

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η επιστήμη της **Θερμοδυναμικής** (*Thermodynamics*) συσχετίζεται με το ποσό της μεταφερόμενης ενέργειας (έργου ή θερμότητας) από ένα σύστημα προς ένα άλλο ή το περιβάλλον του, όταν αυτό υπόκειται σε μια διεργασία ανάμεσα σε δύο καταστάσεις ισορροπίας, χωρίς να παρέχει καμία πληροφορία για τη χρονική διάρκεια πραγματοποίησής της. Αντιθέτως, η επιστήμη της **Μετάδοσης Θερμότητας** (*Heat Transfer*) συσχετίζεται, κυρίως, με το ρυθμό της μεταφερόμενης ποσότητας της θερμικής ενέργειας (θερμότητας).

Σε αυτό το Κεφάλαιο, παρέχεται μια εισαγωγική περιγραφή των βασικών αρχών της Θερμοδυναμικής, που συσχετίζονται άμεσα με την επιστήμη της Μετάδοσης Θερμότητας και άλλων μορφών ενέργειας. Επιπλέον, παρουσιάζονται, συνοπτικά, οι τρεις κύριοι μηχανισμοί μεταφοράς Θερμότητας, όπως η **Αγωγιμότητα** (*Conduction*), η **Συναγωγιμότητα** (*Convection*) και η **Ακτινοβολία** (*Radiation*).

## 1.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

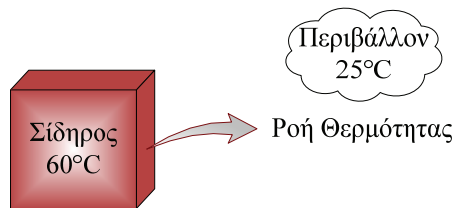
Η Θερμοδυναμική και η Μετάδοση Θερμότητας αναφέρονται, πολύ συχνά, ως **Θερμικές Επιστήμες** (*Thermal Sciences*), επειδή συσχετίζονται με την ευρεία έννοια της **Θερμότητας** (*Heat*), η οποία ορίζεται ως η μορφή της ενέργειας, που μπορεί να μεταφέρεται από ένα σύστημα σε ένα άλλο, ως αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής τους διαφοράς. Η επιστήμη που συσχετίζεται με τον προσδιορισμό του ρυθμού αυτής της μεταφοράς ενέργειας είναι η Μετάδοση Θερμότητας.

Ο κλάδος της επιστήμης της Θερμοδυναμικής, προκειμένου για Μηχανικούς, μελετά τις καταστάσεις των συστημάτων από μακροσκοπική άποψη και δεν υπεισέρχεται, καθ'ολοκληρία, σε υποθέσεις δομικής μορφής του φαινομένου, αλλά παρέχει την ανάλυσή του, περιγράφοντας την κατάσταση του συστήματος σε συνάρτηση με γενικές χαρακτηριστικές παραμέτρους, που ορίζονται ως θερμοδυναμικές ιδιότητες, όπως η πίεση, ( $P$ ), ο όγκος, ( $V$ ), η θερμοκρασία, ( $T$ ), κ.α. Αυτές οι μεταβλητές είναι μοναδιαίες για το σύστημα και μόνο όταν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες, τότε το σύστημα, θεωρείται, ότι βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας.

Το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας από ένα σύστημα, κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, μπορεί να υπολογισθεί, χρησιμοποιώντας μια

θερμοδυναμική ανάλυση, ως η διαφορά της μεταβολής της ενέργειας του συστήματος και του παραγόμενου έργου, ικανοποιώντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Δε συσχετίζεται, όμως, με τους μηχανισμούς και τις μεθόδους της μεταφοράς αυτής, που είναι απαραίτητοι για τον υπολογισμό του χρόνου διάρκειας της μεταφοράς, παράμετροι που είναι αρκετά σημαντικές.

Ειδικότερα, οι Μηχανικοί, που συσχετίζονται με τεχνικές εφαρμογές, ενδιαφέρονται, περισσότερο, για τη μεταφορά της θερμότητας, στη μονάδα του χρόνου (ρυθμός), παρά για την ποσότητά της. Ένα πολύ απλό παράδειγμα είναι αυτό του Σχήματος 1.1, όπου ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας τοποθετείται σ' ένα περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας. Η Θερμοδυναμική, ως επιστήμη, παρέχει την πληροφορία, ότι μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, η θερμοκρασία του σώματος θα εξισωθεί με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και θα επέλθει θερμική ισορροπία. Αντιθέτως, η Μετάδοση Θερμότητας μπορεί να προσδιορίσει τη θερμοκρασία σε κάθε σημείο του σώματος και το ρυθμό μεταφοράς (ροή) θερμότητας από ένα μέρος της επιφάνειάς του ανά κάθε χρονική στιγμή, μέχρι την κατάσταση ισορροπίας.



**Σχήμα 1.1:** Σύστημα μεταφοράς θερμότητας

Επομένως, προκειμένου για Μηχανικούς, η Θερμοδυναμική έχει άμεση συσχέτιση με τις καταστάσεις θερμικής ισορροπίας των συστημάτων και μεταβολές μεταξύ τους, δηλαδή μελετά τη θεωρητική θερμοδυναμική ανάλυση των διεργασιών και όχι τη μικροσκοπική δομική μορφή της διεργασίας του φαινομένου. Σε αντίθεση, η Μετάδοση Θερμότητας μπορεί,

απλά, να θεωρηθεί ως φαινόμενο ή διεργασία μη ισορροπίας, επειδή αναφέρεται σε συστήματα, τα οποία, δεν βρίσκονται σε θερμική ισορροπία. Η ύπαρξη των φαινομένων της Μετάδοσης Θερμότητας οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ συστημάτων, δηλαδή σε μια κατάσταση μη θερμικής ισορροπίας. Ουσιαστικά, η Μετάδοση Θερμότητας, ως επιστήμη, παρέχει ό,τι δεν μπορεί, από τη φύση της, να παρέχει η επιστήμη της Θερμοδυναμικής, δηλαδή να προσδιορίσει το ρυθμό με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα σε κατάσταση μη θερμικής ισορροπίας.

Επειδή, όμως, όλες οι διεργασίες Μεταφοράς Θερμότητας υποδηλώνουν μεταφορά ενέργειας και συνεπώς μετατροπή ενέργειας, αυτές υπακούουν στον Πρώτο και Δεύτερο Νόμο της Θερμοδυναμικής, οι οποίοι αποτελούν συμπληρωματικές Αρχές για την επιστήμη της Μετάδοσης Θερμότητας. Ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής υποδηλώνει, ότι ο ρυθμός μεταφοράς θερμικής ενέργειας σε ένα σύστημα είναι ίσος με το ρυθμό αύξησης της ενέργειάς του. Ο Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος (συμπληρωματικός του πρώτου) προσδιορίζει τη διεύθυνση Μεταφοράς Θερμότητας από σώμα ή σύστημα υψηλής θερμοκρασίας, σε σώμα ή σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας και τανάπαλιν, προσδιορίζοντας, έτσι, τις έννοιες της θερμικής και ψυκτικής μηχανής αντίστοιχα.

## **1.2 ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

Η Μετάδοση Θερμότητας συναντάται, πολύ συχνά, σε πρακτικές εφαρμογές, με τις οποίες συσχετίζονται οι Μηχανικοί. Ο υπολογισμός του κόστους και του μεγέθους μιας συσκευής ή διαφόρων εξαρτημάτων, διά μέσου των οποίων, ένα ορισμένο ποσό ροής θερμότητας συναλλάσσεται, σε ορισμένο χρόνο, κάνει αναγκαία την ανάλυση του φαινομένου της ροής Θερμότητας.

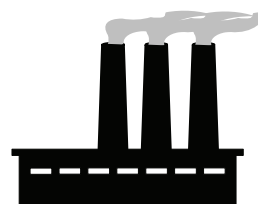
Η διαστασιολόγηση των λεβήτων, θερμαντήρων & προθερμαντήρων, ψυκτικών θαλάμων, ψυγείων και εναλλακτών Θερμότητας, όπως και η επιτυχής λειτουργία περυγώσεων στροβίλου, τοιχωμάτων θαλάμων καύσης (Μ.Ε.Κ.), απαιτούν τον επακριβή προσδιορισμό του ποσού μεταφοράς θερμότητας ή του ποσού ροής ψύξης μετάλλων, αντίστοιχα, πράγμα το οποίο συνεπάγεται λεπτομερειακή ανάλυση του φαινομένου της ροής θερμότητας σε συνάρτηση με το χρόνο.



Ψυγείο αυτοκινήτου



Ηλεκτρονική Πλακέτα

Σταθμός Παραγωγής  
Ενέργειας

### *Σχήμα 1.2: Πρακτικές Εφαρμογές Μετάδοσης Θερμότητας*

Μερικά άλλα παραδείγματα είναι η μελέτη των ηλεκτρικών μηχανών, των μετασχηματιστών, των τριβέων και εδράνων στήριξης, εργαλειομηχανών και ακόμη των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, των ηλεκτρικών αντιστάσεων, πυκνωτών και διατάξεως αυτεπαγωγής κ.α. πρακτικά προβλήματα, που απαιτούν την κατανόηση του φυσικού φαινομένου της ροής θερμότητας, την εισαγωγή προϋποθέσεων και την έκφραση του προβλήματος, υπό τη μορφή εξισώσεων, η επίλυση των οποίων απαιτεί μεθοδολογία και πολλές φορές υπολογιστικές ή/και προσεγγιστικές τεχνικές.

Δεν παρέχονται απλές παραδειγματικές μέθοδοι επίλυσης των προβλημάτων, αλλά οι εισαγόμενες προϋποθέσεις και προσεγγίσεις πρέπει να βασίζονται, όχι μόνο στην κατανόηση της φυσικής κατάστασης του προβλήματος, στους νόμους και στους μηχανισμούς του φαινομένου της

μεταφοράς θερμότητας (που ένας μηχανικός θα πρέπει να γνωρίζει), αλλά, ακόμη και στους νόμους των επιστημών της Μηχανικής Ρευστών, Φυσικής και Μαθηματικών.

### 1.3 Ο ΠΡΩΤΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής, γνωστός και ως η Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας, αναφέρει, ότι η ενέργεια δεν παράγεται εκ του μηδενός, ούτε καταστρέφεται, αλλά, μόνο, αλλάζει μορφή. Αυτός ο νόμος διακυβερνά, ποσοτικά, όλες τις μεταφερόμενες μορφές ενέργειας, αλλά χωρίς περιορισμό στη διεύθυνση μεταφοράς. Υπό την έννοια, ενέργεια, θεωρείται είτε το έργο, είτε η θερμότητα, είτε και η ροή μάζας.

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας υποδηλώνει, για οποιοδήποτε σύστημα, κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας του, ότι η μεταβολή της ολικής του ενέργειας ισούται με τη διαφορά της εισερχόμενης σε αυτό και της εξερχόμενης από αυτό και εκφράζεται ως:

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system} \quad (1.1)$$

ή στη μορφή του ρυθμού μεταφοράς:

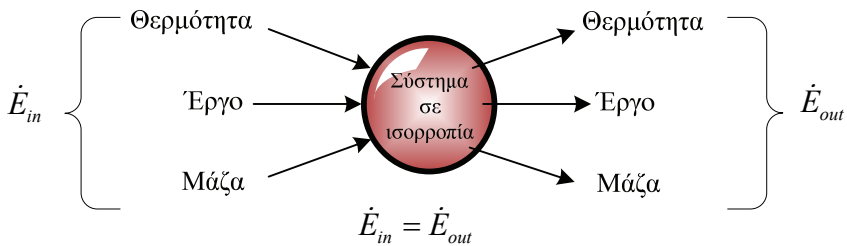
$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt \quad (1.2)$$

Η ενέργεια ορίζεται ως μια ποσότητα ή ιδιότητα, η τιμή της οποίας δεν μεταβάλλεται, εάν δεν μεταβληθεί και η κατάσταση του συστήματος. Στην περίπτωση, όμως, που μια διεργασία είναι μόνιμη (Σχήμα 1.3), δηλαδή δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, η μεταβολή της ενέργειας του συστήματος μηδενίζεται και η Εξίσωση (1.2) μετασχηματίζεται:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0 \Rightarrow \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (1.3)$$

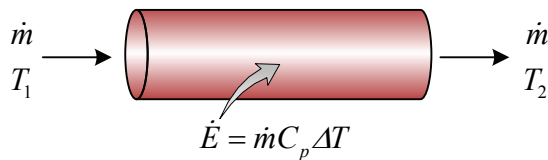
Όσον αφορά τη θερμική ανάλυση, η μόνη μορφή ενέργειας που μεταφέρεται, ως αποτέλεσμα θερμοκρασιακής διαφοράς, είναι η θερμότητα ή η θερμική ενέργεια. Επομένως, είναι προτιμότερο να καταγράφεται η θερμική ισορροπία ενός συστήματος, θεωρώντας ως **εσωτερικά παραγόμενη ενέργεια** (*heat generation*) τη μετατροπή άλλων ενεργειών (ηλεκτρικής, χημικής, πυρηνικής) σε θερμική. Οπότε, η εξίσωση της ενεργειακής ισορροπίας εκφράζεται ως:

$$Q_{in} - Q_{out} + E_{gen} = \Delta E_{thermal, system} \quad (1.4)$$



**Σχήμα 1.3:** Εφαρμογή του Πρώτου Θερμοδυναμικού Νόμου

Πολλές πρακτικές εφαρμογές, όπως εναλλάκτες θερμότητας, ψυγεία ή θερμαντικά σώματα, συσχετίζονται με ρευστά, τα οποία είτε εισέρχονται στο σύστημα είτε εξέρχονται από αυτό και επιλύονται, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία των **όγκων ελέγχου** (*control volumes*). Οι περισσότεροι όγκοι ελέγχου αναλύονται κάτω από συνθήκες **μόνιμης κατάστασης** (*steady-state condition*), δηλαδή μη μεταβαλλόμενης με το χρόνο.



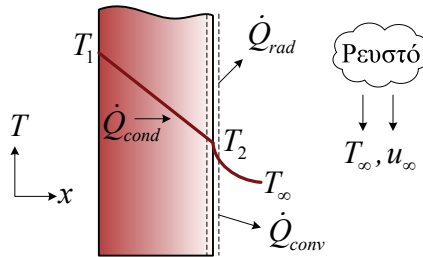
**Σχήμα 1.4:** Θερμική Ισορροπία σε σύστημα μόνιμης ροής ρευστού

Για ένα σύστημα μόνιμης ροής ρευστού, με μία είσοδο και μία έξοδο, θεωρώντας τη μεταβολή της κινητικής και δυναμικής ενέργειας αμελητέα,

χωρίς παραγωγή ή απώλεια έργου (Σχήμα 1.4), η διατήρηση της θερμικής ενέργειας δίνεται από την έκφραση:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p \Delta T \quad (1.5)$$

όπου,  $\dot{Q}$  είναι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας προς και από το σύστημα,  $\dot{m}$  η ροή μάζας (ή η μεταβολή της μάζας στη μονάδα του χρόνου) του ρευστού,  $C_p$  η **εδική θερμοχωρητικότητα** (*specific heat capacity*) υπό σταθερή πίεση και  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και εξόδου του ρευστού.



**Σχήμα 1.5:** Θερμική Ισοζύγιο στην εξωτερική επιφάνεια τοιχώματος

Στις περιπτώσεις, όπου η αλληλεπίδραση ενεργειών λαμβάνει χώρα σε μια επιφάνεια ενός μέσου, και όχι σε ένα σύστημα, η ισορροπία της θερμικής ενέργειας μπορεί να διατυπωθεί στην ίδια την επιφάνεια, η οποία δεν περικλείει μάζα ή όγκο, και άρα καμία ενέργεια. Παρόλα αυτά, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ψευδο-σύστημα, του οποίου η ενέργεια παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, οπότε η θερμική του ισορροπία εκφράζεται ως εξής:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (1.6)$$

και ισχύει σε μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες.

Παρότι, υπάρχει η πιθανότητα ύπαρξης της εσωτερικά παραγόμενης ενέργειας σε ένα μέσο, το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει τη θερμική



ισορροπία στην επιφάνειά του. Έτσι, στο παράδειγμα του Σχήματος 1.5, όπου εμφανίζονται και οι τρεις βασικοί μηχανισμοί της μετάδοσης θερμότητας (αγωγιμότητα, συναγωγιμότητα και ακτινοβολία), εκφράζοντας απώλεια θερμότητας μέσω αγωγιμότητας ενός τοιχώματος προς την επιφάνειά του, και στη συνέχεια, μέσω συναγωγιμότητας και ακτινοβολίας από την επιφάνεια προς το περιβάλλον, τότε η έκφραση της θερμικής ισορροπίας στην εξωτερική επιφάνεια του τοιχώματος είναι:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (1.6)$$

## 1.4 ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Σε προηγούμενη παράγραφο, η θερμότητα ή αλλιώς η θερμική ενέργεια, ορίστηκε ως η μορφή της ενέργειας, που μπορεί να μεταφερθεί κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας από ένα σύστημα σε ένα άλλο, ως αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής τους διαφοράς. Το μεταφερόμενο ποσό θερμότητας συμβολίζεται ως  $Q$ .

Η επιστήμη της Μετάδοσης Θερμότητας συσχετίζεται με τον προσδιορισμό του ρυθμού, με τον οποίο μεταφέρεται θερμότητα, ο οποίος ονομάζεται και ροή θερμότητας και συμβολίζεται ως  $\dot{Q}$ . Η τελεία επάνω στο  $Q$  υποδηλώνει τη χρονική παράγωγο της θερμότητας, ή αλλιώς τη μεταφορά της θερμότητας στη μονάδα του χρόνου. Η ροή θερμότητας έχει μονάδες Joule/sec ή Watt ή BTU/s και η ολοκλήρωσή της, σε καθορισμένο χρονικό διάστημα,  $\Delta t$ , προσδιορίζει το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας, δηλαδή:

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (1.7)$$

Η ροή θερμότητας μπορεί, επιπλέον, να συναντάται και ως ανηγμένη στη μονάδα επιφάνειας, η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση της μεταφοράς θερμότητας και συμβολίζεται ως:

$$\dot{Q}'' = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (1.8)$$

με μονάδες  $\text{Watt/m}^2$  ή  $\text{BTU/sec ft}^2$  και συναντάται πολύ συχνά σε εφαρμογές, οι οποίες αναλύονται με βάση τις καρτεσιανές συντεταγμένες.

## 1.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία και, ακόμη, λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, τρεις μηχανισμοί μελέτης της μεταφοράς θερμότητας διακρίνονται, όπως παρακάτω :

- **Αγωγιμότητα (αγωγή) (Conduction)**
- **Συναγωγιμότητα (συναγωγή) (Convection)** και
- **Ακτινοβολία (Radiation)**

Έχοντας υπόψη το γενικό ορισμό της Μεταφοράς Θερμότητας, δηλαδή θεωρώντας την εμφάνιση του φαινομένου, υπό την προϋπόθεση της ύπαρξης δυναμικής θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ συστημάτων, μόνο η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να ταξινομηθεί ως διεργασία καθαρής μεταφοράς θερμότητας, ενώ η θερμική συναγωγιμότητα προϋποθέτει την ύπαρξη ροής μάζας και η ακτινοβολία τη θερμοκρασία του συστήματος.

Παρόλα αυτά και επειδή υφίσταται μεταφορά ενέργειας από σύστημα υψηλής θερμοκρασίας, σε σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας, έχει, το γεγονός αυτό, γίνει αποδεκτό, να μελετάται και ως ένας μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας. Στη συνέχεια, μια σύντομη περιγραφή αυτών των

μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας δίνεται, παρακάτω, ενώ λεπτομερέστερη αναφορά ακολουθείται στα επόμενα κεφάλαια.

### 1.5.1 Θερμική Αγωγιμότητα

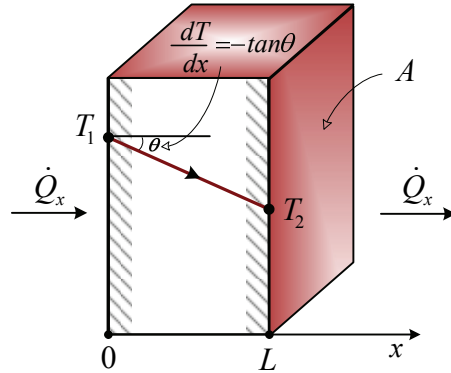
**Θερμική Αγωγιμότητα** (*thermal conduction*) ορίζεται, ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας από μία περιοχή ή σύστημα υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη ή άλλο χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ενός μέσου (στερεού, υγρού ή αέριου σε ηρεμία), υπό την προϋπόθεση της φυσικής επαφής.

Η μεταφορά αυτή επιτυγχάνεται είτε με μοριακή αλληλεπίδραση, δηλαδή μεταφορά ενέργειας από τα περισσότερο ενεργητικά μόρια στα γειτονικά τους, με χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας, είτε μέσω της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα, καθαρώς, μεταλλικά στερεά. Ειδικότερα, όταν τα μόρια μιας περιοχής της ύλης αποκτούν μία μέση κινητική ενέργεια, μεγαλύτερη αυτής των μορίων της γειτονικής περιοχής, αυτό εκδηλώνεται υπό τη μορφή μιας θερμοκρασιακής διαφοράς. Οπότε, η ενέργεια, ή μέρος της, μεταφέρεται στα μόρια της περιοχής της μικρότερης θερμοκρασίας, γεγονός το οποίο επαληθεύει τον ορισμό της θερμικής αγωγιμότητας.

Η μεταφορά της θερμικής ενέργειας, μέσω αγωγιμότητας, λαμβάνει χώρα μέσω ελαστικών κρούσεων ή μέσω διάχυσης των μορίων, κατά την τυχαία κίνησή τους, στα αέρια και ρευστά. Στην περίπτωση των στερεών μέσων, η αντίστοιχη θερμική ενέργεια μεταφέρεται, μέσω των ταλαντώσεων των μορίων του πλέγματος και των κινουμένων ηλεκτρονίων, από περιοχές υψηλής, σε περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα μετάδοσης θερμότητας με αγωγιμότητα είναι το φαινόμενο απώλειας θερμότητας, που παρατηρείται σε κλειστούς θερμαινόμενους χώρους κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, το οποίο

οφείλεται, κυρίως, στην αγωγιμότητα των τοίχων, των παραθύρων, της οροφής κλπ. (Σχήμα 1.6).



**Σχήμα 1.6:** Χαρακτηριστικό παράδειγμα Θερμικής Αγωγιμότητας

Ο ρυθμός μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας, μέσω ενός μέσου, εξαρτάται από τη γεωμετρία του μέσου, το πάχος του, το υλικό του και από τη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα όριά του. Πειράματα, που έλαβαν μέρος στο παρελθόν, έδειξαν, ότι η ροή θερμότητας,  $\dot{Q}$ , μέσω ενός τοιχώματος, όπως στο Σχήμα 1.6, είναι ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς,  $\Delta T$ , των ορίων του μέσου και της κάθετης επιφάνειας,  $A$ , στην κατεύθυνση της μεταφοράς θερμότητας, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους του μέσου,  $\Delta x$ . Επομένως, προκύπτει, ότι:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.9)$$

όπου, η σταθερή ποσότητα,  $k$ , είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του μέσου και είναι η χαρακτηριστική φυσική ιδιότητα του υλικού, υποδηλώνοντας την ικανότητά του να μεταφέρει θερμότητα. Τυπικές τιμές του,  $k$ , δίνονται στον Πίνακα 1.1. Στην οριακή περίπτωση, όπου το πάχος του μέσου τείνει στο 0 ( $\Delta x \rightarrow 0$ ), η Εξίσωση (1.9) μπορεί να γραφεί σε διαφορική μορφή:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.10)$$

η οποία καλείται και **Νόμος του Fourier**, προς τιμή του Γάλλου μαθηματικού και φυσικού, ο οποίος, την παρουσίασε το 1822.

**Πίνακας 1.1:** Τυπικές χαρακτηριστικές τιμές  $k$  υλικών

Υλικό	$k$
Υγρά μέταλλα	0.004 – 0.03
Αέρια	0.7 – 1.0
Νερό	1.7 – 13.7
Μέταλλα	3 – 450
Μονωτικά υλικά	0.001 – 0.07
Δομικά υλικά	0.2 – 1.1

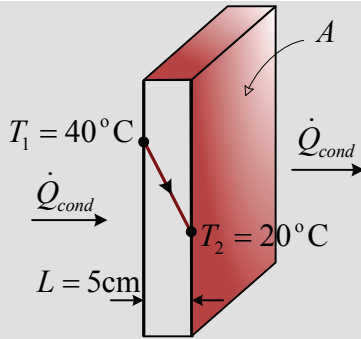
Ο όρος  $dT/dx$ , είναι η πρώτη παράγωγος της θερμοκρασίας ως προς τη χωρική μεταβολή  $x$ , ή αλλιώς η θερμοκρασιακή κλίση. Το αρνητικό πρόσημο της Εξίσωσης (1.9) είναι η συνέπεια του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, όπου εξασφαλίζει, ότι η θερμότητα μεταφέρεται, κατά αντίθετη κατεύθυνση, με τη θερμοκρασιακή κλίση.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1.1

Να υπολογισθεί η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας μιας ομοιογενούς επίπεδης πλάκας, πάχους 5cm και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 0.2W/mK, η οποία διατηρεί τις δύο επιφανειακές της θερμοκρασίες στους 40°C και 20°C, αντίστοιχα.

#### Λύση:

Η μεταφορά θερμότητας μέσω της επίπεδης πλάκας πραγματοποιείται με τη μορφή θερμικής αγωγιμότητας, οπότε αρκεί η εφαρμογή της Εξίσωσης (1.9).



Σχήμα Π1.1

Οπότε, προκύπτει:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \Rightarrow \dot{Q}_{cond} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{L} \Rightarrow$$

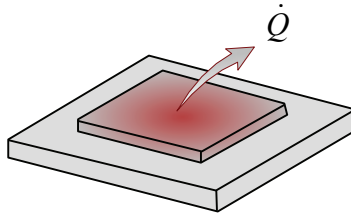
$$\frac{\dot{Q}_{cond}}{A} = \dot{Q}_{cond}'' = -\frac{0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K} \cdot (40-20)^\circ\text{C}}{0.05\text{m}} = \mathbf{80 \text{ W/m}^2}$$

### 1.5.2 Θερμική Συναγωγιμότητα

**Θερμική Συναγωγιμότητα** (*thermal convection*) ορίζεται, ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός παρακείμενου κινούμενου ρευστού (υγρού ή αερίου) και είναι ένας συνδυασμός αγωγιμότητας και κίνησης του ρευστού. Ο μηχανισμός λειτουργίας της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγιμότητα δεν εξαρτάται, κυρίως, από τη θερμοκρασιακή διαφορά, και μόνο, αλλά ακολουθεί μια σειρά φυσικών διεργασιών, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

Αρχικά, η ροή θερμότητας διενεργείται μέσω αγωγιμότητας από μία στερεή επιφάνεια στα γειτονικά μόρια του ρευστού. Η μεταφερόμενη ενέργεια, κατ' αυτόν τον τρόπο, συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας και της εσωτερικής ενέργειας των μορίων του ρευστού. Στη συνέχεια, τα μόρια του ρευστού κινούνται προς την περιοχή της χαμηλότερης θερμοκρασίας και αναμειγνύονται με το υπόλοιπο μέρος των μορίων του

ρευστού. Η θερμική ενέργεια, λοιπόν, αποθηκεύεται στα μόρια του ρευστού και μεταφέρεται, σαν αποτέλεσμα, στην κινούμενη μάζα του. Η διαδικασία αυτού του είδους της μεταφοράς θερμότητας, ορίζεται θερμική συναγωγιμότητα.



**Σχήμα 1.7:** Χαρακτηριστικό παράδειγμα Θερμικής Συναγωγιμότητας (μητρική πλακέτα και επεξεργαστής)

Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η κίνηση του ρευστού, τόσο αυξάνει και η ροή θερμότητας μέσω συναγωγιμότητας. Εάν το ρευστό είναι στάσιμο (δεν κινείται), τότε η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται, μόνο, μέσω αγωγιμότητας. Η παρουσία της κίνησης του ρευστού ενδυναμώνει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του στερεού τοιχώματος και του ρευστού, αλλά περιπλέκει τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής της.

Η θερμική συναγωγιμότητα ταξινομείται, σύμφωνα με τη φύση της κίνησης του ρευστού. **Εξαναγκασμένη (Forced)** Θερμική Συναγωγιμότητα συντελείται στις περιπτώσεις, όπου το ρευστό κινείται επί μιας επιφάνειας, λόγω εξωτερικών παραγόντων, όπως υπό την επίδραση ενός ανεμιστήρα, μίας αντλίας ή εξ αιτίας του ανέμου. Αντιθέτως, **Ελεύθερη (Free)** ή **Φυσική (Natural)** θερμική συναγωγιμότητα συντελείται, όταν η κίνηση του ρευστού οφείλεται σε δυνάμεις άνωσης, που προκαλούνται από τις διαφορετικές τιμές πυκνότητας, λόγω της θερμοκρασιακής διανομής του ρευστού.

Παρόλη την πολυπλοκότητα του φαινομένου της θερμικής συναγωγιμότητας, ο ρυθμός μεταφοράς της εκφράζεται μέσω του **Νόμου**