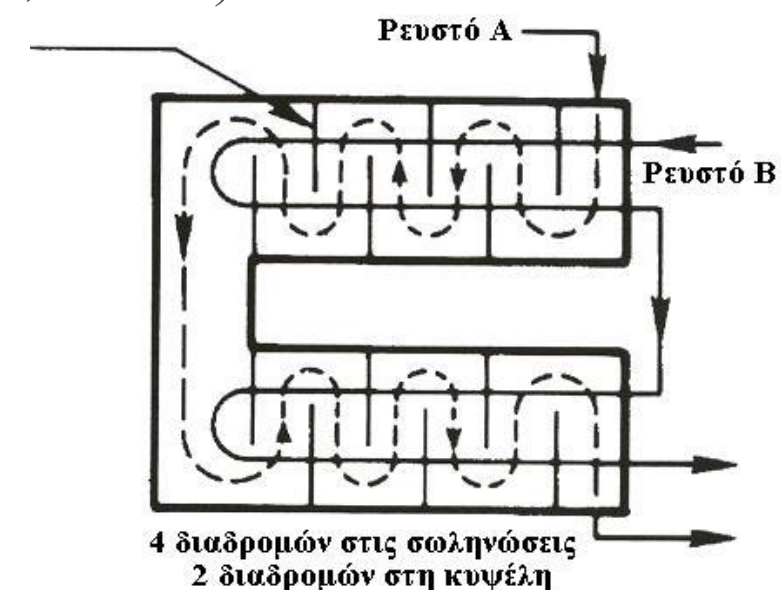
## Εναλλάκτες κελύφους και σωλήνων (shell-and-tube heat exchangers)



Σχήμα 8.2. Η σχηματική απεικόνιση ενός εναλλάκτη θερμότητας δέσμης σωλήνων με διαφράγματα (μίας διαδρομής διαφράγματος, κελύφους και μίας διαδρομής σωλήνα, αυλού).



Σχήμα 8.3. Διάταξη ροής δύο διαδρομών στις σωληνώσεις και μίας διαδρομής στην κυψέλη.

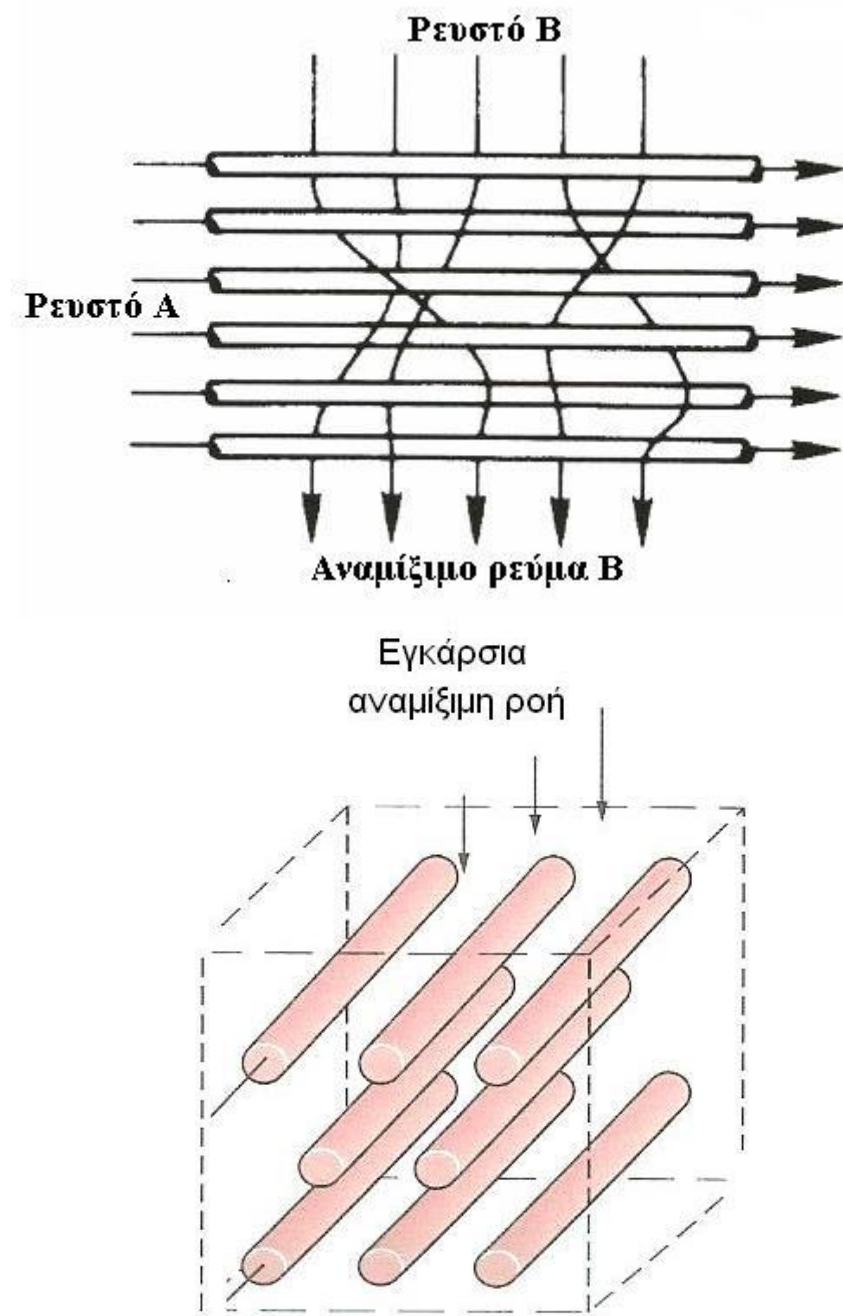


Σχήμα 8.4. Διάταξη ροής τεσσάρων διαδρομών στις σωληνώσεις και δύο διαδρομών στη κυψέλη.

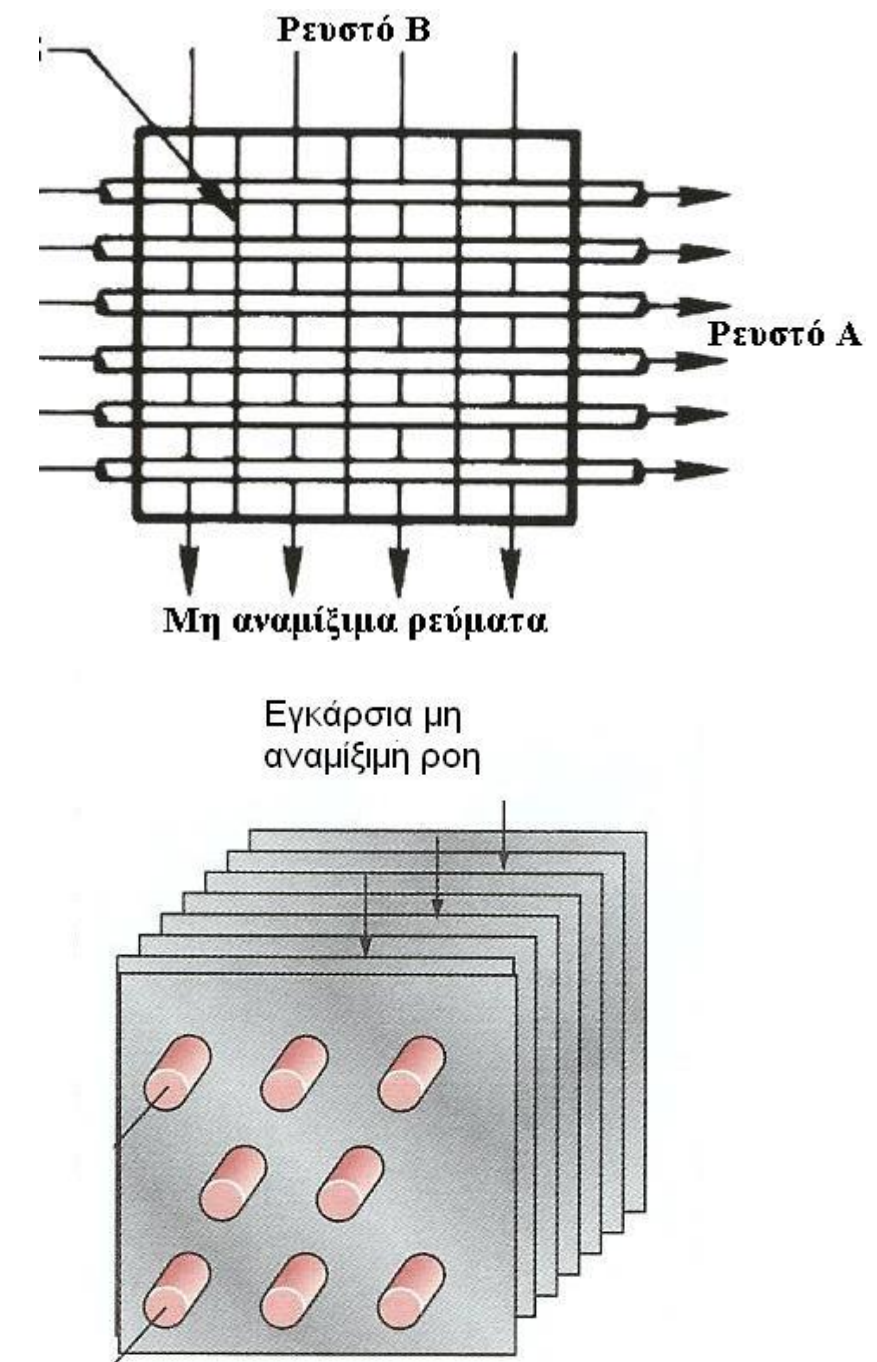


# Σύνοψη ειδών εναλλακτών

## Εναλλάκτες εγκάρσιας ροής (cross-flow heat exchangers)



Σχήμα 8.5. Αναμιξιμη εγκάρσια ροή.

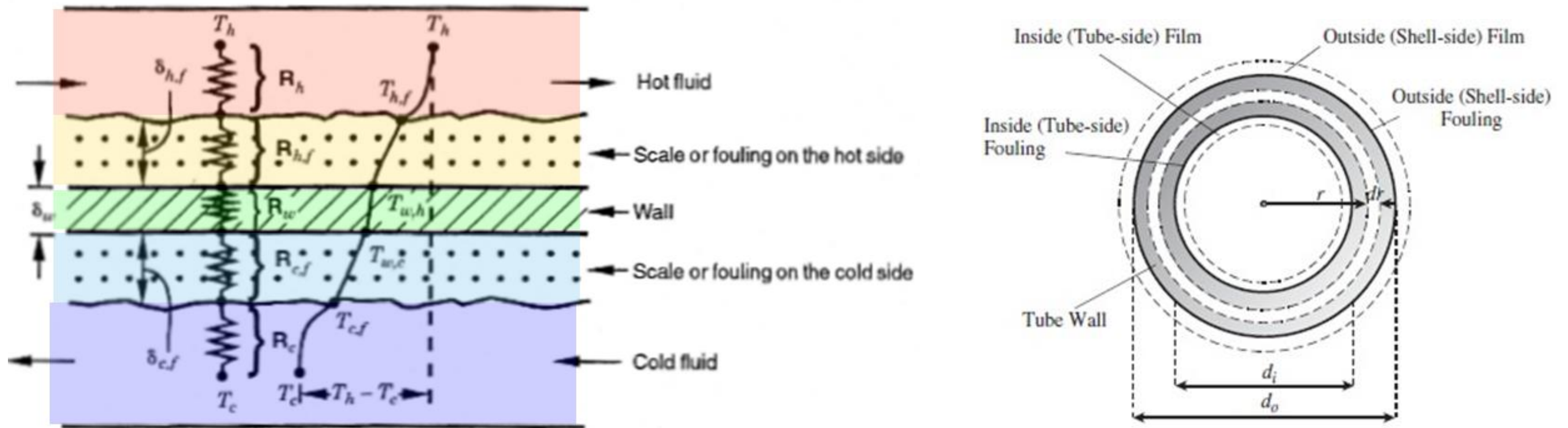


Σχήμα 8.6. Μη αναμιξιμη εγκάρσια ροή.

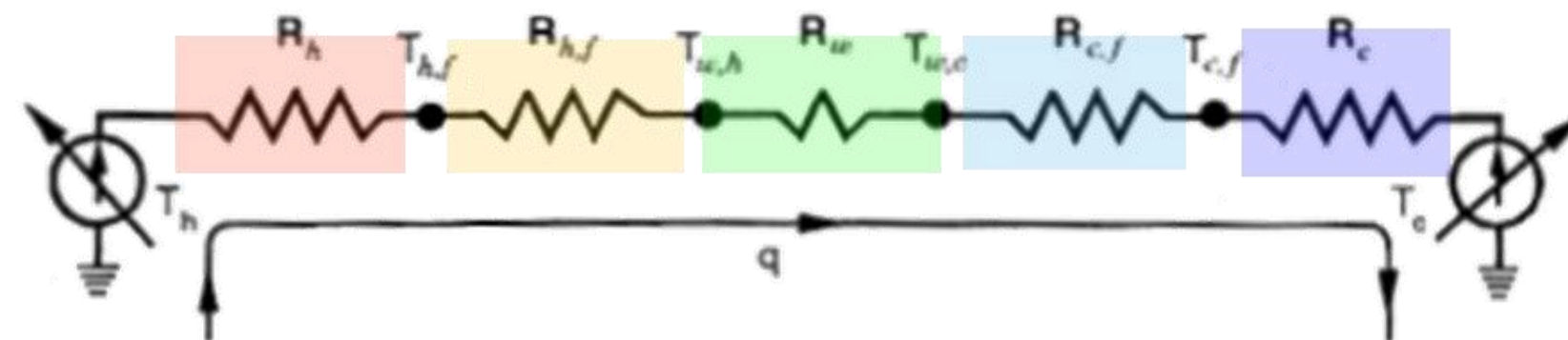
# Επίλυση εναλλακτών

## Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Κάθε υλικό (ρευστά, τοίχωμα, επικαθήσεις) που συμμετέχει στη μεταφορά θερμότητας λειτουργεί ως αντίσταση σε αυτή.

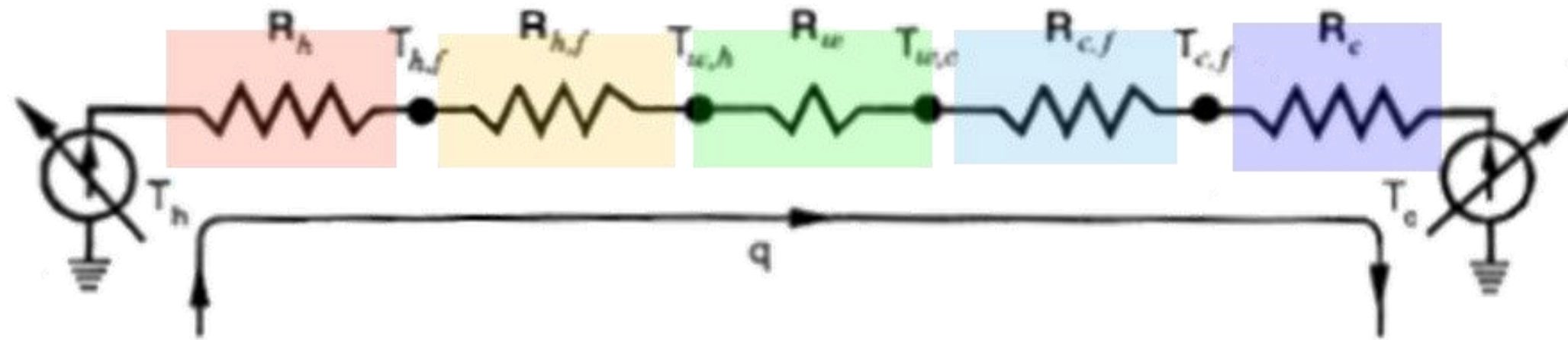


Ο υπολογισμός της αντίστασης στη μεταφορά θερμότητας γίνεται όπως και στις ηλεκτρικές αντιστάσεις.



# Επίλυση εναλλακτών

## Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας



Η συνολική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας είναι:

$$R_h + R_{h,f} + R_w + R_{c,f} + R_c = R = \frac{1}{UA}$$

όπου:

- $U$  ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
- $A$  η επιφάνεια εναλλαγής



# Επίλυση εναλλακτών

## Γενικότεροι πρακτικοί κανόνες

Στους αυλούς ρέει το ρευστό που:

- ✓ είναι περισσότερο διαβρωτικό
- ✓ είναι σε μεγαλύτερη πίεση
- ✓ είναι σε υψηλή θερμοκρασία
- ✓ έχει προβλήματα επικαθήσεων
- Στο κέλυφος ρέει το ρευστό που συμπυκνώνεται και αυτό με το μεγαλύτερο ιξώδες.
- Ελάχιστη θερμοκρασιακή προσέγγιση είναι οι 10°C.  
ειδικότερα για τα ψυκτικά ρευστά η ελάχιστη θ.π. είναι 5°C.

Τυπική πτώση πίεσης:

- 0.1 bar για εξάτμιση
- 0.2-0.6 bar για τις άλλες περιπτώσεις.

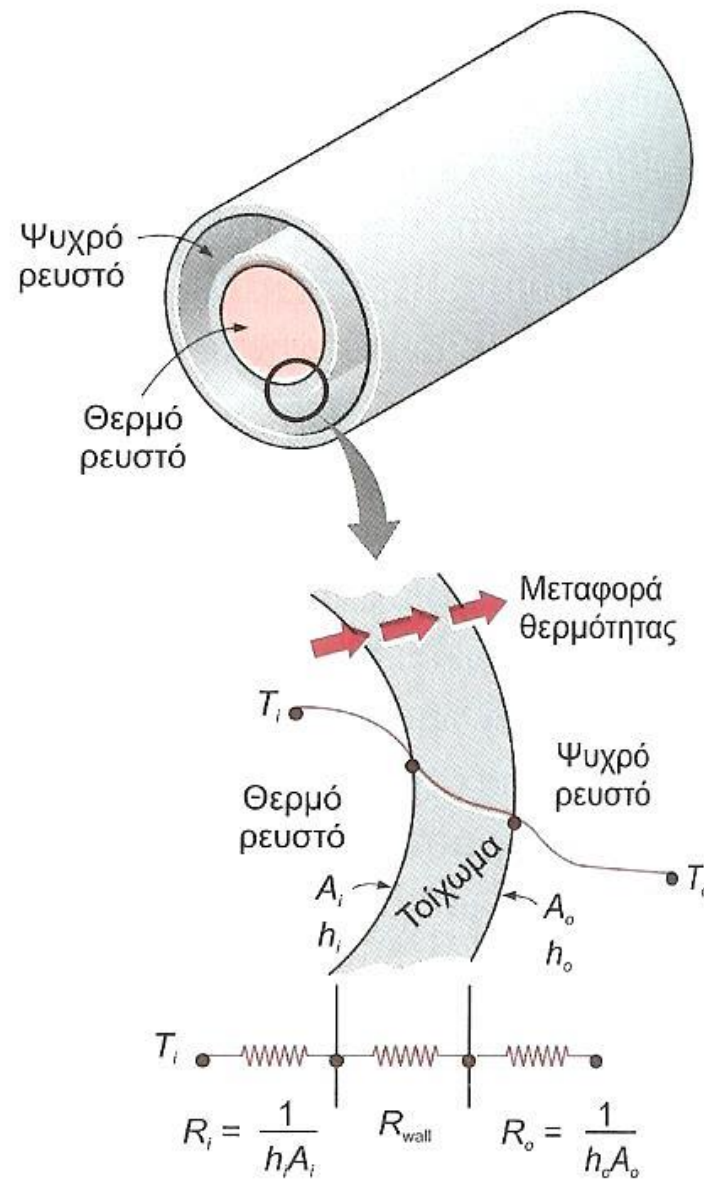
- Τυπικές διαστάσεις των αυλών είναι 19mm ( $\frac{3}{4}$  in) εξωτ. διαμέτρου (OD), 25.4 mm (1 in) απόσταση μεταξύ τους, τριγωνική διάταξη, και 5 m (16 ft) μήκος.



# Επίλυση εναλλακτών

## Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Δίκτυο θερμικής αντίστασης στον απλό εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα:



$$R_{ολ} = R_i + R_{τοιχ} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + R_{τοιχ} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$R_{τοιχ} = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi L k}$$

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών εκφράζεται λαμβάνοντας υπόψη το συνδυασμό όλων των θερμικών αντιστάσεων σε μία αντίσταση,  $R_{ολ}$ , ή θεωρώντας έναν ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας,  $U$ :

Σχήμα 8.7. Δίκτυο θερμικής αντίστασης με μεταφορά θερμότητας σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R_{ολ} = \frac{1}{h_i A_i} + R_{τοιχ} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{ολ}} = UA \Delta T$$

Όπου εάν θεωρήσουμε:  
 $R_{τοιχ} \approx 0$  και  $A_i \approx A_o$

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

# Επίλυση εναλλακτών

## Υποθέσεις εργασίας

- Δεν υπάρχει απώλεια θερμότητας στο περιβάλλον
- Οι μεταβολές στην κινητική και δυναμική ενέργεια των ρευστών είναι αμελητέες

Τα παραπάνω σημαίνουν πως ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το θερμό ρευστό είναι ίσος με το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας προς το ψυχρό ρευστό.

Ψυχρό ρεύμα, cold (c)

$$\dot{q} = \dot{m}_c C_{pc} (T_{c,out} - T_{c,in})$$

Θερμό ρεύμα, hot (h)

$$\dot{q} = \dot{m}_h C_{ph} (T_{h,in} - T_{h,out})$$

Όπου :

$\dot{m}_c, \dot{m}_h$  = παροχές μάζας

$T_{c,out}, T_{h,out}$  = θερμοκρασίες εξόδου

$C_{pc}, C_{ph}$  = ειδικές θερμότητες

$T_{c,in}, T_{h,in}$  = θερμοκρασίες εισόδου

# Επίλυση εναλλακτών

## Μέθοδοι επίλυσης

Στους εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιείται συχνά η έννοια του ρυθμού θερμοχωρητικότητας,  $C$ , η οποία ορίζεται από το γινόμενο «παροχή μάζας x ειδική θερμότητα»:

$$C = \dot{m}C_p$$

$$\dot{q} = C_c (T_{c,out} - T_{c,in})$$

$$\dot{q} = C_h (T_{h,in} - T_{h,out})$$

Όπου κατά κανόνα:

$$C_c \neq C_h$$

Για τη μελέτη της λειτουργίας των εναλλακτών θερμότητας μπορούν να εφαρμοσθούν δύο μέθοδοι:

- Η μέθοδος της μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς και
- Η μέθοδος της αποδοτικότητας του εναλλάκτη.

# Επίλυση εναλλακτών

## Μέθοδος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς

$$Q = U A F \Delta T_{ln}$$

U: ολικός συντελεστής

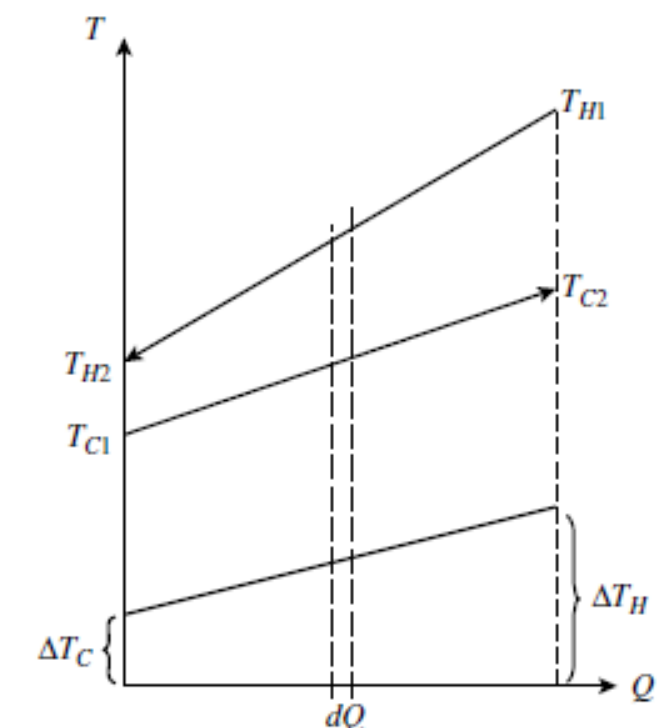
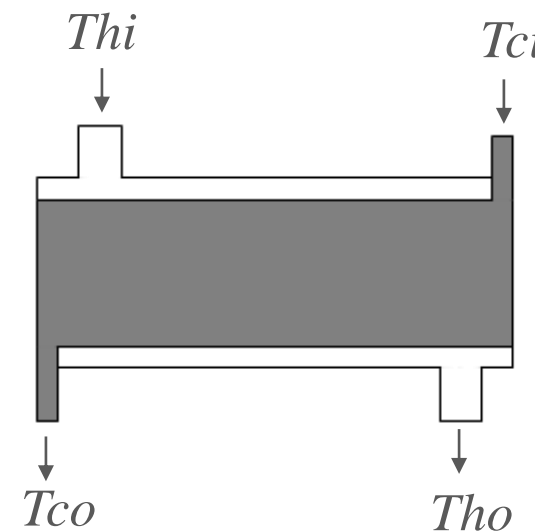
A: επιφάνεια εναλλαγής

F: συντελεστής

$\Delta T_{ln}$ : μέση λογ. θερμ. διαφορά

Η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά (LMTD) ορίζεται ως:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$



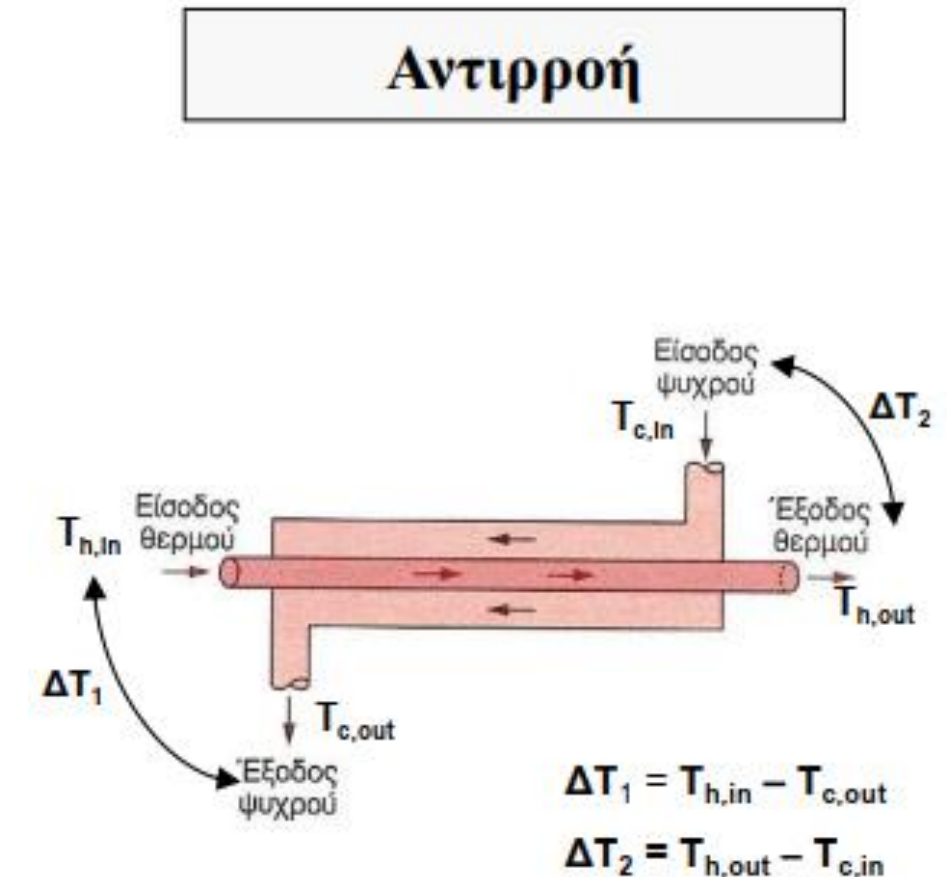
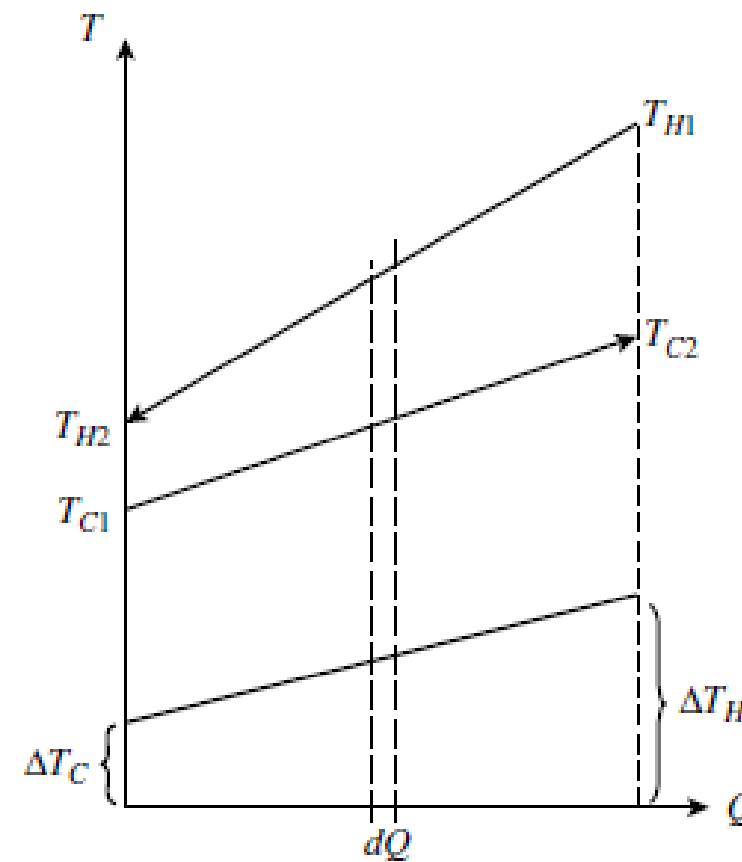
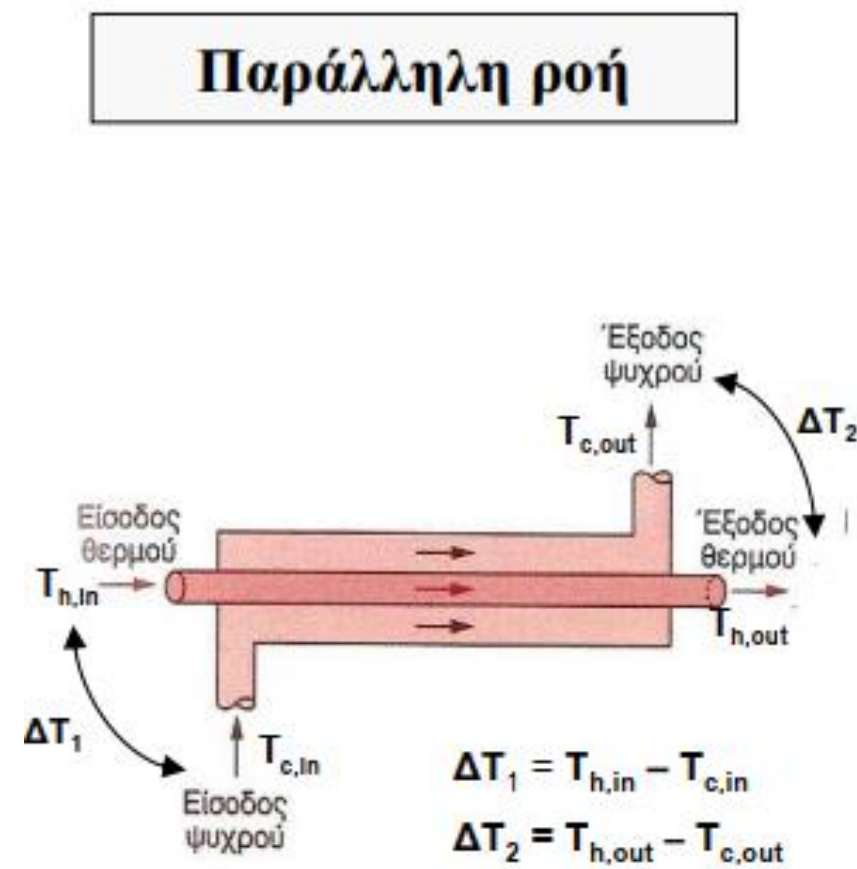
- Η τυπική διαρρύθμιση της ροής σε έναν εναλλάκτη είναι η αντιροή.
- Ο F είναι συντελεστής διόρθωσης της  $\Delta T_{ln}$  βάσει της διαρρύθμισης της ροής. Ο εναλλάκτης διπλού σωλήνα αντιροή είναι η βάση σύγκρισης (F=1). Χρησιμοποιούμε ένα συντελεστή διόρθωσης  $F=f(P,R)$  από κατάλληλα διαγράμματα.
  - μια συντηρητική προσέγγιση: F=0.9



# Επίλυση εναλλακτών

## Μέθοδος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς

Για τους εναλλάκτες διπλού σωλήνα (είτε με παράλληλη ροή είτε με αντιρροή) ισχύει ότι:



Σχήμα 8.8. Εναλλάκτες θερμότητας παράλληλη ροής.

Σχήμα 8.9. Εναλλάκτες θερμότητας αντιρροής.

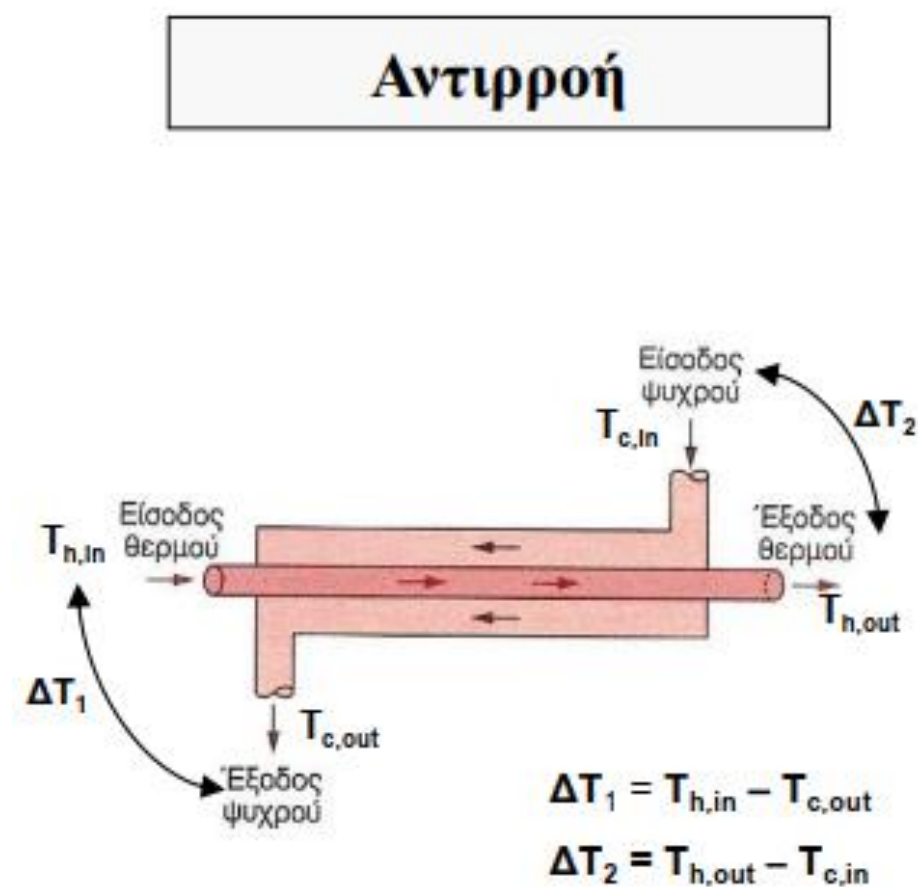
$$Q = U A F \Delta T_{ln}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$

# Επίλυση εναλλακτών

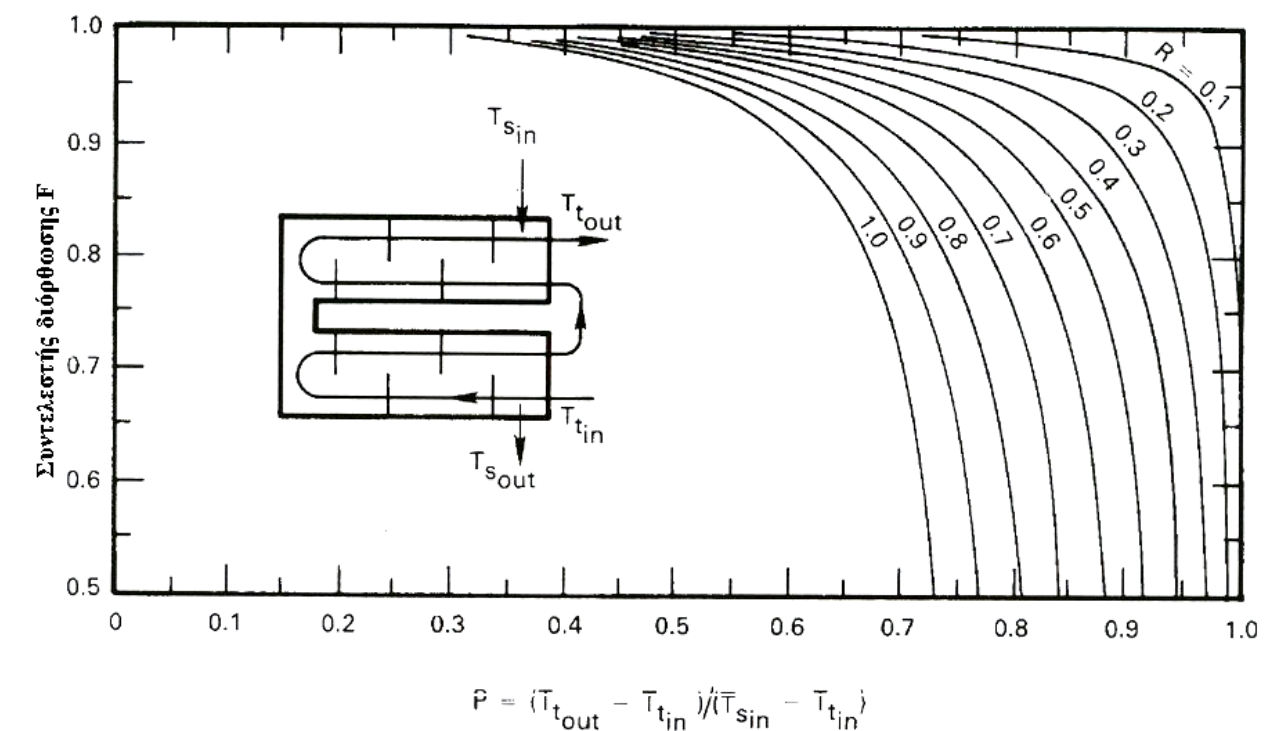
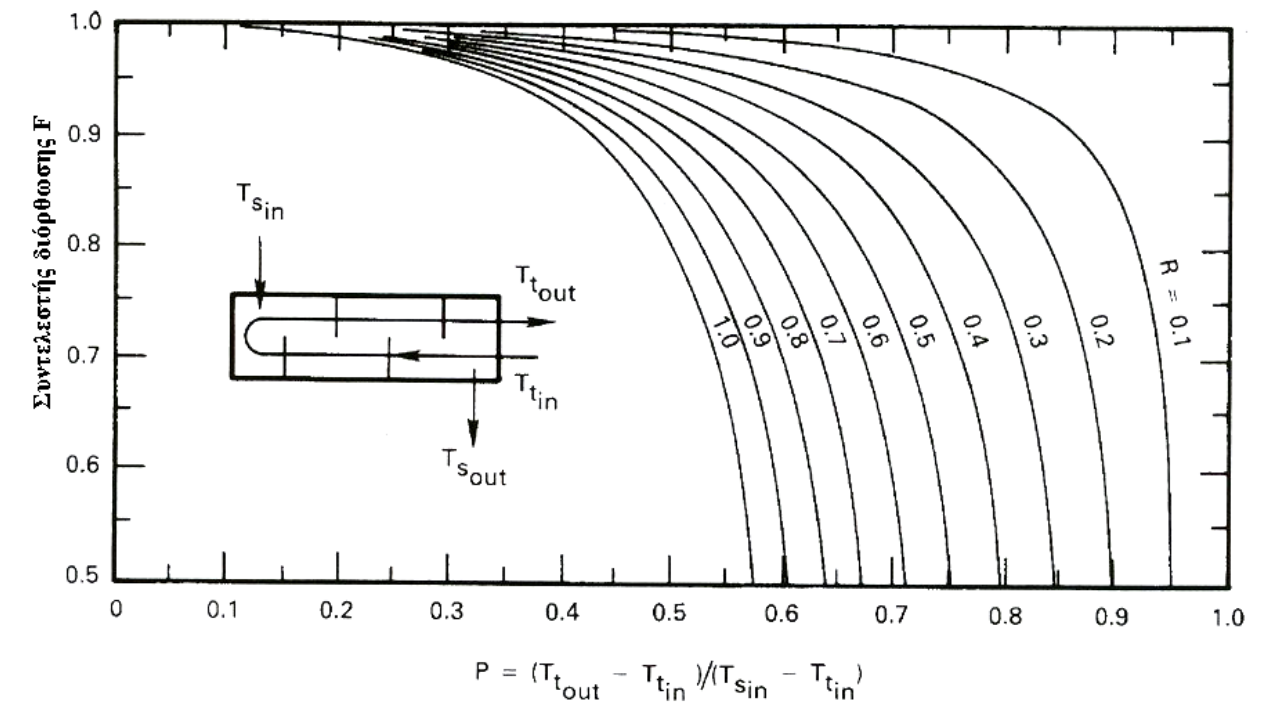
## Μέθοδος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς

- Εφαρμόζουμε την εξίσωση που χρησιμοποιείται για έναν απλό εναλλάκτη θερμότητας κατ'αντιρροή.
- Χρησιμοποιούμε ένα συντελεστή διόρθωσης  $F=f(P,R)$  από κατάλληλα διαγράμματα ή κατά προσέγγιση  $\sim 0,9$ .



$$Q = U A F \Delta T_{ln}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$

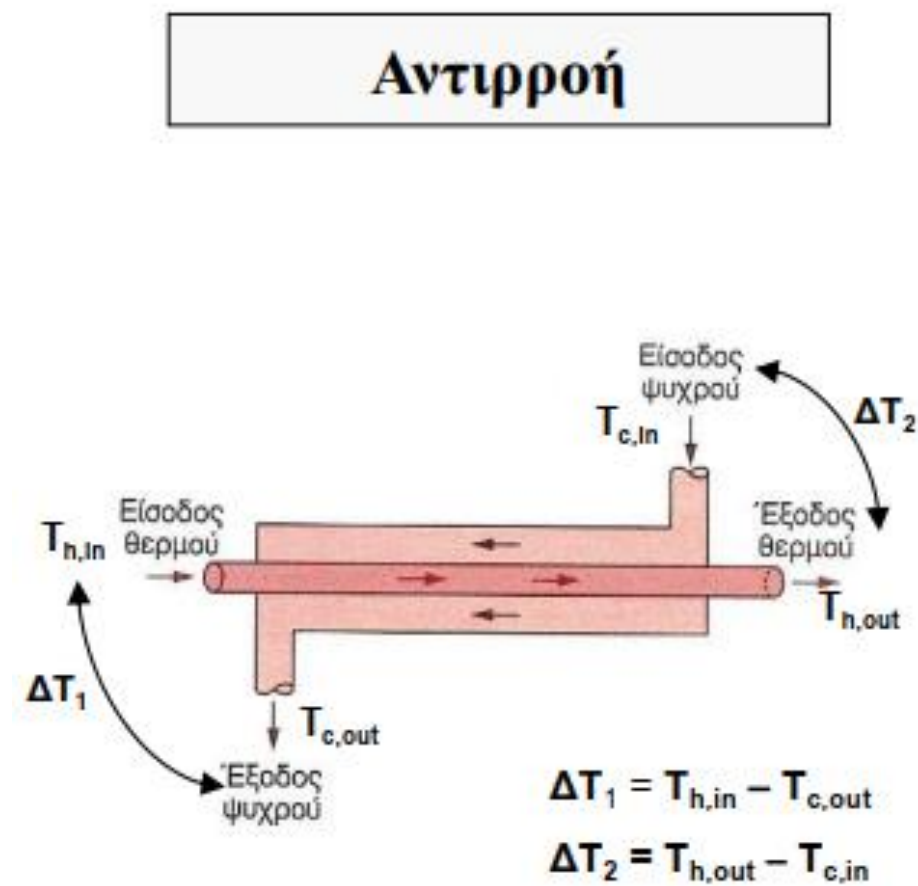


Σχήμα 8.10. Διάγραμμα Συντελεστή διόρθωσης F για: α) Μία διαδρομή κελύφους και 2, 4 ή 6 διαδρομές σωλήνων, β) Δύο διαδρομές κελύφους και 4, 8 ή 12 διαδρομές σωλήνων.

# Επίλυση εναλλακτών

## Μέθοδος μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς

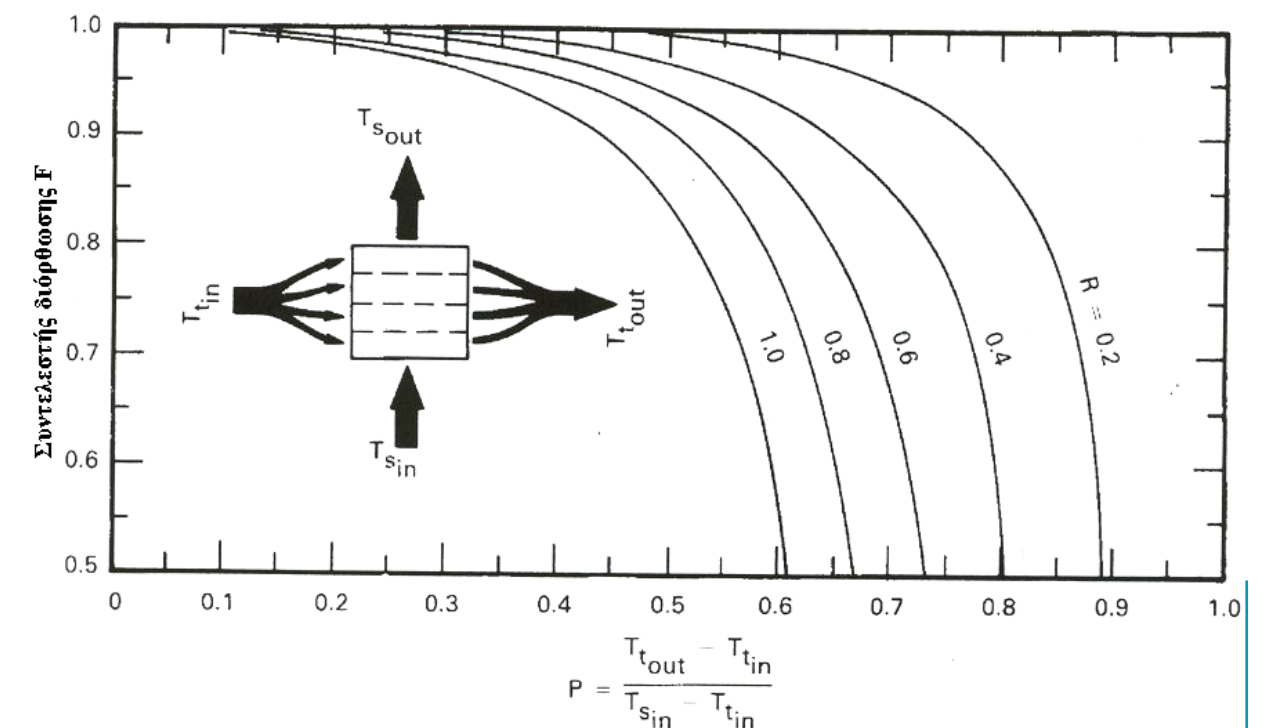
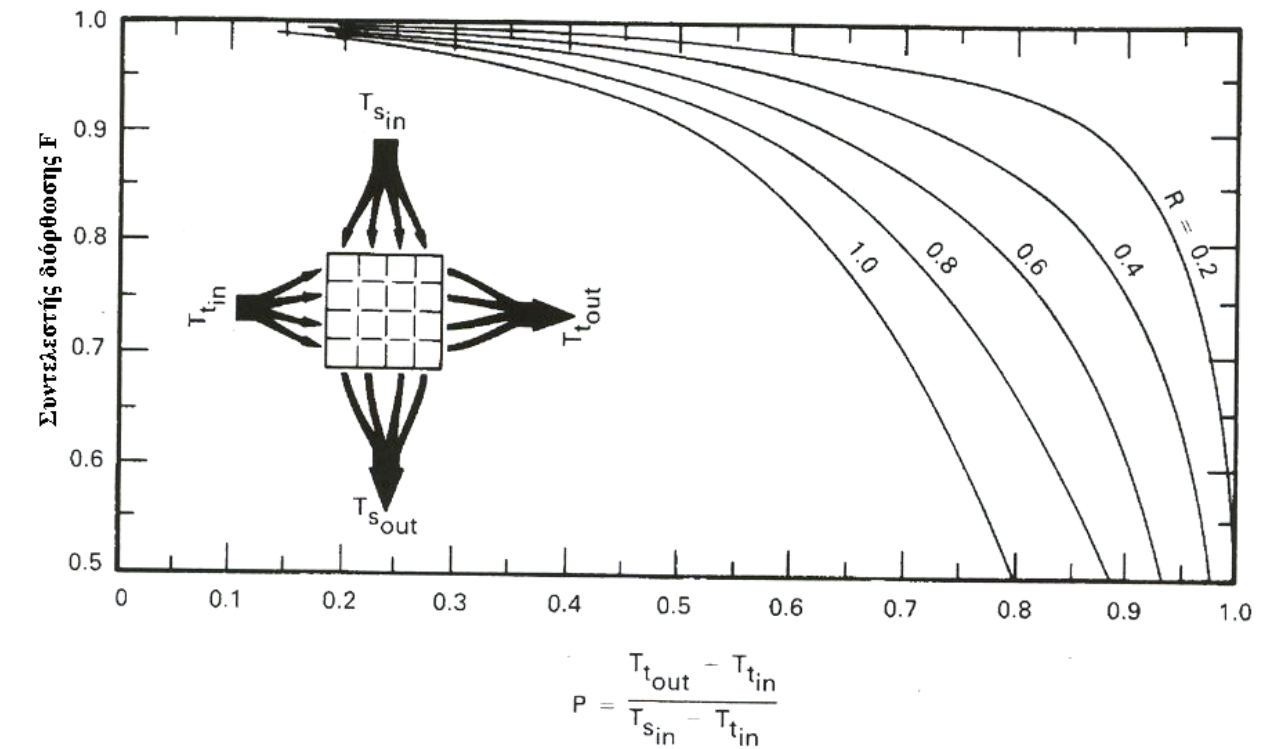
- Εφαρμόζουμε την εξίσωση που χρησιμοποιείται για έναν απλό εναλλάκτη θερμότητας κατ'αντιρροή.
- Χρησιμοποιούμε ένα συντελεστή διόρθωσης  $F=f(P,R)$  από κατάλληλα διαγράμματα ή κατά προσέγγιση  $\sim 0,9$ .



$$Q = U A F \Delta T_{ln}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$

Σχήμα 8.11. α) Εγκάρσια ροή με μη αναμίξιμα ρευστά, β) Εγκάρσια ροή με ένα αναμίξιμο ρεύμα.



# Επίλυση εναλλακτών

## Διαστασιολόγηση με μέθοδο μέσης λογαριθμικής θερμοκρασιακής διαφοράς

- Εφαρμόζουμε την εξίσωση που χρησιμοποιείται για έναν απλό εναλλάκτη θερμότητας κατ'αντιρροή.
- Χρησιμοποιούμε ένα συντελεστή διόρθωσης  $F=f(P,R)$  από κατάλληλα διαγράμματα ή κατά προσέγγιση  $\sim 0,9$ .

$$dq = U \Delta T dA$$

$$\Delta T = T_H - T_C$$

$$dq = -\dot{m}_H c_{pH} dT_H$$

$$dq = \dot{m}_C c_{pC} dT_C$$

$$dT_H - dT_C = d(T_H - T_C) = -dq \left( \frac{1}{\dot{m}_H c_{pH}} + \frac{1}{\dot{m}_C c_{pC}} \right)$$

$$Q = U A F \Delta T_{ln}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}}$$

$$T_{H,inlet} - T_{C,inlet} = \Delta T_1$$

$$T_{H,exit} - T_{C,exit} = \Delta T_2$$

Σχεδιασμός καινούργιου εναλλάκτη-όταν θερμοκρασίες εισόδου-εξόδου είναι γνωστές



# Επίλυση εναλλακτών

## Μέθοδος αποδοτικότητας του εναλλάκτη

Εισάγεται ένα νέο μέγεθος που ονομάζεται αποδοτικότητα εναλλάκτη, ( $\varepsilon$ )

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{\max}} = \frac{\text{Πραγματικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας}}{\text{Μέγιστος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας}}$$

$$\dot{q} = C_c (T_{c,\text{out}} - T_{c,\text{in}}) = C_h (T_{h,\text{in}} - T_{h,\text{out}})$$

- $C_c$ : ρυθμός θερμοχωρητικότητας ψυχρού ρεύματος.
- $C_h$ : ρυθμός θερμοχωρητικότητας θερμού ρεύματος.

Μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά  $\Delta T_{\max}$ ,  $\Delta T_{\max} = T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}}$

$$\dot{q}_{\max} = C_{\min} \Delta T_{\max}$$

# Επίλυση εναλλακτών

## Μέθοδος αποδοτικότητας του εναλλάκτη

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \dot{q}_{\max} = \varepsilon \cdot C_{\min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in})$$

Η αποδοτικότητα εναλλάκτη,  $\varepsilon$ , έχει αποδειχθεί ότι είναι συνάρτηση δύο αδιάστατων αριθμών:

$$\varepsilon = f(C_{\min}/C_{\max}, NTU)$$

NTU: αριθμός μονάδων μεταφοράς (Number of Transfer Units)

$$NTU = U \cdot A / C_{\min}$$

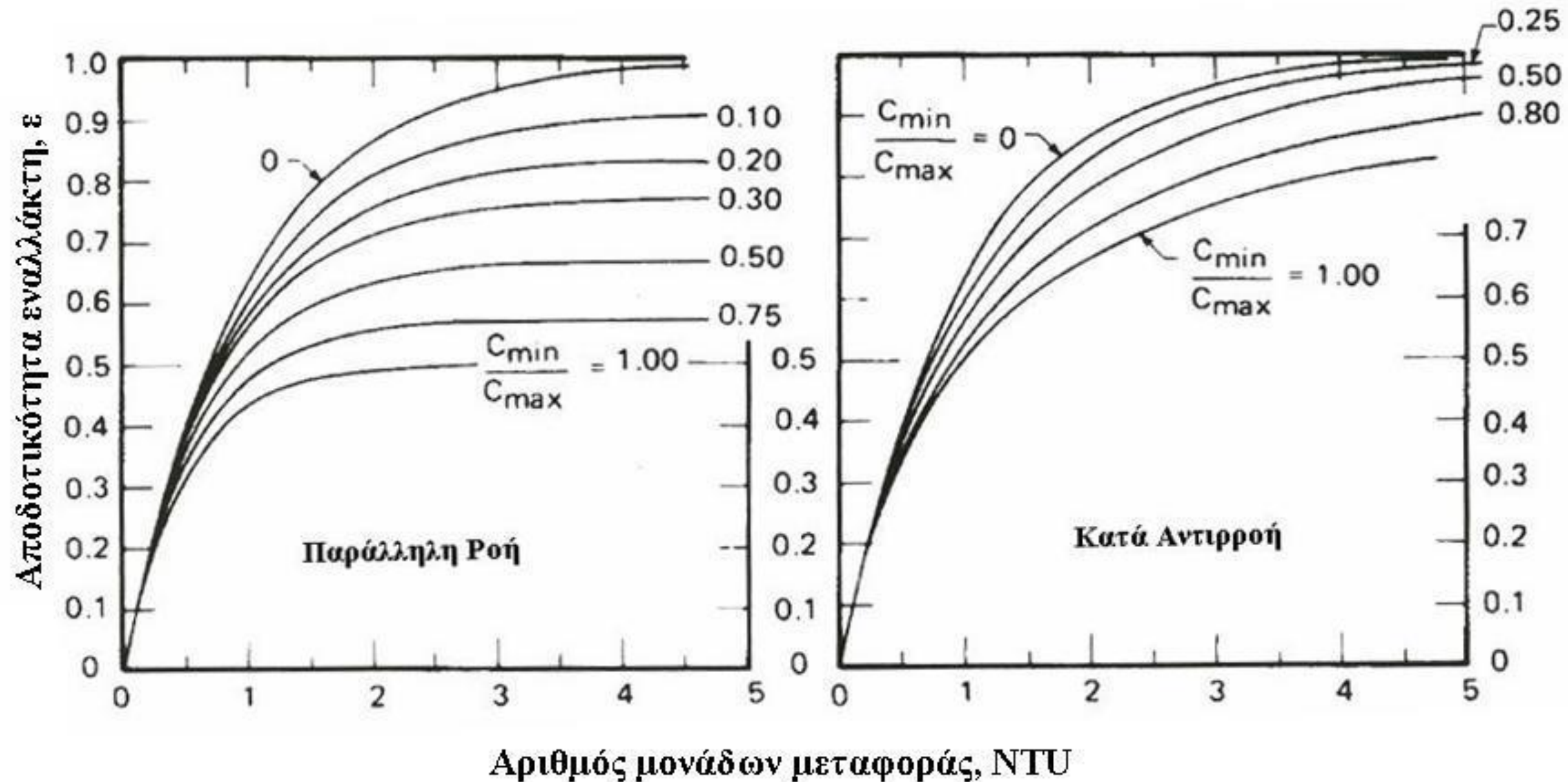
Για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας ( $\varepsilon$ ), μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξισώσεις ή γραφήματα.

# Επίλυση εναλλακτών

## Απλοί εναλλάκτες διπλού σωλήνα

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \dot{q}_{\max} = \varepsilon \cdot C_{\min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in})$$

$$NTU = U \cdot A / C_{\min}$$



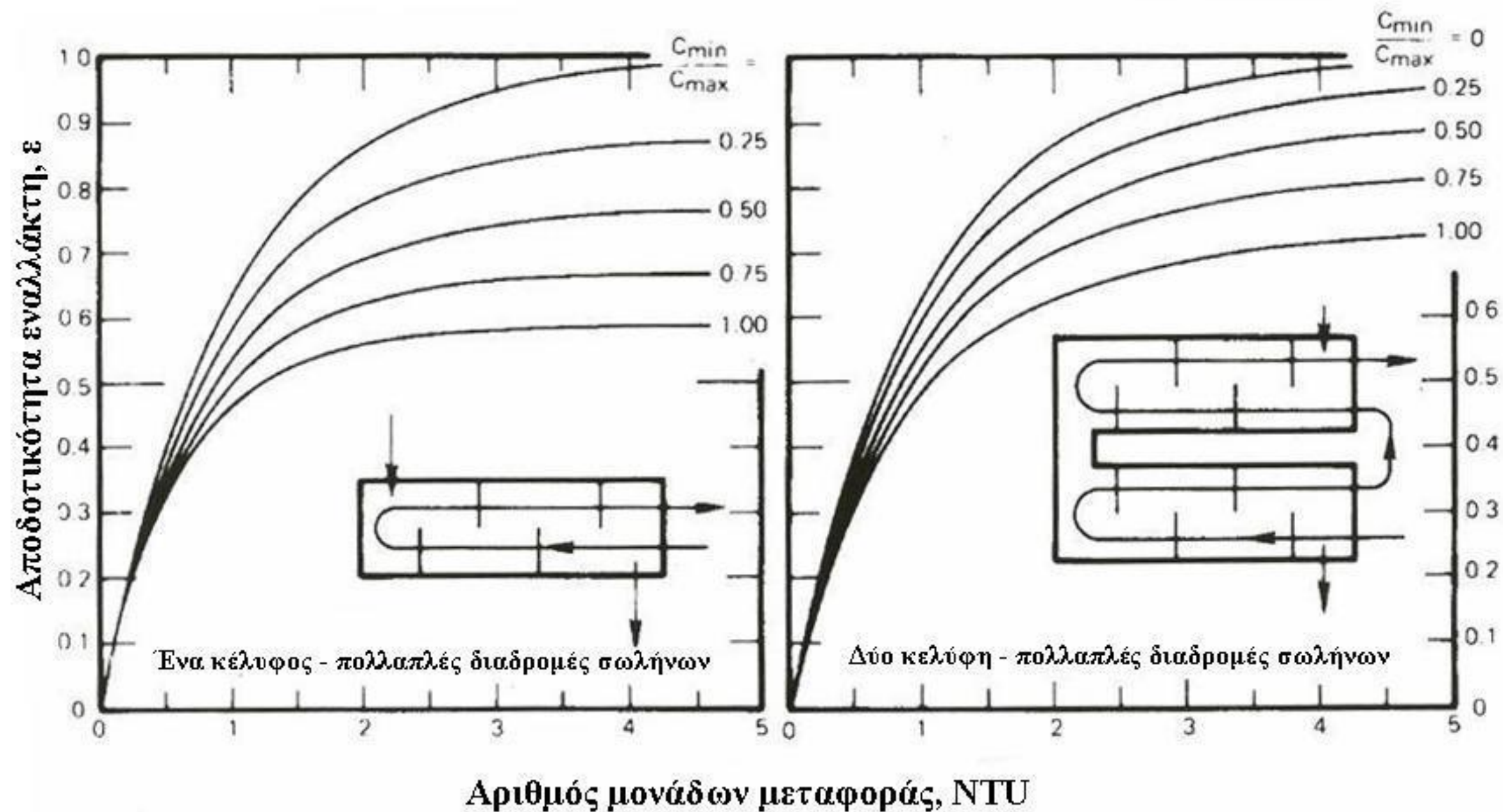
Σχήμα 8.12. Αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας για εναλλάκτες θερμότητας α) παράλληλης ροής και β) κατά αντιρροή

# Επίλυση εναλλακτών

## Εναλλάκτες κελύφους - σωλήνων

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \dot{q}_{\max} = \varepsilon \cdot C_{\min} \cdot (T_{h,in} - T_{c,in})$$

$$NTU = U \cdot A / C_{\min}$$



Σχήμα 8.13. Αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας για εναλλάκτες θερμότητας α) με κέλυφος και πολλαπλές διαδρομές σωλήνων και β) δύο κελύφη και πολλαπλές διαδρομές σωλήνων

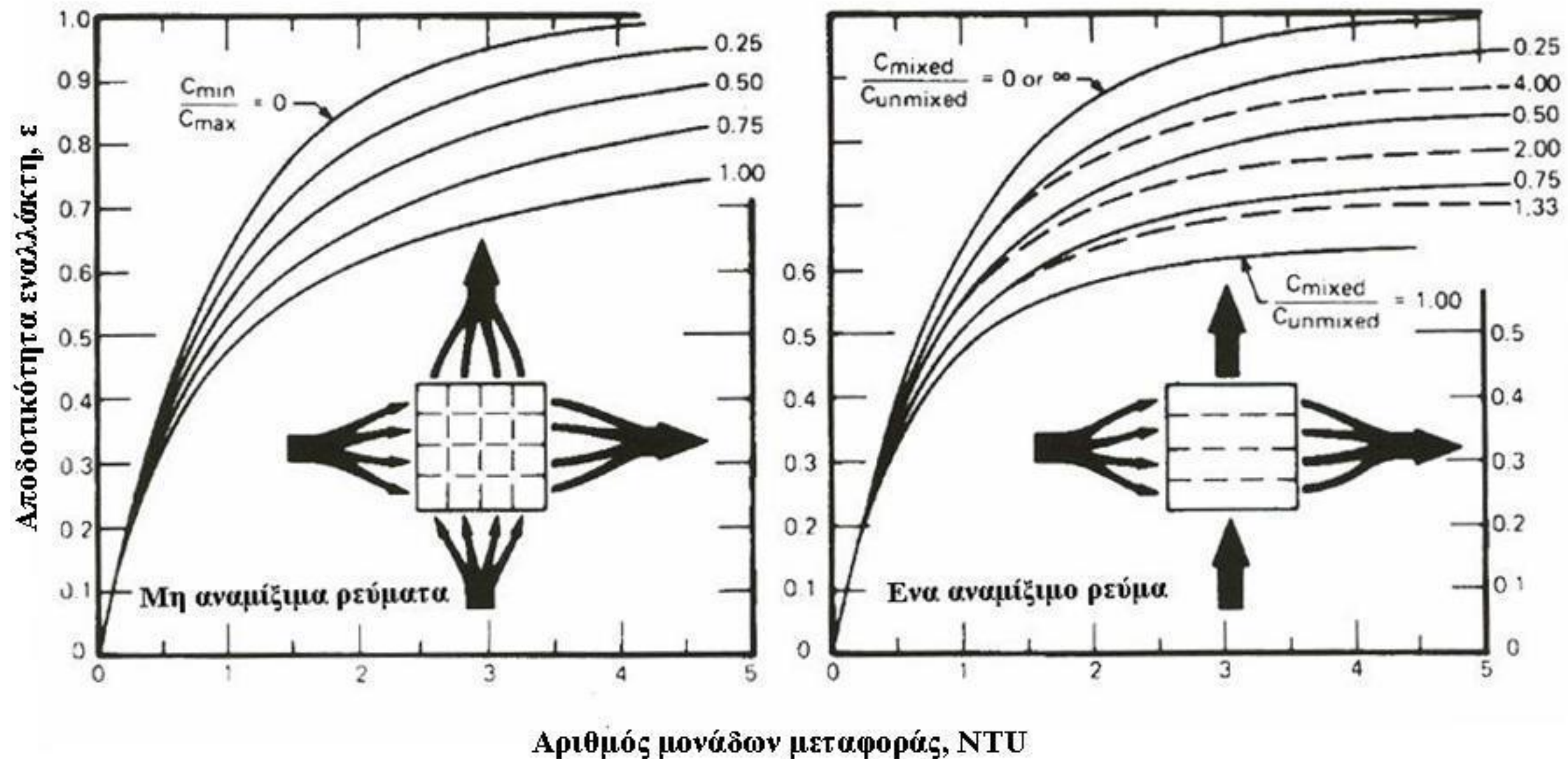


# Επίλυση εναλλακτών

## Εναλλάκτες κελύφους - σωλήνων

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \dot{q}_{\max} = \varepsilon \cdot C_{\min} \cdot (T_{h.in} - T_{c.in})$$

$$NTU = U \cdot A / C_{\min}$$



Σχήμα 8.14. Αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας για εναλλάκτες θερμότητας εγκάρσιας ροής και τα δύο υγρά μη αναμίξιμα και β) με το ένα υγρό αναμίξιμο και το άλλο μη αναμίξιμο

# Επίλυση εναλλακτών

## Διαστασιολόγηση με μέθοδο NTU

$$C = \dot{m}C_p$$

$$C_H = \dot{m}_H c_{pH}$$

$$C_C = \dot{m}_C c_{pC}$$

Heat capacities rates (ρυθμοί θερμοχωρητικότητας)

Heat capacities rates λόγος ρυθμών θερμοχωρητικότητας

$$C^* = C_{\min}/C_{\max}$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{\max}} = \frac{\text{Πραγματικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας}}{\text{Μέγιστος ρυθμός μεταφοράς θερμότητας}}$$

Αποδοτικότητα εναλλάκτη

$$\dot{q} = C_c (T_{c,\text{out}} - T_{c,\text{in}}) = C_h (T_{h,\text{in}} - T_{h,\text{out}}) \quad \text{NTU} = U \cdot A / C_{\min}$$

$$\dot{q}_{\max} = C_{\min} \cdot (T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})$$

Ο max ρυθμός μεταφοράς q που μπορεί να επιτευχθεί (περιοριστικός παράγοντας  $C_{\min}$ )

# Επίλυση εναλλακτών

## Διαστασιολόγηση με μέθοδο NTU

Type of Heat Exchanger	Effectiveness Relation
Double pipe Concurrent flow	$\epsilon_E = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C^*)]}{1 + C^*}$
Double pipe Countercurrent flow	$\epsilon_E = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C^*)]}{1 - C^* \exp[-NTU(1 - C^*)]}$
Shell and tube: One-shell pass 2, 4, 6... tube passes	$\epsilon_E = \frac{2}{1 + C^* + \sqrt{1 + C^{*2}}} \frac{1 + \exp\left[-NTU\sqrt{1 + C^{*2}}\right]}{1 - \exp\left[-NTU\sqrt{1 + C^{*2}}\right]}$
Plate heat exchanger	$\epsilon_E = \frac{\exp[(1 - C^*) \times NTU] - 1}{\exp[(1 - C^*) \times NTU] - C^*}$
All heat exchangers, $C^* = 0$	$\epsilon_E = 1 - \exp(-NTU)$

# Επίλυση εναλλακτών

## Διαστασιολόγηση με μέθοδο NTU

Type of Heat Exchanger	NTU Relation
Double pipe Concurrent flow	$NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon_E(1 + C^*)]}{1 + C^*}$
Double pipe Countercurrent flow	$NTU = \frac{1}{1 - C^*} \ln \left[ \frac{1 - C^* \varepsilon_E}{1 - \varepsilon_E} \right] \quad (C^* < 1)$ $NTU = \frac{\varepsilon_E}{1 - \varepsilon_E} \quad (C^* = 1)$
Shell and tube: One-shell pass 2, 4, 6... tube passes	$NTU = \frac{1}{\sqrt{1 + C^{*2}}} \ln \frac{2 - \varepsilon_E [1 + C^* - \sqrt{1 + C^{*2}}]}{2 - \varepsilon_E [1 + C^* + \sqrt{1 + C^{*2}}]}$
Plate heat exchanger	$NTU = \frac{\ln \left[ \frac{(1 - C^*)}{(1 - \varepsilon_E)} \right]}{(1 - C^*)}$
All heat exchangers, $C^* = 0$	$NTU = -\ln(1 - \varepsilon_E)$



# Επίλυση εναλλακτών

## Σύγκριση μεθόδων επίλυσης

Η μέθοδος της μέσης λογαριθμικής διαφοράς είναι η καταλληλότερη μέθοδος όταν:

- έχουμε προσδιορίσει το είδος και τα χαρακτηριστικά του ψυχρού και θερμού ρευστού όπως ροές, ειδικές θερμότητες και θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου.
- θέλουμε να διαστασιολογήσουμε τον εναλλάκτη δηλαδή να υπολογίσουμε την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας,  $A$ .

Η μέθοδος αποδοτικότητας του εναλλάκτη εφαρμόζεται όταν:

- έχουμε ένα δεδομένο εναλλάκτη, γνωρίζουμε δηλαδή τον τύπο του εναλλάκτη και το εμβαδόν της επιφάνειας εναλλαγής,  $A$
- θέλουμε να υπολογίσουμε την αποτελεσματικότητα της θέρμανσης-ψύξης δεδομένων ρευστών, δηλ. να προσδιορίσουμε τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των ρευστών, που επιτυγχάνονται με τον συγκεκριμένο εναλλάκτη.

# Επίλυση εναλλακτών

## Σύγκριση μεθόδων επίλυσης

Η διαμόρφωση και το αναγκαίο μέγεθος ενός εναλλάκτη θερμότητας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ο υπολογισμός είναι πολύ περίπλοκος και στις μέρες μας συνήθως γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι:

- ✓ Ο ρυθμός ροής του προϊόντος
- ✓ Οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών
- ✓ Το θερμοκρασιακό πρόγραμμα
- ✓ Η επιτρεπόμενη πτώση πίεσης
- ✓ Ο σχεδιασμός εναλλαγής θερμότητας
- ✓ Η απαίτηση για δυνατότητα επί τόπου καθαρισμού
- ✓ Ο απαιτούμενος χρόνος συνεχούς ροής

## Βιβλιογραφία σχημάτων

Σχήμα 8.1. Διαφορετικές καταστάσεις ροής και σχετικές θερμοκρασιακές κατανομές σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα., Cengel Y.A.: Μεταφορά Θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

Σχήμα 8.2. Η σχηματική απεικόνιση ενός εναλλάκτη θερμότητας δέσμης σωλήνων με διαφράγματα [μίας διαδρομής διαφράγματος (κελύφους και μίας διαδρομής σωλήνα (αυλού)]., Cengel Y.A.: Μεταφορά Θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

Σχήμα 8.3. Διάταξη ροής δύο διαδρομών στις σωληνώσεις και μίας διαδρομής στην κυψέλη., Cengel Y.A.: Μεταφορά Θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

Σχήμα 8.4. Διάταξη ροής τεσσάρων διαδρομών στις σωληνώσεις και δύο διαδρομών στην κυψέλη., Cengel Y.A.: Μεταφορά Θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

Σχήμα 8.5. Αναμίξιμη εγκάρσια ροή., Cengel Y.A.: Μεταφορά Θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

Σχήμα 8.6. Μη αναμίξιμη εγκάρσια ροή., Cengel Y.A.: Μεταφορά Θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

Σχήμα 8.7. Δίκτυο θερμικής αντίστασης με μεταφορά θερμότητας σε εναλλάκτη θερμότητας διπλού σωλήνα., Cengel Y.A.: Μεταφορά Θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

Σχήμα 8.8. Εναλλάκτες θερμότητας παράλληλη ροής., Cengel Y.A.: Μεταφορά Θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

## Βιβλιογραφία σχημάτων

Σχήμα 8.9. Εναλλάκτες θερμότητας αντιρροής., Cengel Y.A.: Μεταφορά Θερμότητας Μια Πρακτική Προσέγγιση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.

Σχήμα 8.10. Διάγραμμα Συντελεστή διόρθωσης  $F$  για: α) Μία διαδρομή κελύφους και 2, 4 ή 6 διαδρομές σωλήνων, β) Δύο διαδρομές κελύφους και 4, 8 ή 12 διαδρομές σωλήνων., Πάνιας Δημήτριος, Εναλλάκτες θερμότητας και Μεταφορά μάζας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.

Σχήμα 8.11. α) Εγκάρσια ροή με μη αναμίξιμα ρευστά, β) Εγκάρσια ροή με ένα αναμίξιμο ρεύμα., Πάνιας Δημήτριος, Εναλλάκτες θερμότητας και Μεταφορά μάζας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.

Σχήμα 8.12. Αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας για εναλλάκτες θερμότητας α) παράλληλης ροής και β) κατά αντιρροή., Πάνιας Δημήτριος, Εναλλάκτες θερμότητας και Μεταφορά μάζας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.

Σχήμα 8.13. Αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας για εναλλάκτες θερμότητας α) με κέλυφος και πολλαπλές διαδρομές σωλήνων και β) δύο κελύφη και πολλαπλές διαδρομές σωλήνων., Πάνιας Δημήτριος, Εναλλάκτες θερμότητας και Μεταφορά μάζας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005

Σχήμα 8.14. Αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας για εναλλάκτες θερμότητας εγκάρσιας ροής και τα δύο υγρά μη αναμίξιμα και β) με το ένα υγρό αναμίξιμο και το άλλο μη αναμίξιμο., Πάνιας Δημήτριος, Εναλλάκτες θερμότητας και Μεταφορά μάζας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005.