

# ΘΕΡΜΟΝΩΤΙΚΗ ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΚΤΗΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Μέρος 2<sup>ο</sup> – Μετάδοση θερμότητας

Αλέξανδρος Κρίθαρης

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Προσωρινός Ενεργειακός Επιθεωρητής

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - Εισαγωγή, Μετάδοση με αγωγή

## 2.1. Εισαγωγή

**Σημασία :** Οι αρχές μετάδοσης της θερμότητας έχουν μεγάλη εφαρμογή στις κτηριακές εγκαταστάσεις γιατί η χρήση τους **ποσοτικοποιεί** τις ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη.

### Τρόποι μετάδοσης θερμότητας:

- Με αγωγή (Αγωγιμότητα)
- Με συναγωγή
- Με ακτινοβολία
- Με συνδυασμό μερικών ή όλων των ανωτέρω

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας

### 2.2.1 Με αγωγή

**Ορισμός :** Η μετάδοση θερμότητας που πραγματοποιείται μεταξύ στερεών σωμάτων (με άμεση επαφή μεταξύ των τμημάτων του ή μεταξύ δύο στερεών σωμάτων), μέσω της διάχυσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή των ατόμων ή των μορίων από το ένα προς το άλλο τμήμα μάζας.

Συμβαίνει πάντα από μια μάζα υψηλότερης θερμοκρασίας προς μια μάζα χαμηλότερης θερμοκρασίας.

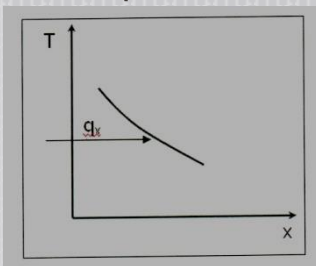
Μαθηματική διατύπωση :

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$

Σχέση Fourier όπου :

|                   |   |
|-------------------|---|
| [W]               | η ροή θερμότητας (W)  |
| [m <sup>2</sup> ] | επιφάνεια κάθετη προς τη μεταφερομένη θερμότητα (m <sup>2</sup> ) |
| [W/(mK)]          | συντελεστής αναλογίας (W/(mK))                                    |
| [K/m]             | διαφορική μεταβολή θερμοκρασίας και μήκους (K/m)                  |

Γραφική διατύπωση :



Διεύθυνση ροής θερμότητας για μετάδοση με αγωγή.

Η ροή θερμότητας είναι ανάλογη με τη **διαφορά θερμοκρασίας** μεταξύ δύο σημείων ενός υλικού, την **απόσταση** των δύο σημείων, την **επιφάνεια** του υλικού που βρίσκεται κάθετα προς τη διεύθυνση της ροής θερμότητας αλλά και το **χρόνο**. (Η σχέση αναφέρεται στην μονάδα του χρόνου).

Η ισότητα επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συντελεστή αναλογίας, **λ**, ο οποίος καλείται **συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας** και αποτελεί μια φυσική ιδιότητα του υλικού και χαρακτηρίζει την ικανότητα της μεταφοράς θερμότητας διά μέσου της μάζας του υλικού.

Το αρνητικό πρόσημο στη σχέση υποδηλώνει ότι η ροή θερμότητας είναι θετική όταν η θερμοκρασία μειώνεται και η μονάδα μήκους αυξάνεται. (βλπ. σχήμα)

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

- Μετάδοση με αγωγή (Θερμική ροή)

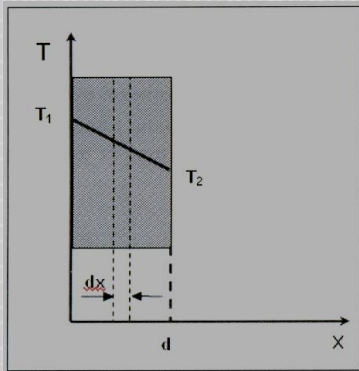
## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας 2.2.1 Με αγωγή

### 2.2.1. Αγωγή Θερμότητας σε ομογενή υλικά

Παραδοχές : Σταθερός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Σταθερές θερμοκρασίες στις οριακές επιφάνειες του δομικού στοιχείου αναφοράς

#### Μονο-στρωματικό υλικό :



Μεταφορά θερμότητας σε ομογενές μονο-στρωματικό (επίπεδο) υλικό.

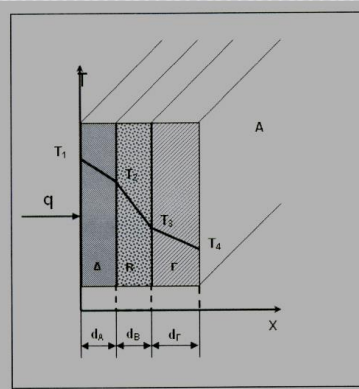
$$q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \Rightarrow q = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{d}$$

όπου :  $d$  [m] Το πάχος του υλικού.  
 $T_1, T_2$  [K] Θερμοκρασίες επιφανείας υλικού.

Όταν η επιφάνεια δεν είναι γνωστή χρησιμοποιείται η **πυκνότητα ροής**.

$$\dot{q} = \frac{q}{A} \quad \text{Σε } W/m^2 \text{ ή } kcal/(m^2 \cdot h)$$

#### Πολυ-στρωματικό υλικό :



Μεταφορά θερμότητας σε ομογενές πολυ-στρωματικό (επίπεδο) υλικό.

$$q = \lambda_A A \frac{T_1 - T_2}{\Delta X_A} = \lambda_A A \frac{T_1 - T_2}{d_A}$$

$$q = \lambda_B A \frac{T_2 - T_3}{\Delta X_B} = \lambda_B A \frac{T_2 - T_3}{d_B}$$

$$q = \lambda_\Gamma A \frac{T_3 - T_4}{\Delta X_\Gamma} = \lambda_\Gamma A \frac{T_3 - T_4}{d_\Gamma}$$

$$q = \frac{T_1 - T_4}{d_A / \lambda_A A + d_B / \lambda_B A + d_\Gamma / \lambda_\Gamma A}$$

Σε  $W/m^2$  ή  $kcal/(m^2 \cdot h)$

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - Μετάδοση με αγωγή (Θερμική Αντίσταση)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας 2.2.1 Με αγωγή

### 2.2.1.2. Θερμική αντίσταση δομικού στοιχείου (σε ομογενή υλικά)

#### ❖ Θερμική αντίσταση - ορισμός :

$$R = \frac{d}{\lambda A} \quad \text{Σε K/W}$$

Η θερμική αντίσταση εξαρτάται από :

$d$  το πάχος του υλικού δομικού στοιχείου και  
 $\lambda$  τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας

#### ❖ Θερμική ροή σε πολύ-στρωματικά υλικά :

$$q = \frac{T_1 - T_4}{d_A/\lambda_A A + d_B/\lambda_B A + d_\Gamma/\lambda_\Gamma A} = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_\Gamma} = \frac{\Delta T}{R_{\text{ολ}}}$$

Σε (m<sup>2</sup>K)/W

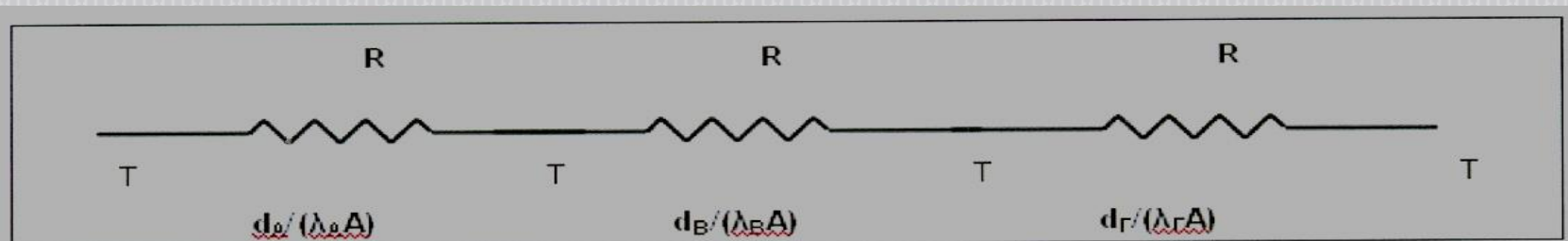
Ο αριθμητής εκφράζει το **θερμικό δυναμικό** ή την κινητήρια δύναμη της ροής θερμότητας  
Ο παρανομαστής, την **αντίσταση** σε αυτή τη ροή.

Έτσι, η σχέση γίνεται:

Ροή θερμότητας = διαφορά θερμικού δυναμικού / θερμική αντίσταση

όπου  $R_{\text{ολ}}$  είναι η συνολική θερμική αντίσταση όλων των επιμέρους υλικών του στοιχείου.  
Το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα του σύνθετου επίπεδου στοιχείου φαίνεται στο σχήμα

Η προηγούμενη σχέση μοιάζει κατά πολύ με αυτήν που εκφράζει ο νόμος του Ohm για τα ηλεκτρικά κυκλώματα.



Ηλεκτρικό ανάλογο

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

- Μετάδοση με αγωγή (Συντελ. Θερμικής αγωγιμότητας)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας 2.2.1 Με αγωγή

### 2.2.1.3. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ )

❖ **Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (ή ειδική θερμική αγωγιμότητα) - ορισμός :**

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bT)$$

Σε  $W/(m \cdot K)$  ή  $kcal/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$

$\lambda_0$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στους  $0^\circ C$

$b$  η σταθερά που έχει προσδιορισθεί για το συγκεκριμένο σώμα.

$T$  η μέση τιμή της ερμοκρασίας στα άκρα των επιφανειών του σώματος

Η ποσότητα **θερμικής ροής** η οποία διαπερνά σε **1 ώρα** ένα σώμα επιφάνειας **1 m<sup>2</sup>** και πάχους **1 m**, το οποίο έχει **σταθερή** διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών της κάθετα στην διεύθυνση της ροής θερμότητας της τάξεως του **1 K**. (Μονοδιάστατη ροή)

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι μια σημαντική φυσική ιδιότητα του σώματος και η τιμή του αποτελεί σημαντικό κριτήριο της καταλληλότητας του για μια συγκεκριμένη χρήση.

Το  $\lambda$  εξαρτάται από την εσωτερική δομή του σώματος (δομικού στοιχείου), τη θερμοκρασία, την πυκνότητα, την υγρασία και την πίεση.

Για τα περισσότερα σώματα ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία με την γραμμική σχέση της παράπλευρης εξίσωσης

**Ιδιότητες του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας :**

**Γενικά αναλόγως της Φάσης του σώματος :**

\* **Αέρια σώματα** Εύρος τιμών (0,006 – 0,58)  $W/(m \cdot K)$

**Αύξηση** με την **άνοδο** της θερμοκρασίας.

\* **Υγρά σώματα** Εύρος τιμών (0,09 – 0,70)  $W/(m \cdot K)$

**Μείωση** με την **άνοδο** της θερμοκρασίας.

(ΔΕΝ ισχύει για το νερό και την γλυκερίνη όπου παρατηρούνται διακυμάνσεις)

\* **Στερεά σώματα** **για τα συνήθη δομικά υλικά**

Εύρος τιμών (0,023 – 3,50)  $W/(m \cdot K)$

**Αύξηση** με την **άνοδο** της θερμοκρασίας.

Τα δομικά υλικά με μεγάλο βάρος διαθέτουν υψηλή τιμή  $\lambda$ .

Επηρεάζεται από το **πορώδες** και την **υγρασία**.

**για τα μέταλλα**

Εύρος τιμών (2,30 – 400,00)  $W/(m \cdot K)$

**Μείωση** με την **άνοδο** της θερμοκρασίας.

Η θερμική αγωγιμότητα είναι ανάλογη της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (καθώς οφείλεται κυρίως σε διάχυση ελευθέρων ηλεκτρονίων).

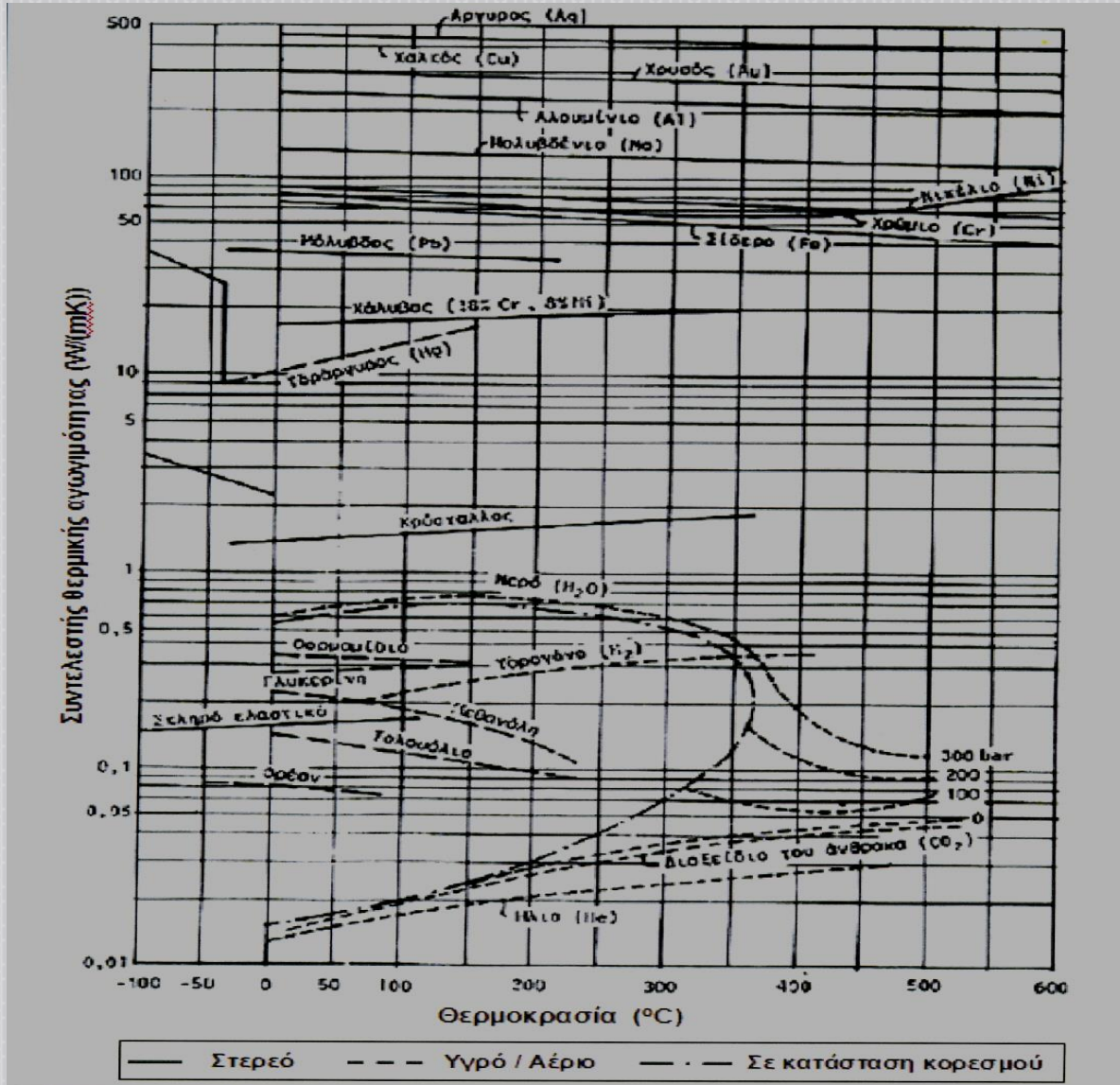
Τα καθαρότερα μέταλλα έχουν υψηλότερη τιμή  $\lambda$ .

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

- Μετάδοση με αγωγή (Διακύμανση τιμών  $\lambda$ )

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας 2.2.1 Με αγωγή

### 2.2.1.3. Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ ) - συνέχεια



### Διακύμανση τιμών συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας

Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για ένα μεγάλο εύρος δομικών υλικών για κτηριακές κυρίως κατασκευές και εφαρμογές παρατίθενται στον πίνακα 2 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/201 «Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων».

Σημειώνεται πάντως ότι, τόσο ο μελετητής όσο και ο ενεργειακός επιθεωρητής οφείλει να λαμβάνει υπόψη στους υπολογισμούς του τις δεδηλωμένες από τον παραγωγό τιμές του  $\lambda$  για το εκάστοτε δομικό προϊόν (από έγκυρο πιστοποιητικό ή αναγραφόμενη τιμή στη σήμανση του υλικού κατά CE).

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - Μετάδοση με συναγωγή (Ορισμός, τύποι)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας

### 2.2.2 Με συναγωγή

**Ορισμός :** Η μετάδοση θερμότητας που συμβαίνει όταν υπάρχει μακροσκοπική κίνηση και των μορίων του ιδίου του ρευστού.

**Προϋπόθεση :** Η ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο μαζών.

**Παράγοντες που επηρεάζουν την μετάδοση της θερμότητας με συναγωγή :**  
Οι συνθήκες της ροής, και τα αίτια που την προκάλεσαν,  
το είδος, οι φυσικές ιδιότητες του ρευστού,  
Το μέγεθος και το σχήμα της επιφανείας απ' όπου μεταδίδεται η θερμότητα.

**Τύποι μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή (αναλόγως του αιτίου που την προκαλεί):**

#### Μετάδοση θερμότητας με **φυσική** (ελεύθερη) συναγωγή.

Η **κίνηση** οφείλεται αποκλειστικά στην **διαφορά πυκνότητας** μεταξύ θερμών και ψυχρών σωματιδίων του ρευστού και της **βαρύτητάς** τους

Η **ένταση** της μετάδοσης θερμότητας καθορίζεται πλήρως από τις θερμικές συνθήκες της εκάστοτε διαδικασίας και εξαρτάται από το **είδος** του ρευστού, το εύρος της **διαφοράς** θερμοκρασίας και τον **όγκο** του χώρου όπου συμβαίνει η διαδικασία.

#### Μετάδοση θερμότητας με **εξαναγκασμένη** συναγωγή.

Στην εξαναγκασμένη συναγωγή κάποιο εξωτερικό αίτιο προκαλεί τη μετάδοση θερμότητας με την κίνηση του ρευστού, όπως ένας ανεμιστήρας, μια αντλία, κ. τ. λ.

Οι συνθήκες εξαναγκασμένης συναγωγής εξαρτώνται από το **είδος** και τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού, την **ταχύτητα** της ροής και τη **θερμοκρασία** του καθώς και το μέγεθος και **σχήμα του χώρου/σώματος** στην επιφάνεια του οποίου λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας.

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

- Μετάδοση με συναγωγή (Ορισμός & Συντελ. Ηc)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας

### 2.2.2 Με συναγωγή

#### 2.2.2.1. Μαθηματική διατύπωση – Εξίσωση συναγωγής

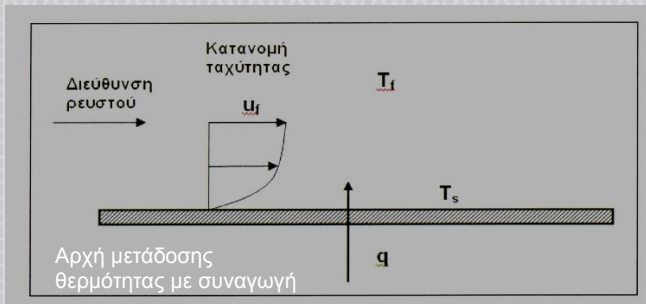
$$q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_f)$$

Νόμος Newton  
(για την ψύξη)

όπου :

|       |                        |                                      |
|-------|------------------------|--------------------------------------|
| $q$   | [W]                    | η ροή θερμότητας                     |
| $h_c$ | [W/(m <sup>2</sup> K)] | ο συντελεστής συναγωγής              |
| $A$   | [m <sup>2</sup> ]      | η επιφάνεια μετάδοσης της θερμότητας |
| $T_s$ | [K]                    | η θερμοκρασία επιφανείας             |
| $T_f$ | [K]                    | η θερμοκρασία του ρευστού            |

Γραφική διατύπωση :



Η σχέση υποδεικνύει ότι η **ροή θερμότητας** από το σώμα στο ρευστό ή και αντίστροφα, είναι **ανάλογη** με τη **διαφορά θερμοκρασίας** των δύο σωμάτων και την **επιφάνεια** εναλλαγής θερμότητας.

Η ισότητα επιτυγχάνεται με τη χρήση του **συντελεστή συναγωγής**,  $h_c$ , ο οποίος ουσιαστικά καθορίζει την **ένταση** της μετάδοσης θερμότητας.

#### 2.2.2.2. Συντελεστής συναγωγής ( $h_c$ ) ή ειδική συναγωγιμότητα

Καθορίζει το μέγεθος της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και δίδεται σε W/(m<sup>2</sup>. K) ή kcal / (m<sup>2</sup> \* h \* °C).

Ο προσδιορισμός του είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθότι εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η **ταχύτητα** του ρευστού, οι **συνθήκες της ροής**, οι διαστάσεις και το **είδος της επιφάνειας επαφής**, το είδος και οι **φυσικές ιδιότητες του ρευστού** (π.χ. ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, η πυκνότητα, το δυναμικό ιξώδες, η ειδική θερμοχωρητικότητα Κ.ά.).

Συνήθως στη βιβλιογραφία συναντώνται τιμές του συντελεστή συναγωγής για **συγκεκριμένες** συνθήκες μετάδοσης θερμότητας και **συγκεκριμένης** γεωμετρίας υλικών.

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

- Μετάδοση με συναγωγή (Ορισμός & Συντελ. Ηc)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας

### 2.2.2 Με συναγωγή

#### 2.2.2.1. Συντελεστής συναγωγής ( $h_c$ ) - Προσεγγιστικές τιμές

| Κατάσταση   | Συντελεστής συναγωγής, $h_c$<br>$W/(m^2 \cdot K)$ |
|---|---|
| <b>Συνθήκες φυσικής συναγωγής</b>                                 |   |
| Κατακόρυφη επιφάνεια ύψους 0,25 m με $\Delta T=25$ °c και αέρας   | 5   |
| Κατακόρυφη επιφάνεια ύψους 0,3 m με $\Delta T=30$ °c και αέρας    | 4,5   |
| Οριζόντιος κύλινδρος διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=25$ °c και αέρας | 8   |
| Οριζόντιος κύλινδρος διαμέτρου 5 cm με $\Delta T=30$ °c και αέρας | 6,5   |
| Οριζόντιος κύλινδρος διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=25$ °c και νερό  | 741   |
| Οριζόντιος κύλινδρος διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=30$ °c και νερό  | 890   |
| Σφαίρα διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=25$ °c και αέρας               | 9   |
| Σφαίρα διαμέτρου 2 cm με $\Delta T=25$ °c και νερό                | 606   |
| <b>Συνθήκες εξαναγκασμένης συναγωγής</b>                          |   |
| Αέρας με ταχύτητα 2 m/s πόνω σε επιφάνεια 0,2 m <sup>2</sup>      | 12  |
| Αέρας με ταχύτητα 35 m/s πόνω σε επιφάνεια 0,75 m <sup>2</sup>    | 75  |
| Αέρας με ταχύτητα 5 m/s κάθετα σε κυλινδρικό σώμα διαμέτρου 1 cm  | 85  |
| Νερό παροχής 0,5 kg/s κινούμενο μέσα σωλήνα διαμέτρου 2,5 cm      | 3500  |
| Αέρας κάθετα σε κύλινδρο διαμέτρου 5 cm με ταχύτητα 50 m/s        | 180   |
| Νερό σε συνθήκες βρασμού  |   |
| Σε δεξαμενή ή σε πισίνα   | 2500 - 35000                                      |
| Σε ροή μέσα σε σωλήνα   | 5000 - 100000                                     |
| Συμπύκνωση υδρατμού σε πίεση 1 atm                                |   |
| Σε κατακόρυφες επιφάνειες   | 4000 - 11300                                      |
| Στην εξωτερική πλευρά οριζόντιων αγωγών                           | 9500 - 25000                                      |

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

- Μετάδοση με ακτινοβολία (Ορισμός, Μέλαν σώμα)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας

### 2.2.1 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

Ορισμός : Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ σωμάτων η οποία συμβαίνει μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Οποιοδήποτε αντικείμενο με θερμοκρασία μεγαλύτερη του απολύτου 0 °K (= -273 °C) εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία αυτή οφείλεται στην **εσωτερική ενέργεια** του υλικού η οποία, σε κατάσταση ισορροπίας, είναι **ανάλογη** με τη **θερμοκρασία** του υλικού (θερμική ακτινοβολία).

Το δε μεγαλύτερο μέρος της θερμικής ακτινοβολίας εκπέμπεται σε περιορισμένο πεδίο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ανάμεσα στα **0,1 μm και 100 μm**.

#### 2.2.2.1. Μέλαν σώμα

Ορισμός : **Μέλαν σώμα**. Ως μέλαν (μαύρο) σώμα ορίζεται ένα ιδανικό σώμα που **απορροφά ολόκληρη** την ποσότητα ακτινοβολίας που δέχεται **για όλα τα μήκη κύματος και για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης** της ακτινοβολίας.

Από τον ορισμό του, το μέλαν σώμα **εκπέμπει** και τη **μέγιστη ενέργεια** ακτινοβολίας **σε κάθε μήκος κύματος**.

Οι φυσικοί νόμοι περιγράφουν την εκπομπή του μαύρου σώματος

οπότε η εκπομπή των πραγματικών σωμάτων υπολογίζεται αντίστοιχα με την εκπομπή του μαύρου σώματος κάτω από **όμοιες συνθήκες** με τη χρήση ενός συντελεστή, του επονομαζόμενου **συντελεστή εκπομπής**.

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - Μετάδοση με ακτινοβολία (Νόμος Planck)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας 2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

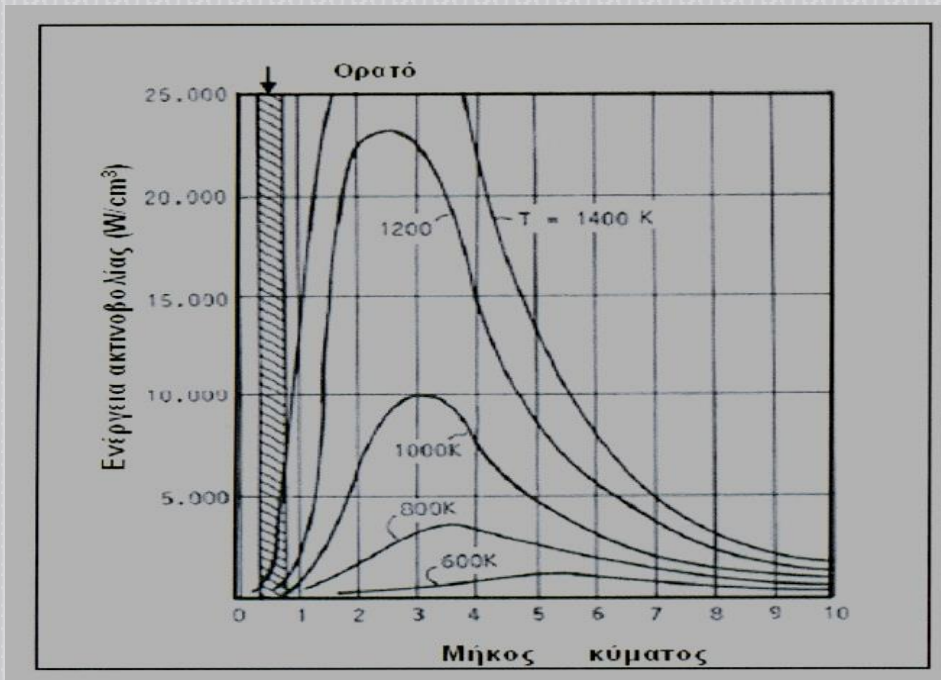
### 2.2.2.2. Νόμος του Planck

**Νόμος του Planck.** Ο νόμος του Planck εκφράζει τη **φασματική εκπομπή** του μαύρου σώματος  $E_{b\lambda}(T)$  σε  $W/(m^2\mu m)$ , σε **θερμοκρασία**  $T$  και ένα **μήκος κύματος**  $\lambda$  σύμφωνα με την ακόλουθη έκφραση:

$$E_{b\lambda}(T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}$$

όπου

|           |                             |   |
|-----------|-----------------------------|---|
| $\lambda$ | [ $\mu m$ ]                 | το μήκος κύματος,   |
| $T$       | [K]                         | η απόλυτη θερμοκρασία,                                      |
| $C_1$     | [ $W \cdot \mu m^4 / m^2$ ] | σταθερά ίση με $3,741 \cdot 10^8 W \cdot \mu m^4 / m^2$ και |
| $C_2$     | [ $\mu m K$ ]               | σταθερά ίση με $14388 \mu m K$ .                            |



### Γραφική διατύπωση

Βάσει του νόμου ο οποίος σχηματικά παριστάνεται παραπλεύρως, όταν το μήκος κύματος είναι μηδέν τότε δεν υπάρχει ενέργεια ακτινοβολίας.

Η ενέργεια αυτή αρχικά αυξάνεται συναρτήσει του μήκους κύματος έως μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται έως την τιμή μηδέν όταν το  $\lambda$  τείνει στο άπειρο.

Ενέργεια ακτινοβολίας μέλανος σώματος συναρτήσει του  $\lambda$  (σε  $\mu m$ )

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - Μετάδοση με ακτινοβολία (Νόμος Stefan Boltzman)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας 2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

### 2.2.2.3. Νόμος των Stefan-Boltzman

**Νόμος των Stefan - Boltzman.**

Ο νόμος αυτός εκφράζει τη συνολική ημισφαιρική (προς όλες τις κατευθύνσεις) **ισχύ εκπομπής** ενός **μαύρου** σώματος (σε  $W/m^2$ ) σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_b = \sigma T^4$$

όπου  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2K^4)$  είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann και η θερμοκρασία εκφράζεται σε K.

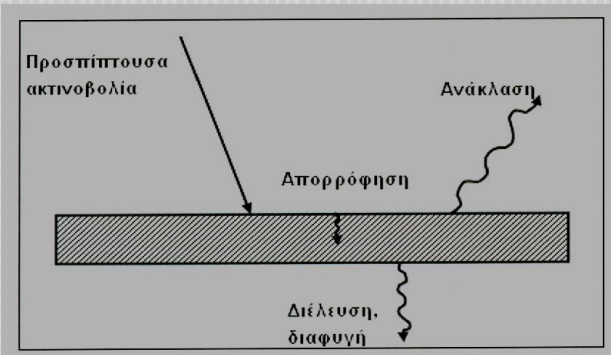
Η συνολική ημισφαιρική **ισχύς εκπομπής** ενός **πραγματικού** σώματος υπολογίζεται από το νόμο αυτό, λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό **συντελεστή εκπομπής**,  $\epsilon$ , από τη σχέση:

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

Δεδομένου του γεγονότος ότι το **μαύρο σώμα** αποτελεί τον ιδανικό ακτινοβολητή ο οποίος σε μια **συγκεκριμένη θερμοκρασία** έχει τη **μέγιστη** ημισφαιρική ισχύ εκπομπής ( $\epsilon=1$ ), συμπεραίνεται ότι ο συνολικός συντελεστής εκπομπής,  $\epsilon$  ενός πραγματικού σώματος είναι πάντα χαμηλότερος της μονάδας.

### 2.2.2.4. Ανακλαστικότητα, απορροφητικότητα, διαπερατότητα ακτινοβολουμένης θερμότητας

Όταν ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα σώμα, ένα ποσοστό της απορροφάται, ένα ποσοστό αντανακλάται και ένα ποσοστό το διαπερνά (σχήμα). Τα ποσοστά της **απορροφούμενης**, **ανακλόμενης** και **διερχόμενης** ακτινοβολίας ονομάζονται αντίστοιχα **απορροφητικότητα** ( $\alpha$ ), **ανακλαστικότητα** ( $\rho$ ) και **διαπερατότητα** ( $\tau$ ).



Προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα σώμα

$$\alpha = \frac{\text{απορροφούμενη ακτινοβολία}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία}} \quad \rho = \frac{\text{ανακλόμενη ακτινοβολία}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία}} \quad \tau = \frac{\text{διαφεύγουσα ακτινοβολία}}{\text{προσπίπτουσα ακτινοβολία}}$$

Οι παράμετροι αυτές σχετίζονται μεταξύ τους με τη σχέση:  $\alpha + \rho + \tau = 1$

Οι τιμές αυτών των παραμέτρων είναι συνολικές ημισφαιρικές τιμές και χαρακτηρίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ ενός σώματος και της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας.

Σε ένα αδιαφανές σώμα είναι  $\tau = 0$ , οπότε η ανωτέρω σχέση γίνεται:  $\alpha + \rho = 1$ .

Όπως είναι φανερό, σε ένα μέλαν σώμα  $\rho = 0$ ,  $\tau = 0$ , άρα  $\alpha = 1$ .

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - Μετάδοση με ακτινοβολία (Νόμος Kirchoff, Φαίο σώμα)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας 2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

### 2.2.2.4. Νόμος του Kirchoff

#### Νόμος του Kirchoff.

Ο νόμος του Kirchoff περιγράφει τη σχέση ανάμεσα στις ιδιότητες εκπομπής και απορροφητικότητας ενός σώματος.

όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος,

$$\alpha_\lambda (T, \varphi, \theta) = \varepsilon_\lambda (T, \varphi, \theta)$$

$\varphi$  και  $\theta$  οι γωνιακές συντεταγμένες που ορίζουν τη διεύθυνση της διάδοσης και  $T$  η θερμοκρασία του σώματος.

Σύμφωνα με αυτό το νόμο, για κάθε μήκος κύματος και κάθε διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, η φασματική εκπομπή ενός σώματος είναι ίση με την φασματική απορροφητικότητά του

Αυτή η σχέση ισχύει και για ημισφαιρικές ιδιότητες, δηλαδή :

$$\alpha_\lambda (T) = \varepsilon_\lambda (T)$$

### 2.2.2.5. Γκρίζο (Φαίο) Σώμα

Ένα σώμα του οποίου ο **μονοχρωματικός συντελεστής εκπομπής**,  $\varepsilon_\lambda$ , είναι ανεξάρτητος από το μήκος κύματος καλείται γκρίζο σώμα.

Ως **μονοχρωματικός συντελεστής εκπομπής**  $\varepsilon_\lambda$  καλείται ο λόγος της μονοχρωματικής **ισχύος εκπομπής του σώματος** με την μονοχρωματική **ισχύ εκπομπής του μελανού σώματος** στο ίδιο μήκος κύματος και θερμοκρασία  $\varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{b\lambda}$

Ο **συνολικός συντελεστής εκπομπής**  $\varepsilon$  του σώματος συνδέεται με τον **μονοχρωματικό** συντελεστή εκπομπής μέσω της σχέσης :

Εάν ισχύει η συνθήκη του γκρίζου σώματος ( $\varepsilon_\lambda = \varepsilon$  σταθερό), τότε:  $\varepsilon = \varepsilon_\lambda$ .

Στους υπολογισμούς θεωρείται ότι τα σώματα συμπεριφέρονται ως γκρίζα.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda}$$

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - Μετάδοση με ακτινοβολία (Ηλ. απορροφ(τα, θερμ. εκπομπή)

## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας 2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

Στη φυσική των κτηρίων και τη μηχανική της ηλιακής ενέργειας είναι απαραίτητη η γνώση των οπτικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται για δύο κυρίως ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Η **ηλιακή απορρόφηση  $\alpha(T)$**  είναι απαραίτητη για τα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος ώστε να υπολογίζονται τα **ηλιακά κέρδη**.

Ο **συντελεστής εκπομπής  $\epsilon_T(T)$**  χρειάζεται για την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεγάλου μήκους κύματος για τον υπολογισμό των **θερμικών απωλειών**.

### 2.2.2.6. Ηλιακή απορροφητικότητα & Θερμική εκπεμψιμότητα

- **Ηλιακή απορροφητικότητα,  $\alpha(T)$ :**

$$\alpha(T) = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} a_{\lambda}(T) I_{\lambda} d\lambda}{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} I_{\lambda} d\lambda}$$

όπου  $T$  είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας απορρόφησης και  $I_{\lambda}$  η ηλιακή ακτινοβολία.

- **Συντελεστής θερμικής εκπομπής,  $\epsilon_T(T)$ :**

$$\epsilon_T(T) = \frac{\int_{1\mu\text{m}}^{100\mu\text{m}} \epsilon_{\lambda}(T) E_{b\lambda}(T) d\lambda}{\int_{1\mu\text{m}}^{100\mu\text{m}} E_{b\lambda}(T) d\lambda}$$

όπου  $T$  είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας εκπομπής και

$E_{b\lambda}(T)$  η φασματική ημισφαιρική ισχύς του μαύρου σώματος σε θερμοκρασία  $T$ , που δίδεται από το νόμο του Planck.

# 2. ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - Μετάδοση με ακτινοβολία (Ηλ.απορροφ(τα, θερμ. εκπομπή)

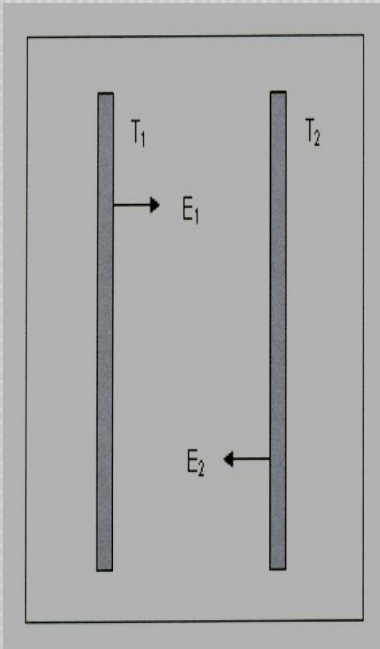
## 2.2. Τρόποι μετάδοσης της Θερμότητας 2.2.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

### 2.2.2.7. Ακτινοβολία μεταξύ δύο μαύρων παραλλήλων πλακών

Η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο σωμάτων διέπεται από δύο κύρια χαρακτηριστικά:

- \* Το πρώτο είναι ότι λόγω της ηλεκτρομαγνητικής φύσεως της θερμικής ακτινοβολίας, **η ανταλλαγή θερμότητας συμβαίνει ακόμη και χωρίς την παρουσία ενός φυσικού μέσου.**
- \* Το δεύτερο είναι ότι παρόλο που η αγωγιμότητα και η συναγωγή σταματούν όταν τα θερμοδυναμικά συστήματα, ανάμεσα στα οποία λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας, αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία, **η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία συμβαίνει ακόμα και μεταξύ όμοιων επιφανειών με την ίδια θερμοκρασία.**

Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η θερμική ισορροπία με ακτινοβολία είναι ένα **δυναμικό φαινόμενο.**



Η καθαρή συναλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο **μαύρων** παράλληλων πλακών απείρου μήκους υπολογίζεται σύμφωνα με το νόμο των Stefan-Boltzmann (βλπ.σχήμα ).

Η ισχύς εκπομπής της πλάκας σε θερμοκρασία  $T_1$  είναι:  $E_1 = \sigma T_1^4$

και η ισχύς εκπομπής της πλάκας σε θερμοκρασία  $T_2$  είναι:  $E_2 = \sigma T_2^4$

Εάν  $T_1 > T_2$ , τότε η **καθαρή ροή θερμότητας** με ακτινοβολία ισούται με:  $E_{1-2} = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$

Ο δείκτης της καθαρής ισχύος με ακτινοβολία υποδηλώνει τη διεύθυνση της ροής η οποία είναι από τη θερμότερη επιφάνεια προς την ψυχρότερη.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι από την επιφάνεια 1 προς την επιφάνεια 2.

Στην περίπτωση που οι πλάκες **δεν** είναι μαύρα σώματα αλλά **σώματα** με ημισφαιρικούς **συντελεστές εκπομπής**  $\epsilon_1$ , και  $\epsilon_2$  αντίστοιχα, τότε η καθαρή ροή ακτινοβολίας θα είναι:

$$E_{1-2} = \sigma(\epsilon_1 T_1^4 - \epsilon_2 T_2^4)$$

# ΘΕΡΜΟΝΩΤΙΚΗ ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΚΤΗΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Τέλος 2<sup>ου</sup> Μέρους - Μετάδοση θερμότητας

**Αλέξανδρος Κρίθαρης**

**Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.**

**Προσωρινός Ενεργειακός Επιθεωρητής**