

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη στοιχείων Θερμομόνωσης με χρήση
Πεπερασμένων Στοιχείων και έλεγχος
φαινομένου υγροποίησης

Ηλιόπουλος Θεόδωρος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Σταυρουλάκης Γεώργιος

Χανιά, 2010

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2 Προβλήματα βαθμωτού πεδίου

2.1 Εισαγωγή	6
2.2 Μεταφορά θερμότητας σε σταθερή κατάσταση	7
2.2.1 Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας.....	8
2.2.1.1 Διέπουσα εξίσωση.....	8
2.2.1.2 Συνοριακές συνθήκες	9
2.2.1.3 Μονοδιάστατο στοιχείο.....	10
2.2.1.4 Μέθοδος Galerkin για αγωγή θερμότητας	13

Κεφάλαιο 3 Η θερμομόνωση του κτιρίου

3.1 Εισαγωγή	16
3.1.1 Η αναγκαιότητα της θερμομόνωσης	16
3.1.2 Οι θερμικές απώλειες και η προέλευσή τους	17
3.2 Οι βασικές αρχές της θερμομόνωσης	19
3.3 Τα θερμομονωτικά υλικά.....	21
3.3.1 Ιδιότητες - Χαρακτηριστικά.....	21
3.3.2 Υαλοβάμβακας – Υαλόμαλλο.....	23
3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διάφορων τεχνικών θερμομόνωσης	24

Κεφάλαιο 4 Η υγρασιμότητα του κτιρίου

4.1 Η έννοια της υγρασίας	29
4.2 Τα είδη της υγρασίας	30
4.2.1 Υγρασία επιφανειακής συμπύκνωσης υδρατμών.....	30
4.2.2 Υγρασία εσωτερικής συμπύκνωσης υδρατμών.....	30
4.2.3 Αρχές προστασίας από την υγρασία.....	31

Κεφάλαιο 5 Εφαρμογή της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1 Εισαγωγή	34
5.2 Εφαρμογές	34
5.2.1 Θερμομόνωση στον πυρήνα της τοιχοποιίας.....	34
5.2.2 Θερμομόνωση στον πυρήνα της τοιχοποιίας με προσθήκη φράγματος υδρατμών.....	36
5.2.3 Εξωτερική θερμομόνωση τοιχοποιίας.....	38
5.2.4 Εσωτερική θερμομόνωση τοιχοποιίας.....	39
5.3 Συμπεράσματα	41
Παράρτημα Α.....	42
Παράρτημα Β.....	47
Βιβλιογραφία	53

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Κάθε ανύψωση του βιοτικού επιπέδου μίας χώρας συνδέεται με την ανάλογη αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Συμπεριλαμβανομένης μάλιστα και της αύξησης του πληθυσμού η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας επιτείνεται. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι ένα από τα κυριότερα ζητήματα που απασχολεί σήμερα την ανθρωπότητα είναι το ενεργειακό πρόβλημα. Η σημαντικότερη και άμεσα εκμεταλλεύσιμη ευγενής μορφή ενέργειας είναι η εξοικονόμηση ενέργειας. Μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση έγινε αντιληπτό ότι τα περιορισμένα αποθέματα ενέργειας σε συνδυασμό με τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση οδήγησαν σε αύξηση του κόστους της ενέργειας και δημιούργησαν την ανάγκη για αλλαγές στο σχεδιασμό και την κατασκευή των κτιρίων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το 40% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση των κτιρίων, ενώ τα καύσιμα για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας (θερμικής και ηλεκτρικής) ευθύνονται για το 50% των εκπομπών αερίων που δημιουργούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η εξοικονόμηση ενέργειας που μπορούμε να πετύχουμε στα κτίρια κυμαίνεται από 30 ως 70% και εξαρτάται από το είδος και το πλήθος των εν δυνάμει επεμβάσεων. Τα κτίρια έχουν την ανάγκη για προστασία από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (ζέστη, κρύο, βροχή, ήλιος). Προστασία σημαίνει σωστή εξωτερική κάλυψη που συντελεί στη διατήρηση της εσωτερικής τους θερμοκρασίας σε υψηλά επίπεδα με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες.

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με το θέμα της θερμομόνωσης γιατί αποτελεί το σημαντικότερο μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά επηρεάζει ταυτόχρονα τη διάρκεια ζωής και το κόστος συντήρησης κάθε υφιστάμενου κτιρίου. Με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων ώστε να παρατηρήσουμε τη κατανομή θερμοκρασίας σε διαφορετικές περιπτώσεις τοιχοποιίας και στη συνέχεια να επισημάνουμε κάποιες ιδιαιτερότητες που έχουν, αλλά και να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την θερμομόνωση και την υγρομόνωσή τους, προς αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων στη κατασκευή.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και τη χρησιμότητά της σε προβλήματα Μηχανικής. Κατόπιν αναπτύσσονται οι βασικές έννοιες της μορφοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων, εξετάζοντας το πρόβλημα της μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας σε σταθερή κατάσταση χρησιμοποιώντας και τη προσέγγιση Galerkin.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια εκτενής αναφορά στη θερμομόνωση του κτιρίου, στη σημασία της αλλά και στις βασικές αρχές της. Στη συνέχεια περιγράφονται τα

χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των θερμομονωτικών υλικών καθώς και η συμβολή τους στη σωστή θερμομόνωση αλλά και τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν υπό ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Κατόπιν παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μερικών από των βασικότερων τεχνικών θερμομόνωσης όσον αφορά στην αποδοτικότητά τους, στην ευκολία κατασκευής τους αλλά και στο κόστος τους.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 4, περιγράφεται η έννοια της υγρασίας, τα είδη που παρατηρούνται στη τοιχοποιία καθώς και οι βασικές αρχές για την αποφυγή της με σκοπό τη προστασία του τοιχώματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη θέση του φράγματος υδρατμών στο εσωτερικό του τοιχώματος ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της εσωτερικής συμπύκνωσης που προσβάλλει τα υλικά κατασκευής στον πυρήνα της τοιχοποιίας και περιορίζει τις θερμομονωτικές τους ιδιότητες. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη προβληματική θερμομόνωση και υγραμόνωση του κτιρίου.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις τοιχοποιίας. Κατόπιν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση.

Κεφάλαιο 2

Προβλήματα βαθμωτού πεδίου

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί αναπτύσσονται οι βασικές έννοιες της μορφοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων, εξετάζοντας το πρόβλημα της μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας σε σταθερή κατάσταση χρησιμοποιώντας και τη προσέγγιση Galerkin. Ιδιαίτερη βαρύτητα θα δώσουμε στη προσέγγιση αυτή, αφού βρίσκει άμεση εφαρμογή στη δεδομένη διαφορική εξίσωση, χωρίς την ανάγκη να προσδιοριστεί μια ισοδύναμη συνάρτηση για να ελαχιστοποιηθεί.

Οι άγνωστοι στο πρόβλημα εκπροσωπούν συνιστώσες ενός βαθμωτού ή διανυσματικού πεδίου. Σε μια δισδιάστατη πλάκα, σε πρόβλημα ελαστικότητας, η άγνωστη ποσότητα είναι το διανυσματικό μέγεθος $\mathbf{u}(x,y)$, όπου $\mathbf{u}$ είναι ένα διάνυσμα μετατόπισης (2×1). Από την άλλη, ποσότητες όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η δυναμική ροή είναι **βαθμωτές**. Στη δισδιάστατη διάδοση θερμότητας σε σταθερή κατάσταση, για παράδειγμα, ο άγνωστος που πρέπει να προσδιορίσουμε είναι το πεδίο θερμοκρασίας $T(x, y)$. Εδώ εξετάζουμε την επίλυση τέτοιων προβλημάτων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μια γενική τεχνική για την κατασκευή προσεγγιστικών λύσεων μιας εξίσωσης. Η μέθοδος περιλαμβάνει τη διαίρεση του χώρου στον οποίο επιλύεται η εξίσωση σε ένα πεπερασμένο πλήθος απλών χώρων, σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements), και τη χρήση διαφόρων εννοιών για τον υπολογισμό της λύσης υπό τη συλλογή των λύσεων που προκύπτουν στα πεπερασμένα στοιχεία. Οι ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις θεωρούνται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μια διαδικασία σύνθεσης, η οποία καταλλήλως θεωρεί τα φορτία και τους περιορισμούς έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

Τα προβλήματα βαθμωτού πεδίου απαντώνται σε όλους τους κλάδους της Μηχανικής και της Φυσικής. Τα περισσότερα μπορούν να θεωρηθούν ειδικές μορφές της γενικής εξίσωσης Helmholtz, που δίνεται από την

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \lambda \varphi + Q = 0 \quad (1.1)$$

μαζί με τις συνοριακές συνθήκες του φ και τις παραγώγους του. Στην παραπάνω εξίσωση $\varphi = \varphi(x, y, z)$ είναι η μεταβλητή πεδίου που πρέπει να προσδιοριστεί. Αν

θέσουμε ως μεταβλητή πεδίου τη θερμοκρασία $\varphi = T$, $k_x = k_y = k$ και $\lambda = 0$ και θεωρήσουμε μόνο τα x και y , παίρνουμε

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q = 0$$

που περιγράφει το πρόβλημα αγωγής για θερμοκρασία T , όπου το k είναι η θερμική αγωγιμότητα και το Q είναι η πηγή /αποδέκτης θερμότητας. Για να εξαγάγουμε τα μητρώα στοιχείων θα χρησιμοποιήσουμε την προσέγγιση Galerkin, καθώς η μεγαλύτερη γενικότητα της είναι κατάλληλη για τα προβλήματα πεδίου.

2.2 Μεταφορά θερμότητας σε σταθερή κατάσταση

Στην εργασία αυτή εξετάζουμε τη μορφοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας σε σταθερή κατάσταση. Μεταφορά θερμότητας παρατηρείται όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μέσα σε ένα σώμα ή μεταξύ ενός σώματος και του περιβάλλοντος μέσου. Η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή, συναγωγή και θερμική ακτινοβολία. Η ροή θερμότητας ακτινοβολίας είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας, κάτι που καθιστά το πρόβλημα μη γραμμικό. Εδώ εξετάζουμε μόνο την αγωγή και τη συναγωγή θερμότητας.

Ένα παράδειγμα αγωγής είναι η ροή θερμότητας μέσω του τοίχου ενός θερμαινόμενου δωματίου το χειμώνα. Η αγωγή θερμότητας ποσοτικοποιείται από το νόμο Fourier. Σε ένα θερμικά ισοτροπικό μέσο, ο νόμος Fourier για επίπεδο σώμα και διδιάστατη ροή θερμότητας δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1.2)$$

όπου $T = T(x, y)$ είναι ένα πεδίο θερμοκρασίας στο μέσο, q_x και q_y είναι οι συνιστώσες θερμικής ροής (W/m^2), k είναι η θερμική αγωγιμότητα ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$), ενώ $\partial T/\partial x$ και $\partial T/\partial y$ είναι οι βαθμίδες θερμοκρασίας στις διευθύνσεις x και y , αντίστοιχα. Η ροή θερμότητας $\mathbf{q} = q_x \mathbf{i} + q_y \mathbf{j}$ που προκύπτει είναι κάθετη σε μια ισόθερμη (γραμμή σταθερής θερμοκρασίας). Σημειώστε ότι $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m/s}$. Το αρνητικό πρόσημο στην Εξ. 1.2 αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι η θερμότητα μεταφέρεται προς την κατεύθυνση μείωσης της θερμοκρασίας. Η θερμική αγωγιμότητα k εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού.

Στη συναγωγή θερμότητας έχουμε μεταφορά ενέργειας μεταξύ ενός ρευστού και μιας στερεάς επιφάνειας, που προκαλείται από τη διαφορά θερμοκρασίας. Η συναγωγή θερμότητας μπορεί να είναι ελεύθερη (ή φυσική), η οποία προκαλείται από δυνάμεις

οι οποίες δημιουργούνται από τη μεταβολή της πυκνότητας όταν μέσα στο ρευστό υπάρχουν και διαφορές στη θερμοκρασία φυσικά, όπως η μορφή κυκλοφορίας που δημιουργείται σε ένα δοχείο με νερό που βράζει καθώς το καυτό νερό κινείται ανοδικά και το κρύο καθοδικά, ή εξαναγκασμένη, που εμφανίζεται όταν η κίνηση του ρευστού προκαλείται από εξωτερικά αίτια, όπως η ροή που προκαλεί ένας ανεμιστήρας ή μια αντλία. Από όλα αυτά προκύπτει ότι η συναγωγή είναι ένας μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας ο οποίος οφείλεται στον συνδυασμό της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. Κατά αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται η αισθητή θερμότητα. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας παροχής θερμότητας χρησιμοποιείται η σχέση του Newton

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (1.3)$$

όπου q είναι η ροή θερμότητας λόγω συναγωγής (W/m^2), h είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής ή συντελεστής υμένα ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), ενώ T_s και T_∞ είναι η επιφανειακή θερμοκρασία και η θερμοκρασία ρευστού, αντίστοιχα. Το μέγεθος q είναι ανάλογο της υπάρχουσας διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ρευστού. Ο συντελεστής h είναι ιδιότητα της ροής και περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη συναγωγή, όπως από το αν είναι φυσική ή εξαναγκασμένη, τις συνθήκες στο οριακό στρώμα, αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης, τον τύπο του ρευστού, και τη γεωμετρία του σώματος [2].

Συνεπώς $h = h(u, k, \eta, \rho, c_p, \text{γεωμετρικές συνθήκες})$

με u την ταχύτητα του ρευστού

k την ειδική θερμική αγωγιμότητα

η το δυναμικό ιξώδες

ρ την πυκνότητα του ρευστού

c_p την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση.

2.2.1 Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας

Τώρα θα επικεντρωθούμε στο πρόβλημα αγωγής θερμότητας σε σταθερή κατάσταση σε μία διάσταση. Στόχος μας είναι να προσδιορίσουμε την κατανομή θερμοκρασίας. Σε προβλήματα σταθερής κατάστασης σε μία διάσταση, έχουμε βαθμίδα θερμοκρασίας μόνο κατά μήκος ενός άξονα συντεταγμένων, ενώ η θερμοκρασία σε κάθε σημείο είναι ανεξάρτητη από το χρόνο. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν πολλά μηχανολογικά συστήματα.

2.2.1.1 Διέπουσα εξίσωση

Ας θεωρήσουμε την αγωγή θερμότητας μέσω ενός επίπεδου τοίχου με ομοιόμορφη παραγωγή θερμότητας (Σχ. 1.1). Έστω ότι A είναι η επιφάνεια που είναι κάθετη προς τη ροή θερμότητας και Q (W/m^3) η εσωτερικά παραγόμενη θερμότητα ανά μονάδα

όγκου. Στο Σχ. 1.1 φαίνεται ένας όγκος ελέγχου. Καθώς ο ρυθμός εισαγωγής θερμότητας στον όγκο ελέγχου (ροή θερμότητας $\times$ εμβαδόν) συν το ρυθμό παραγωγής θερμότητας ισούται με το ρυθμό εξαγωγής θερμότητας από τον όγκο ελέγχου, έχουμε

$$qA + Q A dx = \left(q + \frac{dq}{dx} dx \right) A \quad (1.4)$$

Διαγράφοντας το qA και από τις δύο πλευρές παίρνουμε

$$Q = \frac{dq}{dx} \quad (1.5)$$

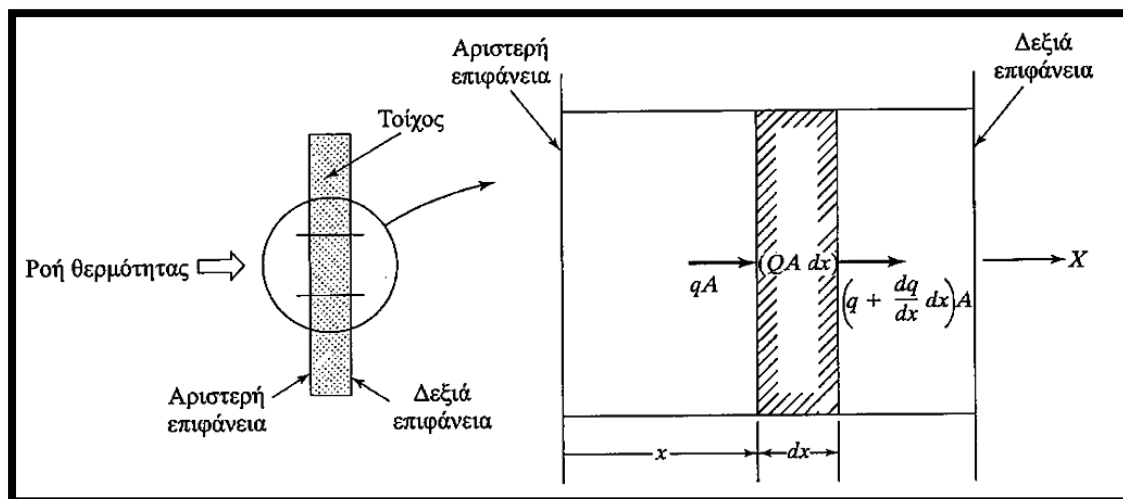
Αντικαθιστώντας το νόμο Fourier

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.6)$$

στην Εξ. 1.5 λαμβάνουμε

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + Q = 0 \quad (1.7)$$

Συνήθως, το Q ονομάζεται πηγή όταν είναι θετικό (παράγεται θερμότητα) και αποδέκτης όταν είναι αρνητικό (καταναλώνεται θερμότητα). Εδώ, αναφέρουμε το Q απλώς ως πηγή. Γενικά, το k στην Εξ. 1.7 είναι συνάρτηση του x . Πρέπει να επιλύσουμε την Εξίσωση 1.7 χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες.



Σχήμα 1.1 Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας

2.2.1.2 Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες είναι, βασικά, τριών ειδών: καθορισμένη θερμοκρασία, καθορισμένη ροή θερμότητας (ή μονωμένη) και συναγωγή. Εδώ θα εξετάσουμε ένα

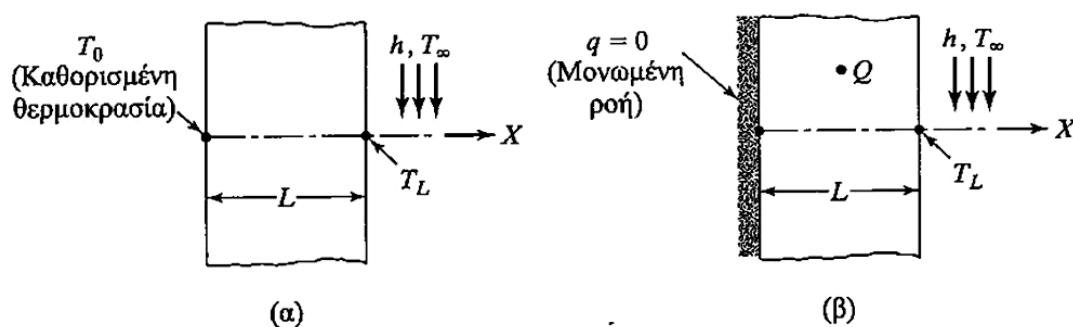
απλό τοίχωμα που στην εσωτερική πλευρά του έρχεται σε επαφή με θερμό ρευστό (αέρα) σε θερμοκρασία T_0 . Η θερμοκρασία T_L εξωτερικά του τοιχώματος, στο σύνορο, διατηρείται σταθερή με ροή αέρα θερμοκρασίας T_∞ (Σχ. 1.2α). Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος είναι

$$T|_{x=0} = T_0 \quad (1.8)$$

$$q|_{x=L} = h(T_L - T_\infty) \quad (1.9)$$

Μία άλλη περίπτωση που μας απασχολείσαι είναι ο τοίχος του Σχ. 1.2β. Η εσωτερική επιφάνεια του τοίχου είναι μονωμένη, ενώ η εξωτερική είναι επιφάνεια συναγωγής θερμότητας. Τότε, οι συνοριακές συνθήκες είναι

$$q|_{x=0} = 0 \quad q|_{x=L} = h(T_L - T_\infty) \quad (1.10)$$



Σχήμα 1.2 Περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών σε μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας

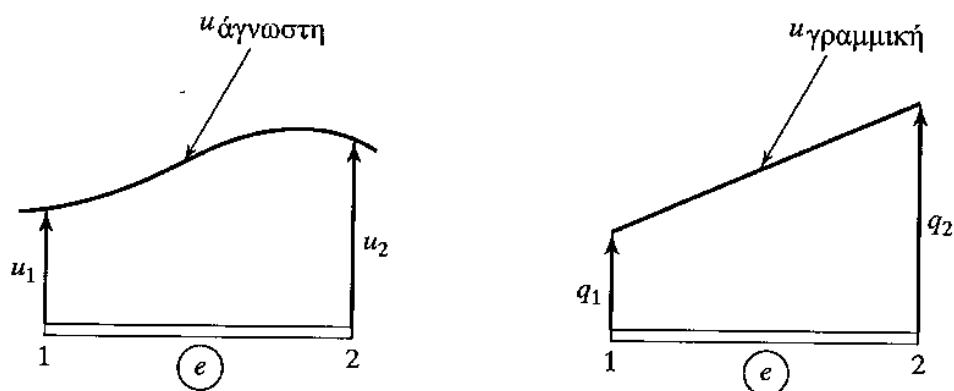
2.2.1.3 Μονοδιάστατο στοιχείο

Κατόπιν θα εξετάσουμε το στοιχείο δύο κόμβων με γραμμικές συναρτήσεις μορφής. Στη συνέχεια γίνεται η επέκταση σε στοιχεία τριών κόμβων δεύτερης τάξης. Τώρα, για να εφαρμόσουμε, τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων, διακριτοποιούμε το πρόβλημα στη διεύθυνση x , όπως φαίνεται στο Σχ.1.4α. Οι θερμοκρασίες στα διάφορα κομβικά σημεία, που συμβολίζονται με T , είναι άγνωστες (με εξαίρεση τον κόμβο 1, όπου $T_1 = T_0$). Θεωρούμε ένα τυπικό πεπερασμένο στοιχείο e στο Σχ. 1.4β. Στο τοπικό σχήμα αρίθμησης, αριθμούμε τον πρώτο κόμβο με το 1 και το δεύτερο με το 2. Χρησιμοποιούμε το συμβολισμό $x_1 = x$ συντεταγμένη του κόμβου 1 και $x_2 = x$ συντεταγμένη του κόμβου 2. Ορίζουμε ως **φυσικό** ή **ενδογενές** (intrinsic) σύστημα συντεταγμένων, το οποίο συμβολίζεται με ξ ως εξής

$$\xi = \frac{2}{x_2 - x_1} (x - x_1) - 1 \quad (1.11)$$

Στο Σχ. 1.4β παρατηρούμε ότι $\xi = -1$ στον κόμβο 1 και $\xi = 1$ στον κόμβο 2. Το μήκος ενός στοιχείου καλύπτεται όταν το ξ μεταβάλλεται από -1 έως 1 . Με αυτό το σύστημα

ορίζουμε τις συναρτήσεις μορφής, που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρεμβολή του πεδίου θερμοκρασιών. Στη συνέχεια παρεμβάλλουμε το άγνωστο πεδίο θερμοκρασιών εντός ενός στοιχείου με μία γραμμική κατανομή (Σχ. 1.3).



Σχήμα 1.3 Γραμμική παρεμβολή του πεδίου μετατοπίσεων εντός στοιχείου

Αυτή η προσέγγιση γίνεται αυξητικά ακριβής, όσο περισσότερα στοιχεία συμπεριλαμβάνουμε στο μοντέλο. Για να εφαρμόσουμε αυτή τη γραμμική παρεμβολή, εισάγουμε **γραμμικές συναρτήσεις μορφής** ως

$$N_1(\xi) = \frac{1-\xi}{2} \quad (1.12)$$

$$N_2(\xi) = \frac{1+\xi}{2} \quad (1.13)$$

Οι συναρτήσεις μορφής N_1 και N_2 φαίνονται στο Σχ. 1.4β. Αφού ορίσουμε τις συναρτήσεις μορφής, μπορούμε να γράψουμε το γραμμικό πεδίο θερμοκρασιών εντός του στοιχείου συναρτήσει των κομβικών θερμοκρασιών T_1 και T_2 ως εξής

$$\mathbf{T}(\xi) = N_1 T_1 + N_2 T_2 \quad (1.14a)$$

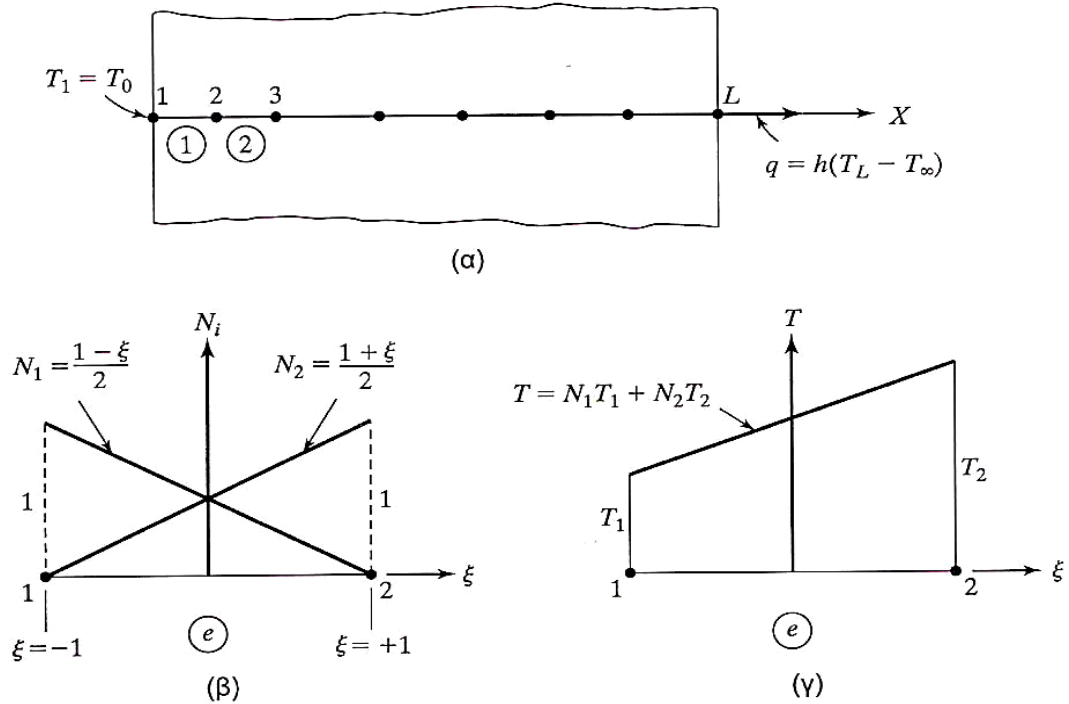
ή σε μορφή μητρώου ως

$$\mathbf{T}(\xi) = \mathbf{N} \mathbf{T}^e \quad (1.14b)$$

όπου

$$\mathbf{N} = [N_1, N_2] \quad \text{και} \quad \mathbf{T}^e = [T_1, T_2]^T \quad (1.15)$$

Στις εξισώσεις αυτές, το $\mathbf{T}$ αναφέρεται ως το διάνυσμα θερμοκρασιών του στοιχείου. Επίσης μπορούμε εύκολα να επιβεβαιώσουμε από την Εξ.1.14α ότι $T = T_1$ στον κόμβο 1, $T = T_2$ στον κόμβο 2 και ότι το T μεταβάλλεται γραμμικά (Σχ. 1.4γ).



Σχήμα 1.4 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων και συναρτήσεις μορφής για τη γραμμική παρεμβολή του πεδίου θερμοκρασίας

Σημειώνουμε επίσης ότι ο μετασχηματισμός από το x στο ξ στην Εξ.1.11 μπορεί να γραφεί συναρτήσει των N_1 και N_2 ως εξής

$$x = N_1 x_1 + N_2 x_2 \quad (1.16)$$

Συγκρίνοντας τις Εξ. 1.14α και 1.16, παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία T και η συντεταγμένη x παρεμβάλλονται εντός του στοιχείου με τις ίδιες συναρτήσεις μορφής N_1 και N_2 . Αυτό αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως *ισοπαραμετρικός σχηματισμός*.

Από τη σχέση μεταξύ x και ξ στην Εξ.1.11 έχουμε

$$d\xi = \frac{2}{x_2 - x_1} dx \quad (1.17)$$

κατόπιν χρησιμοποιώντας τον κανόνα παραγωγισής σύνθετων συναρτήσεων παίρνουμε

$$\frac{dT}{dx} = \frac{dT}{d\xi} \frac{d\xi}{dx} = \frac{2}{x_2 - x_1} \frac{dN}{d\xi} \cdot T^e = \frac{1}{x_2 - x_1} [-1, \quad 1] T^e \quad (1.18\alpha)$$

ή μπορεί να γραφεί κ ως εξής

$$\frac{dT}{dx} = \mathbf{B}_T T^e \quad (1.18\beta)$$

Όπου το (1×2) μητρώο $\mathbf{B}_T$ ονομάζεται μητρώο θερμοκρασιακής παραμόρφωσης του στοιχείου και δίνεται από

$$\mathbf{B}_T = \frac{1}{x_2 - x_1} [-1, \quad 1] \quad (1.19)$$

2.2.1.4 Μέθοδος Galerkin για αγωγή θερμότητας

Στη συνέχεια θα εξαγάγουμε τα μητρώα στοιχείων με τη μέθοδο Galerkin [1]. Το πρόβλημα μας είναι

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + Q = 0$$

$$T|_{x=0} = T_0 \quad q|_{x=L} = h(T_L - T_\infty) \quad (1.20)$$

Εφόσον επιθυμούμε μια προσεγγιστική λύση της T , χρησιμοποιούμε τη μέθοδο Galerkin για την επίλυση της

$$\int_0^L \varphi \left[\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + Q \right] dx = 0 \quad (1.21)$$

Για κάθε φ που κατασκευάζεται από τις ίδιες συναρτήσεις βάσης, όπως αυτές του T , με $\varphi(0) = 0$. Το φ μπορεί να θεωρηθεί ως δυνατή μεταβολή θερμοκρασίας, η οποία είναι συνεπής με τις συνοριακές συνθήκες. Άρα, $\varphi = 0$ όπου ορίζεται το T . Ολοκληρώνοντας κατά μέρη τον πρώτο όρο, έχουμε

$$\varphi k \frac{dT}{dx} \Big|_0^L - \int_0^L k \frac{d\varphi}{dx} \frac{dT}{dx} dx + \int_0^L \varphi Q dx = 0 \quad (1.22)$$

Όμως,

$$\varphi k \frac{dT}{dx} \Big|_0^L = \varphi(L) k(L) \frac{dT}{dx}(L) - \varphi(0) k(0) \frac{dT}{dx}(0) \quad (1.23a)$$

Καθώς $\varphi(0) = 0$ και $q = -k(L)(dT(L)/dx) = h(T_L - T_\infty)$, παίρνουμε

$$\varphi k \frac{dT}{dx} \Big|_0^L = -\varphi(L) h(T_L - T_\infty) \quad (1.23b)$$

Επομένως, η Εξ.1.22 γίνεται

$$-\varphi(L) h(T_L - T_\infty) - \int_0^L k \frac{d\varphi}{dx} \frac{dT}{dx} dx + \int_0^L \varphi Q dx = 0 \quad (1.24)$$

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε τις ισοπαραμετρικές σχέσεις $\mathbf{T} = \mathbf{N}\mathbf{T}^e$, κ.λπ., που ορίζουν οι Εξ. 1.14-1.19. Επομένως, ένα ολικό διάνυσμα δυνατής θερμοκρασίας ορίζεται ως $\mathbf{\Psi} = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_L]^T$ ενώ η συνάρτηση ελέγχου εντός κάθε στοιχείου παρεμβάλλεται ως

$$\varphi = \mathbf{N}\mathbf{\Psi} \quad (1.25)$$

Κατ'αναλογία με την $dT/dx = \mathbf{B}_T \mathbf{T}^e$ στην Εξ. 1.18β, έχουμε

$$\frac{d\varphi}{dx} = \mathbf{B}_T \mathbf{\Psi} \quad (1.26)$$

Αρα, η Εξ. 1.24 γίνεται

$$\begin{aligned} & -\Psi_L h(T_L - T_\infty) - \sum_e \mathbf{\Psi}^T \left(\frac{k_e l_e}{2} \int_{-1}^1 \mathbf{B}_T^T \mathbf{B}_T d\xi \right) \mathbf{T}^e + \sum_e \mathbf{\Psi}^T \frac{Q_e l_e}{2} \int_{-1}^1 \mathbf{N}^T d\xi \\ & = 0 \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$-\Psi_L h T_L + \Psi_L h T_\infty - \mathbf{\Psi}^T \mathbf{K}_T \mathbf{T} + \mathbf{\Psi}^T \mathbf{R} = 0 \quad (1.28)$$

η οποία πρέπει να ικανοποιείται για όλα τα $\mathbf{\Psi}$ με $\Psi_1 = 0$.

Συνθέτουμε λοιπόν τα ολικά μητρώα $\mathbf{K}_T$ και $\mathbf{R}$ από τα μητρώα των στοιχείων $\mathbf{k}_T$ και $\mathbf{r}_Q$, όπως δίνονται στην ακόλουθη μορφή

$$\mathbf{k}_T = \frac{k_e}{l_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

$$\mathbf{r}_Q = \frac{Q_e l_e}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (1.30)$$

Όταν επιλέγουμε κάθε $\mathbf{\Psi}$ με τη σειρά ως $[0, 1, 0, \dots, 0]^T$, $[0, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$, ..., $[0, 0, \dots, 0, 1]^T$ και καθώς $T_1 = T_0$, τότε η Εξ. 1.28 δίνει

$$\begin{bmatrix} K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2L} \\ K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{L2} & K_{L3} & \cdots & (K_{LL} + h) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ T_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ (R_L + hT_\infty) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} K_{21}T_0 \\ K_{31}T_0 \\ \vdots \\ K_{L1}T_0 \end{Bmatrix} \quad (1.31)$$

Παρατηρούμε ότι μπορούμε να λύσουμε την Εξ. 1.31 για $T_2, T_3, \dots, T_L$. Επομένως, παρατηρούμε ότι η προσέγγιση Galerkin, κανονικά, οδηγεί στη μέθοδο απαλοιφής για το χειρισμό μη μηδενικά καθορισμένης θερμοκρασίας $T = T_0$ στον κόμβο 1. Ωστόσο, είναι επίσης δυνατό να αναπτύξουμε τη μέθοδο Galerkin με μια προσέγγιση ποινής (Εξ.1.33) για να λάβουμε υπόψη τη δεδομένη συνοριακή συνθήκη $T_1 = T_0$, το οποίο το προσθέτουμε στη θέση (1, 1) του $\mathbf{K}$ και το CT_0 στη πρώτη γραμμή του $\mathbf{R}$, στην περιπτωσή μας. Καθώς στο προβλημά μας δεν υπάρχει παραγωγή θερμότητας Q , το διάνυσμα ρυθμού μεταφοράς θερμότητας $\mathbf{R}$ θα αποτελείται μόνο από το hT_∞ στην τελευταία γραμμή και του CT_0 στη πρώτη γραμμή. Σε αυτή την περίπτωση, οι εξισώσεις δίνονται από την

$$\begin{bmatrix} (K_{11} + C) & K_{12} & \cdots & K_{1L} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{L1} & K_{L2} & \cdots & (K_{LL} + h) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (R_1 + CT_0) \\ R_2 \\ \vdots \\ (R_L + hT_\infty) \end{Bmatrix} \quad (1.32)$$

Όπου για τη προσέγγιση ποινής το C επιλέχθηκε με βάση την ακόλουθη σχέση

$$C = \max|K_{ij}| \times 10^4 \quad (1.33)$$

Κεφάλαιο 3

Η θερμομόνωση του κτιρίου

3.1 Εισαγωγή

3.1.1 Η αναγκαιότητα της θερμομόνωσης

Με την πρόβλεψη θερμομόνωσης στις κτιριακές κατασκευές παίρνονται τα κατάλληλα μέτρα για την παρεμπόδιση της διαφυγής της θερμικής ενέργειας από ένα χώρο προς την ατμόσφαιρα ή ένα άλλο, ψυχρότερο γειτονικό χώρο. Η θερμομόνωση έχει στόχο να περιορίζει στο ελάχιστο τις ανταλλαγές θερμότητας εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος και να επιτύγχανει τη δημιουργία ενός ευχάριστου εσωκλίματος με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Η κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης δεν αποτελούσε πρόβλημα, μέχρι τη στιγμή που η ενεργειακή κρίση έγινε για όλους μία σκληρή πραγματικότητα. Οι ενεργειακές πηγές, κυρίως το πετρέλαιο έπαψαν να είναι φτηνές και όλοι, τότε, άρχισαν να συνειδητοποιούν τη μεγάλη σημασία που είχε η θερμομόνωση στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Κάτω από συνθήκες οικονομικά προσιτές, μια καλή θερμική μόνωση θα πρέπει να εξασφαλίζει:

- Την υγιεινή, άνετη κι ευχάριστη διαβίωση, χωρίς να διαταράσσεται το θερμικό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος και να προκαλούνται σοβαρές θερμικές αλληλοεπιδράσεις κρύου ή ζέστης ανάμεσα σ' αυτό και στο χώρο που το περιβάλλει. Το θερμικό ισοζύγιο είναι αυτό που κυρίως καθορίζει το αίσθημα άνεσης του ανθρώπινου οργανισμού.
- Την οικονομία στην κατανάλωση ενέργειας, με τον περιορισμό των θερμικών απωλειών των εσωτερικών χώρων.
- Τον περιορισμό του αρχικού κόστους κατασκευής της εγκατάστασης του συστήματος κεντρικής θέρμανσης ή κλιματισμού.
- Την αποφυγή των προβλημάτων που μπορεί να προκαλέσουν οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, όπως είναι η διάρρηξη των σωληνώσεων του νερού από τον παγετό, η αποκόλληση κατασκευών από την επίδραση των υδρατμών κ.λπ.
- Την ταυτόχρονη προστασία από τους θορύβους, αφού τα περισσότερα από τα θερμομονωτικά υλικά είναι και ηχομονωτικά. Έτσι μία μελέτη θερμομόνωσης θεωρείται απόλυτα σωστή όταν η θερμική και ηχητική μόνωση συνδυάζονται σε μία και μόνη κατασκευή.

- Τη βελτίωση της προστασίας του περιβάλλοντος γενικότερα, αφού ελαττώνοντας την ποσότητα των εκλυόμενων καυσαερίων μειώνεται αντίστοιχα, η ρύπανση της ατμόσφαιρας.

Παράλληλα όμως συμβάλλει:

- Στην αποταμίευση θερμότητας με την εκμετάλλευση της θερμοχωρητικότητας των υλικών.
- Στη μείωση των πιθανοτήτων σχηματισμού εσωτερικής συμπύκνωσης λόγω διάχυσης των υδρατμών μέσω των δομικών στοιχείων των κατασκευών.
- Στη διατήρηση υψηλών εσωτερικών επιφανειακών θερμοκρασιών και στην αποτροπή εμφάνισης δρόσου σε αυτές.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο περιορισμός των θερμικών φορτίων οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της απαιτούμενης θερμικής ισχύος. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε σωστά θερμομονωμένα κτήρια, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να είναι 20 - 40% μικρότερη από την ενεργειακή κατανάλωση ενός κτηρίου χωρίς θερμομόνωση.

3.1.2 Οι θερμικές απώλειες και η προέλευσή τους

Θερμικές απώλειες προκαλούνται σε ένα κτίριο από τη μετάδοση της θερμότητας του αέρα ενός εσωτερικού χώρου προς την ατμόσφαιρα ή προς ψυχρότερους γειτονικούς χώρους ή και αντίστροφα. Είναι γνωστό ότι, ανάμεσα σε δύο σώματα με διαφορετικές θερμοκρασίες, προκαλείται μια συνεχής ροή θερμότητας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο. Έτσι, οι θερμικές απώλειες δεν νοούνται μόνο για την απώλεια της ζέστης ενός χώρου το χειμώνα αλλά και της δροσιάς το καλοκαίρι, όταν ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι θερμότερος. Αυτή η ροή θερμότητας είναι αδύνατο να εμποδιστεί τελείως και μπορεί, μόνο, να περιοριστεί ως προς την ένταση και τη διάρκεια της. Αυτό είναι κατορθωτό μόνο όταν υπάρχει έλεγχος των θερμικών απωλειών.

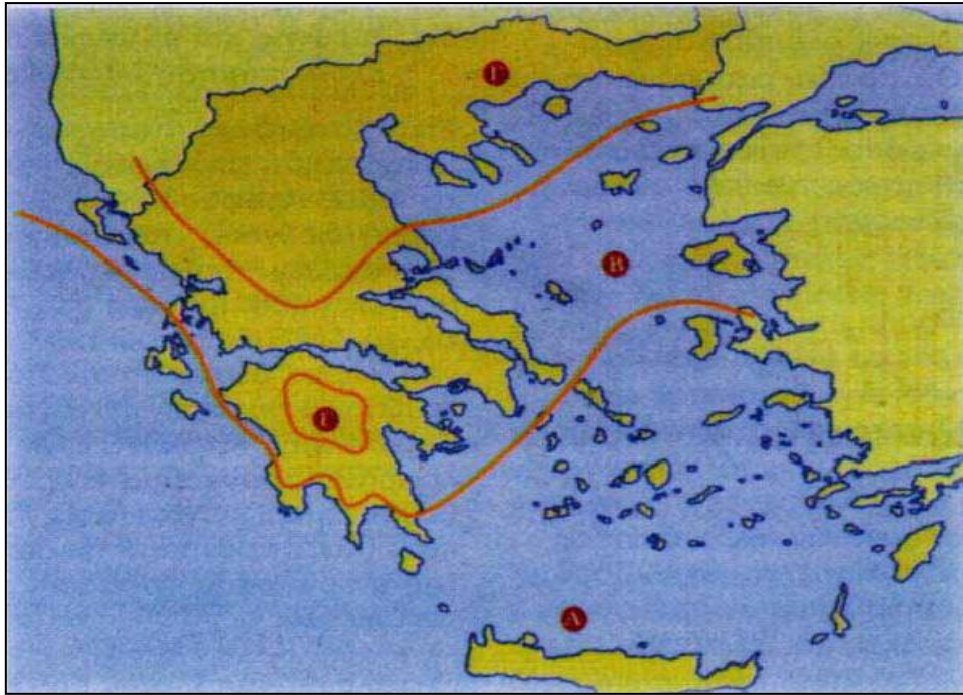
Η θερμομόνωση λοιπόν εξασφαλίζει αυτόν τον έλεγχο των θερμικών απωλειών μέσω της μείωσης της ταχύτητας ροής της θερμότητας από ή προς ένα χώρο. Θεωρητικά μπορούμε να μηδενίσουμε τη ροή της θερμότητας αυξάνοντας το πάχος του θερμομονωτικού υλικού. Αυτό όμως σημαίνει αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων (κόστος χώρου) και αύξηση της ποσότητας του μονωτικού υλικού (κόστος υλικού). Σε κεντρικές κτιριακές εγκαταστάσεις το συνολικό πάχος των τοιχωμάτων έχει τεράστια οικονομική σημασία, γιατί είναι πολύ μεγάλο το κόστος του διατιθέμενου ωφέλιμου εμβαδού. Στις περιπτώσεις αυτές δικαιολογείται η χρήση ισχυρών μονωτικών υλικών υψηλού κόστους, γιατί προέχει η εξοικονόμηση χώρου. Όταν το πρόβλημα του χώρου δεν είναι βασικό, αναζητείται ο αποδεκτός συσχετισμός κόστους κατασκευής και εξοικονόμησης ενέργειας.

Εκτός όμως από την αύξηση των δαπανών κατασκευής του κτιρίου, η θερμομόνωση μειώνει τις θερμικές απώλειες των εσωτερικών χώρων ενός κτιρίου, γεγονός που έχει ως συνέπεια τη μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων που τροφοδοτούν τα διάφορα τεχνητά συστήματα θέρμανσης - ψύξης. Η μείωση αυτή μπορεί να είναι σημαντική, αρκεί η θερμομόνωση να εφαρμόζεται με βάση μια σωστή μελέτη και τις ακριβείς προδιαγραφές που καθορίζουν τις ιδιότητες και τον τρόπο σύνθεσης των υλικών κατασκευής της. Ενδεικτικό του γεγονότος αυτού είναι ότι μια σωστή θερμομόνωση που απαιτεί περίπου το 2 - 5% του αρχικού κόστους κατασκευής του κτηρίου, μπορεί να εξοικονομήσει μέχρι και το 50% του κόστους λειτουργίας της θέρμανσής του. Στις περισσότερες χώρες με ψυχρότερα κλίματα τέτοιες προδιαγραφές ισχύουν εδώ και πολλά χρόνια.

Ένα προσεκτικά μονωμένο κτίριο με την απαιτούμενη από τους ισχύοντες κανονισμούς θερμομόνωση, καλύπτει εν γένει τις ανάγκες ενός σωστά σχεδιασμένου από ενεργειακή άποψη κτιρίου, αρκεί να προσεχθεί η μόνωση όλων των δομικών στοιχείων ώστε να αποφεύγονται οι θερμογέφυρες (αμόνωτα ή περιορισμένης μονωτικής ικανότητας στοιχεία του κελύφους), οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν «ευαίσθητα» σημεία στην οικοδομή, ακόμα και συμπτύκνωση υδρατμών.

Στη χώρα μας ισχύει, σύμφωνα με το Π.Δ. 362//4/7/79, ο "Κανονισμός Θερμομόνωσης των Κτιρίων" [3], με τον οποίο γίνεται προσπάθεια, με βάση τη διεθνή πρακτική και τις κλιματολογικές συνθήκες της Ελλάδας, να καθοριστούν προδιαγραφές που να εξασφαλίζουν μία τεχνοοικονομικά σωστή θερμομόνωση. Τέτοια θεωρείται αυτή που για να γίνει δεν απαιτείται υπερβολικά μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης και που, ωστόσο, εξασφαλίζει μακροχρόνια οικονομία στη χρήση του κτιρίου και περιορισμό στην εφαρμογή ενεργοβόρων τεχνητών συστημάτων ελέγχου του εσωτερικού περιβάλλοντος.

Η Ελλάδα σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης χωρίζεται σε τρεις ζώνες με βάση τις κλιματολογικές συνθήκες στη χώρα. Η ζώνη Α χαρακτηρίζεται από ήπιο κλίμα με αποτέλεσμα τα κτίρια να έχουν μεγάλες ανάγκες σε ψύξη και λιγότερες σε θέρμανση. Στη ζώνη Β τα κτίρια έχουν τις ίδιες ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη ενώ στη ζώνη Γ τα κτίρια έχουν μεγάλες ανάγκες σε θέρμανση και μικρότερες σε ψύξη.



Σχήμα 3.1: Οι κλιματικές ζώνες της Ελλάδας

3.2 Οι βασικές αρχές της θερμομόνωσης

Οι βασικές αρχές της θερμομόνωσης [4], από τις οποίες εξαρτάται η μελέτη και η σωστή εφαρμογή της σε ένα κτιριακό έργο, είναι:

α. Η **θερμομονωτική ικανότητα**, δηλαδή η αντίσταση θερμοδιαφυγής ($1/\Lambda$) των στοιχείων κατασκευής. Αυτή εξαρτάται από τις ιδιότητες των βασικών υλικών που συνθέτουν μια κατασκευή θερμομόνωσης, δηλαδή:

- τη θερμική τους αγωγιμότητα (συντελεστής λ),
- την περιεκτικότητα τους σε υγρασία και
- το πάχος τους

β. Ο **βαθμός διαπερατότητας** του αέρα των στοιχείων κατασκευής, που εξαρτάται από:

- Το είδος της κατασκευής που διαμορφώνει το περίβλημα ενός χώρου. Τοίχοι και οροφές επενδυμένοι με επίχρισμα μαρμαροκονίας έχουν, γενικά, μικρή διαπερατότητα αέρα και, επομένως, μικρές απώλειες θερμότητας από θερμική μεταφορά.
- Την επιφάνεια των κουφωμάτων και τον τρόπο συναρμογής τους. Μεγάλες ποσότητες θερμότητας χάνονται από τις πόρτες και τα παράθυρα μιας όψης, ανάλογα με το μέγεθος των υαλοπινάκων και τον τρόπο κατασκευής τους. Έτσι, τα μεγάλα ανοίγματα με υαλοπίνακες μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας παρουσιάζουν πολλές θερμικές απώλειες. Το ίδιο συμβαίνει με τους αρμούς επαφής μεταξύ των φύλλων και του πλαισίου ενός κουφώματος. Το γεγονός αυτό κάνει τα παράθυρα και τις πόρτες να εμφανίζουν υπερβολικά μεγάλο

συντελεστή θερμοπερατότητας (k), γιατί οι θερμικές απώλειες, όπως αναφέρθηκε, προκαλούνται όχι μόνο από θερμική αγωγιμότητα αλλά και από θερμική μεταφορά.

γ. Η **θερμοχωρητικότητα** (Q) των στοιχείων της κατασκευής, που συμβάλλει στον περιορισμό της ταχύτητας μεταβολής της αρχικής κατάστασης της θερμοκρασίας. Όταν οι τοίχοι και οι οροφές έχουν μεγάλη θερμοχωρητική ικανότητα, η θερμότητα που συγκεντρώνουν όσο λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης αποβάλλεται όταν αυτό σταματήσει, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η γρήγορη ψύξη των χώρων. Το αντίστοιχο συμβαίνει με την ψύξη το καλοκαίρι. Ανάλογα με τη θέση της μόνωσης (στην εξωτερική ή εσωτερική επιφάνεια) οι τοίχοι και οι οροφές ενεργούν ως:

- Συσσωρευτές θερμότητας, όταν η θερμική μόνωση τοποθετείται στην εξωτερική τους επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή, συσσωρεύουν επί ένα μεγάλο χρονικό διάστημα τη θερμότητα, για να την αποβάλλουν και πάλι με ακτινοβολία. Με τη διαδικασία αυτή αυξάνεται, αντίστοιχα, η διάρκεια μεταβολής των συνθηκών θερμοκρασίας σε χώρους στους οποίους είναι απαραίτητο να υφίσταται το αίσθημα της θερμικής άνεσης (κατοικίες, χώροι εργασίας κ.λπ.) και
- Φράγμα προστασίας, όταν η θερμική μόνωση τοποθετείται στην εσωτερική τους επιφάνεια, στις περιπτώσεις που δεν ενδιαφέρει η διάρκεια αποθήκευσης ή απόψυξης των χώρων αλλά, αντίθετα η προστασία των κατασκευών από τη θερμότητα ή την ψύξη που αναπτύσσεται μέσα στους χώρους αυτών.

δ. Οι τιμές των συντελεστών **θερμικής αγωγιμότητας** και **αντίστασης θερμοδιαφυγής** των διαφόρων υλικών που συγκροτούν μια κατασκευή. Οι τιμές αυτές είναι παγκόσμια αποδεκτές (βλ. Παράρτημα Α, Πίνακας 1), όπως τις έχει καθορίσει ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO), και αφορούν:

- τη θερμική αγωγιμότητα (λ) των πιο συνηθισμένων οικοδομικών υλικών και
- την αντίσταση θερμοδιαφυγής ($1/\Lambda$) των στρωμάτων αέρος, ανάλογα με το πάχος τους.

ε. Οι **απαιτήσεις θερμομόνωσης** που επιβάλλει ο Κανονισμός Θερμομόνωσης. Αυτές αφορούν κυρίως τον καθορισμό:

- των ελάχιστων θερμοκρασιών χώρων, για τις οποίες εξασφαλίζονται άνετες συνθήκες διαβίωσης μέσα στους χώρους ενός κτιρίου, ανάλογα με τη χρήση τους (βλ. Παράρτημα Α, Πίνακας 2),
- της οικονομικά βέλτιστης θερμομόνωσης, ώστε να μειώνονται σημαντικά οι δαπάνες θέρμανσης, αλλά και να αποφεύγονται άσκοπες δαπάνες υπερβολικής θερμικής προστασίας.

3.3 Τα θερμομονωτικά υλικά

3.3.1 Ιδιότητες - Χαρακτηριστικά

Τα θερμομονωτικά υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ως προς τη μορφή, την προέλευση και τις μονωτικές τους δυνατότητες. Κοινό βέβαια χαρακτηριστικό τους αποτελεί η μικρή τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (συνήθως $\lambda < 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$), που συνήθως αναφέρεται σε θερμοκρασίες φυσικού περιβάλλοντος και σε στεγνό υλικό (απαλλαγμένο υγρασίας).

Όμως κάθε μονωτικό έχει ειδικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που προκαθορίζουν τα όρια σωστής εφαρμογής του. Υπάρχουν π.χ. περιπτώσεις που ζητούμε από το υλικό ακαμψία και άλλες που ζητούμε ελαστικότητα. Σε πολλές περιπτώσεις η μικρή διαπερατότητα σε υδρατμούς (μ) είναι βασικό προσόν και άλλοτε όχι. Άλλες ιδιότητες που μπορεί να απαιτούνται ή όχι είναι: μεγάλη σκληρότητα, πυροπροστασία, μεγάλη διάρκεια ζωής, η δυνατότητα να μην επηρεάζεται από δονήσεις, η μη προσβολή από έντομα και τρωκτικά, η παράλληλη ηχομονωτική ικανότητα κ.λπ.

Τα θερμομονωτικά υλικά οφείλουν τη μονωτική τους ιδιότητα, κατά κύριο λόγο, σε μεγάλο αριθμό πολύ μικρών πόρων (κυψελίδων) που περιέχουν παγιδευμένο αέρα. Ο ακίνητος αέρας, όπως ήδη αναφέρθηκε, παρουσιάζει τη μικρότερη γνωστή τιμή θερμικής αγωγιμότητας ($\lambda = 0,021 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$). Η παρουσία σημαντικού αριθμού κυψελίδων αέρα στο εσωτερικό ενός υλικού, έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μικρού φαινομένου βάρους που είναι ένα δεύτερο κοινό χαρακτηριστικό των θερμομονωτικών υλικών [6].

Οι θερμομονωτικές ιδιότητες ενός υλικού επηρεάζονται από τη **θερμοκρασία** και την **υγρασία**. Ειδικά η υγρασία αποτελεί σημαντικό πρόβλημα γιατί εκτοπίζοντας τον αέρα μπορεί να γεμίσει τους πόρους του μονωτικού υλικού, καταστρέφοντας, προσωρινά ή οριστικά, τις μονωτικές του ιδιότητες. Βέβαια δεν αποτελεί ρεαλιστική λύση η αναζήτηση αδιάβροχων μονωτικών υλικών. Τις περισσότερες φορές αρκούμαστε σε υλικά που δεν εμφανίζουν έντονη τάση απορρόφησης νερού (υγροσκοπικότητα) ή χρησιμοποιούνται κατασκευαστικές λύσεις που εξασφαλίζουν την προστασία των μονωτικών υλικών από την υγρασία.

Όπως ήδη αναφέρθηκε σε μικρότερο βαθμό μας ενδιαφέρουν άλλες ιδιότητες των μονωτικών υλικών όπως η μηχανική αντοχή (σε θλιπτικά φορτία), η σταθερότητα του όγκου τους, η ανθεκτικότητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας (ιδίως όταν γίνεται παράλληλη προσπάθεια πυροπροστασίας) και η διάρκεια ζωής τους. Ειδικά το θέμα της αντοχής σε φορτία πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στην περίπτωση που το θερμομονωτικό δομικό υλικό ανήκει στα φέροντα στοιχεία της οικοδομής (π.χ. θερμομονωτικά τούβλα).

Ακόμα πρέπει να τονιστεί πως η εκλογή ενός θερμομονωτικού υλικού σχετίζεται άμεσα και με παράγοντες που δεν περιλαμβάνονται στις φυσικές του ιδιότητες, όπως είναι το κόστος αγοράς, η επάρκεια του στην αγορά, καθώς και οι δυνατότητες μεταφοράς και σωστής τοποθέτησης.

• Θερμοκρασία

Είναι λάθος να χρησιμοποιείται ένα μονωτικό υλικό σε θερμοκρασία πάνω από 60°C ή κάτω από 0°C (ψυκτικές εγκαταστάσεις), χωρίς να εξεταστεί η ειδική συμπεριφορά του σε κάθε περίπτωση. Κατά τη χρήση θερμομονωτικών υλικών στις οριακές τους θερμοκρασίες παρατηρείται αλλοίωση της υφής του υλικού, θραύση των κυψελών αέρα, συρρίκνωση των ινών και μείωση της αντίστασης θερμοδιαφυγής. Χαρακτηριστικό πρόβλημα των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε ψυκτικές εγκαταστάσεις είναι η «εφίδρωση», που συνίσταται στη συμπύκνωση υδρατμών στην επιφάνεια ή το εσωτερικό, όταν δεν εφαρμοστούν ειδικά μέτρα προστασίας από τη διείσδυση ατμοσφαιρικού αέρα (π.χ. τοποθέτηση φράγματος υδρατμών).

Η μετατροπή της υγρασίας σε πάγο προκαλεί την καταστροφή (αποσάρθρωση) των μονωτικών υλικών. Αλλά και η απλή παρουσία υγρασίας μέσα στους πόρους μονωτικού υλικού μειώνει σημαντικά τις δυνατότητες του.

• Υγρασία

Η υγρασία εξουδετερώνει τις θερμομονωτικές ικανότητες των μονωτικών υλικών και προκαλεί σοβαρά προβλήματα στο κτίριο. Όταν δηλαδή ένα τοίχωμα επιτρέπει τη διείσδυση υγρού αέρα από τους εσωτερικούς χώρους, παρατηρείται συμπύκνωση (υγροποίηση) υδρατμών στο εσωτερικό του. Το συμπύκνωμα αυτό μένει μέσα στο υλικό σαν νερό που η ποσότητα του συνεχώς αυξάνει, γιατί κάθε τόσο διεισδύει νέα ποσότητα αέρα άρα και υγρασίας. Συνήθως το νερό αυτό συγκεντρώνεται στην περιοχή του μονωτικού. Αν η θερμοκρασία στο τοίχωμα γίνει πολύ μικρή σχηματίζεται στο μονωτικό υλικό πάγος, που ολοκληρώνει την καταστροφή του μονωτικού δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα και στο σύνολο της δομικής κατασκευής. Όλα αυτά τα προβλήματα παρακάμπτονται με την τοποθέτηση ενός «φράγματος υδρατμών» μεταξύ του μονωτικού και του τοιχώματος (στην πλευρά του μονωτικού προς το εσωτερικό του θερμαινόμενου κτιρίου). Το φράγμα υδρατμών μπορεί να είναι μια πλαστική μεμβράνη, ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο ή ασφαλτόχαρτο, που χρησιμοποιήθηκε και σ' αυτή την εργασία.

Τα ινώδη μονωτικά υλικά (υαλοβάμβακας, πετροβάμβακας, σκωριοβάμβακας) κατακρατούν μικρή ποσότητα υγρασίας ακόμη και όταν βρεθούν σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας μέχρι και 95%. Ιδιαίτερες χρήσιμες παρατηρήσεις για την επίδραση της υγρασίας στα υλικά αυτά είναι οι ακόλουθες:

- Για περιβάλλον σχετικής υγρασίας από 10 μέχρι 80% η κύρια επίδραση εξαρτάται από τη συνδετική ύλη (κόλα, ποσοστό και φύση).
- Πάνω από σχετική υγρασία 80% αρχίζει να γίνεται αισθητή η επίδραση της υγρασίας γιατί σχηματίζονται σταγονίδια.
- Πάνω από σχετική υγρασία 90% γίνεται εμφανής η επίδραση της υγρασίας στις θερμικές ιδιότητες του μονωτικού υλικού.

Τέλος, τα μονωτικά υλικά διαχωρίζονται συνήθως ανάλογα με την ανόργανη ή οργανική προέλευση τους και την επεξεργασία που υφίστανται πριν από τη χρήση. Οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται είναι ανόργανα υλικά, οργανικά υλικά και σκυροδέματα.

3.3.2 Υαλοβάμβακας – Υαλόμαλλο

Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε ως θερμομονωτικό υλικό ο υαλοβάμβακας, που ανήκει στην κατηγορία των ανόργανων υλικών. Χαρακτηρίζεται ως ένα ινώδες μονωτικό υλικό ορυκτής προέλευσης (γυαλί). Προσφέρεται σε μεγάλη ποικιλία ως προς τη μορφή (ρόλλοι, πλάκες, κογγύλια, χύμα και κορδόνια) δίνοντας για πολλές περιπτώσεις ένα καλό συσχετισμό θερμομόνωσης, κόστους αγοράς και τοποθέτησης.

Μερικοί από τους λόγους που επιλέχθηκε ο υαλοβάμβακας είναι ότι δε φθείρεται με την πάροδο του χρόνου, είναι άοσμος, δεν προσβάλλεται από καυστικά οξέα (εκτός του υδροχλωρικού), δεν καταστρέφεται από έντομα και τρωκτικά και δεν καίγεται. Ακόμη δεν είναι υγροσκοπικός, αλλά καταστρέφονται οι μονωτικές του ιδιότητες όταν εμποτιστεί με υγρασία.

Όπως σε όλα τα ινώδη μονωτικά υλικά όσο μικρότερο είναι το πάχος των ινών τόσο περισσότερες είναι οι ίνες και τόσο καλύτερο μονωτικό υλικό προκύπτει. Υαλοβάμβακας με μικρή διάμετρο και μεγάλο μήκος ινών, χωρίς ξένες προσμίξεις και απουσία κόμβων φέρεται στο εμπόριο με την ονομασία υαλόμαλλο και προσφέρεται σαν υαλοβάμβακας αυξημένης θερμομονωτικής ικανότητας.

Ο υαλοβάμβακας τοποθετείται σε τοίχους, δάπεδα και στην οροφή του κτιρίου. Στους τοίχους τοποθετείται ενδιάμεσα (π.χ. ανάμεσα σε δυο σειρές τούβλων), εξωτερικά της οπτοπλινθοδομής και στη συνέχεια καλύπτεται με μάρμαρο ή άλλο οικοδομικό υλικό ή εσωτερικά, οπότε πάλι καλύπτεται με ξύλο ή γυψοσανίδες [6].

3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διάφορων τεχνικών θερμομόνωσης

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τέσσερις βασικότερες τεχνικές θερμομόνωσης:

I. Τοποθέτηση μονωτικού υλικού στην εσωτερική του τοίχου.

Στην περίπτωση αυτή το μονωτικό υλικό τοποθετείται στην εσωτερική πλευρά του τοίχου και καλύπτεται με γυψοσανίδα ή ορθοδρομική τοιχοποιία. Κατόπιν ακολουθεί το βάψιμο της γυψοσανίδας ή το σοβάτισμα (επίχρισμα) και βάψιμο της τοιχοποιίας.



Σχήμα 3.2: Εσωτερική θερμομόνωση τοίχου [9]

Η τεχνική αυτή αποτελεί τον οικονομικότερο τρόπο θερμομόνωσης. Στα πλεονεκτήματα της συμπεριλαμβάνονται η μικρή χρονική διάρκεια και ο απλός τρόπος κατασκευής. Επίσης ο χώρος θερμαίνεται σε μικρό χρονικό διάστημα και τέλος δε χρειάζεται να προστατευτεί η μόνωση από εξωτερικές επιδράσεις.

Ωστόσο παρουσιάζει και αρκετά μειονεκτήματα που συνοψίζονται κυρίως στον περιορισμό του εσωτερικού χώρου, στη δύσκολη αντιμετώπιση των θερμογεφυρών αλλά και στην απώλεια θερμότητας των χώρων σε μικρό χρονικό διάστημα, αφού το μονωτικό υλικό εμποδίζει τη ροή της θερμότητας από μέσα προς τα έξω και έτσι μένει ανεκμετάλλευτη η θερμοχωρητικότητα του εξωτερικού τοίχου. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ο χώρος θερμαίνεται γρήγορα από το σύστημα θέρμανσης, αλλά και ψύχεται γρήγορα μετά τη διακοπή του. Ένα ακόμη πρόβλημα που προκύπτει εξαιτίας της συγκεκριμένης τεχνικής είναι οι συστολές και διαστολές που απειλούν τα δομικά στοιχεία λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών.

II. Τοποθέτηση μονωτικού υλικού στο εξωτερικό του τοίχου.

Στη τεχνική αυτή το μονωτικό δεν εμποδίζει τη ροή θερμότητας από μέσα προς τα έξω και έτσι αξιοποιείται η θερμοχωρητικότητα του τοίχου ώστε να μειώνεται ο ρυθμός αποβολής της θερμότητας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο χώρος αργεί να θερμανθεί από το σύστημα θέρμανσης, αλλά και αργεί να ψυχθεί μετά τη διακοπή του.



Σχήμα 3.3: Εξωτερική θερμομόνωση τοίχου [9]

Επίσης δεν περιορίζεται ο ωφέλιμος κατοικήσιμος χώρος και δεν εμποδίζεται η ομαλή λειτουργία του εσωτερικού χώρου κατά την κατασκευή της εσωτερικής θερμομόνωσης ενώ υπάρχει η δυνατότητα οι θερμογέφυρες να αντιμετωπιστούν. Τέλος σε σύγκριση με την τοποθέτηση θερμομόνωσης στο εσωτερικό των τοίχων, η συγκεκριμένη τεχνική προστατεύει τα δομικά στοιχεία από συστολές και διαστολές.

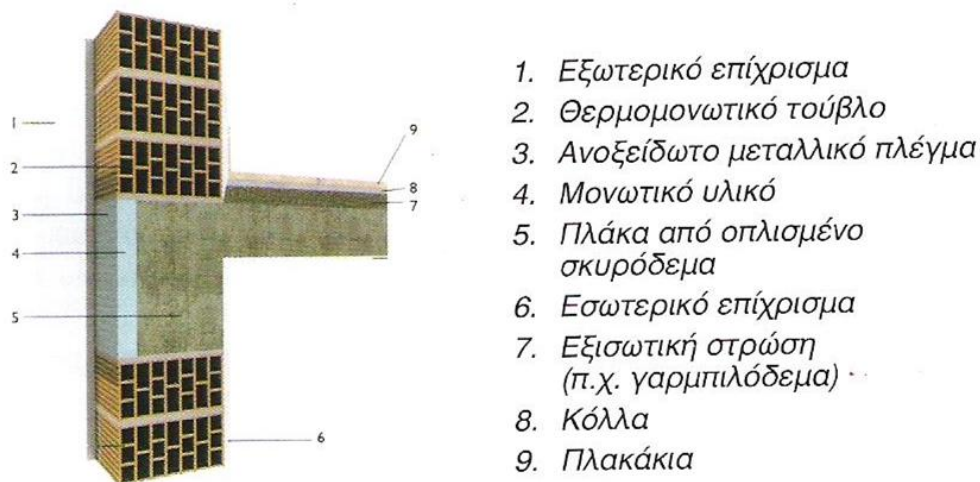
Παρόλα αυτά έχει υψηλότερο κόστος σε σχέση με την πρώτη τεχνική και παρουσιάζονται δυσκολίες στην τοποθέτησή της αν υπάρχουν προεξοχές στην αρχιτεκτονική του κτιρίου. Επίσης παρατηρείται αδυναμία της εφαρμογής της σε κτήρια με έντονο εξωτερικό μορφολογικό ενδιαφέρον όψεων. Εξίσου σημαντικά μειονεκτήματα είναι ότι η τοποθέτηση της απαιτεί σκαλωσιές και τα δομικά υλικά των στρώσεων της απαιτούν προστασία από τα καιρικά φαινόμενα.



Σχήμα 3.4: Τοποθέτηση εξωτερικής θερμομόνωσης

III. Θερμομόνωση με χρήση ειδικών τούβλων.

Η κατασκευή του τοίχου γίνεται από ειδικά θερμομονωτικά τούβλα τα οποία εξασφαλίζουν τις τιμές του συντελεστή θερμικής διαπερατότητας σύμφωνα με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης. Αν απαιτείται να αυξηθεί ο συντελεστής αυτός προστίθεται μονωτικό που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι εκ κατασκευής ενσωματωμένο στο θερμομονωτικό τούβλο. Κατόπιν τα τούβλα σοβατίζονται εσωτερικά και εξωτερικά. Πλεονέκτημα της τοιχοποιίας αυτής αποτελεί το γεγονός ότι εκμεταλλεύεται πλήρως τη θερμοχωρητικότητά της, αλλά προσβάλλεται εύκολα από την υγρασία, που προέρχεται από το νερό της βροχής. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να εξασφαλίζεται με σωστή κατασκευή των επιχρισμάτων η σωστή στεγανότητα ώστε να μην υγραίνεται η μάζα των θερμομονωτικών τούβλων και έτσι να μην παρέχεται σωστή θερμική προστασία.



Σχήμα 3.5: Τοίχος με θερμομονωτικά τούβλα [9]

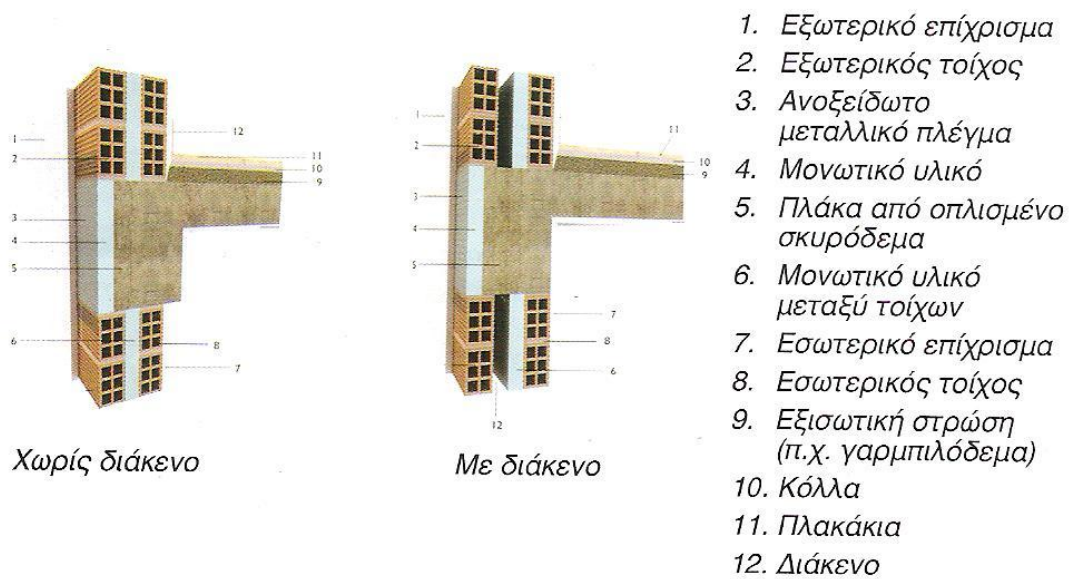


Σχήμα 3.6: Θερμομονωτικό τούβλο με μόνωση πολυουρεθάνης.

IV. Θερμομόνωση στον πυρήνα μεταξύ δύο τοίγων.

Η θερμομόνωση σε αυτή τη περίπτωση πραγματοποιείται με την τοποθέτηση του μονωτικού υλικού μεταξύ δύο δομικών τοίγων, συνήθως, και αυτό ίσως αποτελεί το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου. Εξασφαλίζεται μεν η θερμομόνωση, αλλά δεν είναι βέβαιο ότι εξασφαλίζεται επαρκώς και η στατική αντοχή του συστήματος και ιδιαίτερα η αντοχή που απαιτείται από τον αντισεισμικό κανονισμό.

Παραλλαγή του τρόπου αυτού, ειδικά για περιοχές με δύσκολες καιρικές συνθήκες, είναι η πρόβλεψη διάκενου πάχους 5 – 10 cm μεταξύ μονωτικού υλικού και εξωτερικού τοίχου. Η κατασκευή αυτού του τύπου θερμομόνωσης έχει περιθώρια βελτίωσης έστω και αν δημιουργηθούν στη χειρότερη περίπτωση θερμογέφυρες από την κατασκευή των σενάζ.



Σχήμα 3.5: Θερμομόνωση στον πυρήνα της τοιχοποιία [9]

Έχει μεγαλύτερο κόστος από την εσωτερική θερμομόνωση αλλά μικρότερο από την εξωτερική και αξιοποιεί μόνο τη θερμοχωρητικότητα του εσωτερικού τοίχου. Αποτελεί μέθοδο τοποθέτησης θερμομόνωσης που χρησιμοποιείται ευρέως στη χώρα μας.



Σχήμα 3.6: Τοποθέτηση θερμομόνωσης στον πυρήνα κατακόρυφου στοιχείου.

Συμπερασματικά:

- Σε υφιστάμενα κτίρια μπορεί να εφαρμοστεί μόνο εσωτερική και εξωτερική θερμομόνωση. Γενικά προτιμάται η εξωτερική εκτός αν δεν μπορεί να εφαρμοστεί (π.χ. όψεις με ιδιαίτερο αρχιτεκτονικό ανάγλυφο).
- Σε νέες κατασκευές επιλέγεται η εσωτερική θερμομόνωση μόνο όταν το κτίριο πρέπει να θερμαίνεται γρήγορα.

Κεφάλαιο 4

Η υγρομόνωση του κτιρίου

4.1 Η έννοια της υγρασίας

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι ένα μείγμα αζώτου, οξυγόνου, υδρατμών και διαφόρων άλλων αερίων. Οι υδρατμοί είναι νερό που έχει εξατμιστεί και σε αέρια πλέον κατάσταση περιέχεται στην ατμόσφαιρα. Η παρουσία υδρατμών μέσα στην ατμόσφαιρα ονομάζεται **υγρασία**. Η περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε υδρατμούς δεν είναι σταθερή. Εξαρτάται από τέσσερις παράγοντες: τη θερμοκρασία, τη πίεση και τη ταχύτητα κίνησης του ατμοσφαιρικού αέρα, αλλά και από τη διαθεσιμότητα των ελεύθερων επιφανειών νερού.

Η ποσότητα των υδρατμών στον ατμοσφαιρικό αέρα κυμαίνεται από το **μήδεν**, οπότε ο αέρας ονομάζεται **ξηρός**, μέχρι μία **μέγιστη** τιμή, οπότε στη περίπτωση αυτή ονομάζεται **κορεσμένος**. Όταν σε ένα χώρο υπάρχει διαθέσιμη ποσότητα νερού, ο ατμοσφαιρικός αέρας για κάθε θερμοκρασία του - μεγαλύτερη του μηδενός - μπορεί να παραλάβει μία ποσότητα νερού με τη μορφή υδρατμών. Όσο θερμότερος είναι ο αέρας, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα υδρατμών μπορεί να δεχθεί. Όταν η απορροφούμενη ποσότητα υδρατμών φθάσει σε μία μέγιστη τιμή τότε ο ατμοσφαιρικός αέρας βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού [5].

Η ποσότητα των υδρατμών που περιέχεται σε 1m^3 ατμοσφαιρικού αέρα ονομάζεται **απόλυτη υγρασία** ή **υγρασία** (w) και μετριέται σε gr/m^3 . Το πηλίκο της υγρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα (w) προς την υγρασία κορεσμού (w_s), για τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, εκφρασμένο σε ποσοστό (%) ονομάζεται **σχετική υγρασία** (ϕ). Είναι δηλαδή το πηλίκον της ποσότητας των υδρατμών που περιέχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, προς τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών που μπορεί να απορροφήσει (για τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης) όταν βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού, εκφρασμένο σε ποσοστό (%). Τέλος, η σχετική υγρασία ορίζεται ακόμη και σαν πηλίκο της πίεσης των υδρατμών του ατμοσφαιρικού αέρα (p_v) προς την αντίστοιχη πίεση στην κατάσταση κορεσμού (p_s).

Αν στην κατάσταση κορεσμού παρατηρηθεί μείωση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, ένα μέρος της υγρασίας (υδρατμών) θα εμφανισθεί με τη μορφή σταγόνων επάνω στις ψυχρότερες επιφάνειες του χώρου. Έχουμε δηλαδή το **φαινόμενο της συμπύκνωσης ή υγροποίησης των υδρατμών**. Όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία τόσο αυξάνεται η δυνατότητα του ατμοσφαιρικού αέρα να παραλάβει υδρατμούς, έχουμε δηλαδή αύξηση της υγρασίας κορεσμού και μείωση της σχετικής υγρασίας. Όσο μικραίνει η θερμοκρασία τόσο μειώνεται η δυνατότητα του ατμοσφαιρικού αέρα να παραλάβει υδρατμούς, έχουμε δηλαδή μείωση της υγρασίας κορεσμού, αύξηση της σχετικής υγρασίας και υγροποίηση των υδρατμών. Η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η υγροποίηση των υδρατμών (σταγόνες στις ψυχρές

επιφάνειες του χώρου), που περιέχονται σε μία ποσότητα ατμοσφαιρικού αέρα που ψύχεται, ονομάζεται **θερμοκρασία (σημείο) δρόσου** (t_s).

Ο Πίνακας 3 (βλ. Παράρτημα Α) δίνει τη μέγιστη ποσότητα υδρατμών (υγρασία κορεσμού) που μπορεί να περιέχεται σε $1m^3$ ατμοσφαιρικού αέρα για θερμοκρασίες από -20 ως $50^{\circ}C$ και την ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μίας επιφανείας του χώρου και του ατμοσφαιρικού αέρα, για να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών.

4.2 Τα είδη της υγρασίας

4.2.1 Υγρασία επιφανειακής συμπύκνωσης υδρατμών

Η εμφάνιση υγρασίας, υπό μορφή σταγόνων νερού, στις ψυχρές επιφάνειες του κελύφους ενός κτιρίου (τοίχοι, οροφή, παράθυρα) ονομάζεται φαινόμενο δρόσου ή ορατή υγροποίηση υδρατμών.

Η κατάσταση αυτή εμφανίζεται όταν η επιφανειακή εσωτερική θερμοκρασία των τοίχων είναι μικρότερη από το σημείο δρόσου του εσωτερικού αέρα, από τη χαμηλότερη, δηλαδή, θερμοκρασία που αρχίζουν να υγροποιούνται οι υδρατμοί και ο αέρας έχει σχετική υγρασία 100%.

Η προστασία των τοίχων από την υγρασία γίνεται με τη θερμομόνωση των τοίχων, με τον αερισμό και τη θέρμανση των χώρων.

4.2.2 Υγρασία εσωτερικής συμπύκνωσης υδρατμών

Η διέλευση ή διάχυση υδρατμών μέσα από δομικά στοιχεία μπορεί να γίνει με υγροποίηση ή χωρίς υγροποίηση των υδρατμών. Η απλή ροή των υδρατμών (χωρίς υγροποίηση) διαμέσου του κελύφους δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα. Αντιθέτως, σοβαρό πρόβλημα μπορεί να δημιουργηθεί μόνο αν οι υδρατμοί συναντήσουν μέσα στο κέλυφος κάποια περιοχή, που έχει θερμοκρασία **χαμηλότερη** από το σημείο δρόσου του αέρα. Τότε οι υδρατμοί θα μετατραπούν σε νερό και θα σχηματίσουν την υγρασία εσωτερικής συμπύκνωσης, η οποία θα εισχωρήσει στους πόρους των υλικών και θα τα καταστρέψει. Αυτό συμβαίνει διότι το νερό μεταδίδει 24 φορές περισσότερη θερμότητα από τον ακίνητο αέρα. Μπορεί, λοιπόν, εύκολα να καταστρέψει τα στοιχεία από ξύλο (σάπισμα), τα σίδερα (σκούριασμα), την οπτοπλινθοδομή (αποσάρθρωση) και τη μόνωση, αφού η παρουσία υγρασίας μειώνει τις θερμομονωτικές ιδιότητες των περισσότερων μονωτικών υλικών. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι ύπαρξη υγρασίας 5% στους τοίχους μπορεί να μειώσει τις μονωτικές ιδιότητες του οικοδομικού υλικού κατά 50%.

Η διέλευση υδρατμών μέσα από ένα δομικό στοιχείο είναι ένα εξισωτικό φαινόμενο, που οφείλεται στη διαφορά της πίεσης των υδρατμών στις δύο πλευρές του δομικού στοιχείου. Υπάρχει δηλαδή μία ροή υδρατμών από την πλευρά της μεγαλύτερης πίεσης προς την πλευρά της μικρότερης πίεσης, μέχρις ότου εξισωθούν οι πιέσεις των

υδρατμών. Εκτός όμως από τη ροή των υδρατμών έχουμε και ταυτόχρονη ροή ξηρού αέρα κατά αντίθετη φορά μέσα από το δομικό στοιχείο. Ο ξηρός αέρας καταλαμβάνει τη θέση των υδρατμών που μετακινήθηκαν και έτσι η πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα (ξηρός αέρας + υδρατμοί) παραμένει σταθερή.

Η ροή των υδρατμών γίνεται πάντοτε από θερμότερο προς το ψυχρότερο περιβάλλον. Έτσι το χειμώνα έχουμε ροή υδρατμών από το εσωτερικό των χώρων προς το περιβάλλον, ενώ το καλοκαίρι αλλά και στις ψυκτικές εγκαταστάσεις η ροή των υδρατμών γίνεται από το περιβάλλον προς το εσωτερικό των χώρων, όταν η σχετική υγρασία του αέρα είναι ίδια εσωτερικά και εξωτερικά. Οι υδρατμοί κινούνται, λοιπόν, όπως και η θερμότητα. Αν όμως μέσα και έξω από το κτίριο έχουμε ίδια θερμοκρασία και διαφορετικές σχετικές υγρασίες, οι υδρατμοί κατευθύνονται από την υψηλότερη προς την χαμηλότερη υγρασία (Σχ. 4.1).

Ο ρυθμός ροής των υδρατμών εξαρτάται από την αντίσταση του τοιχώματος στη διέλευση των υδρατμών. Εξαρτάται δηλαδή από τη φύση και το πάχος του υλικού. Επειδή ένα τοίχωμα αποτελείται από διαφορετικά στρώματα υλικών, κάθε ένα από τα οποία έχει διαφορετική αντίσταση, η ολική αντίσταση του τοιχώματος στη διάχυση των υδρατμών είναι το άθροισμα των επιμέρους αντιστάσεων των στρωμάτων.



Σχήμα 4.1: Ροή θερμότητας και υδρατμών μέσα από τόιχο

4.2.3 Αρχές προστασίας από την υγρασία

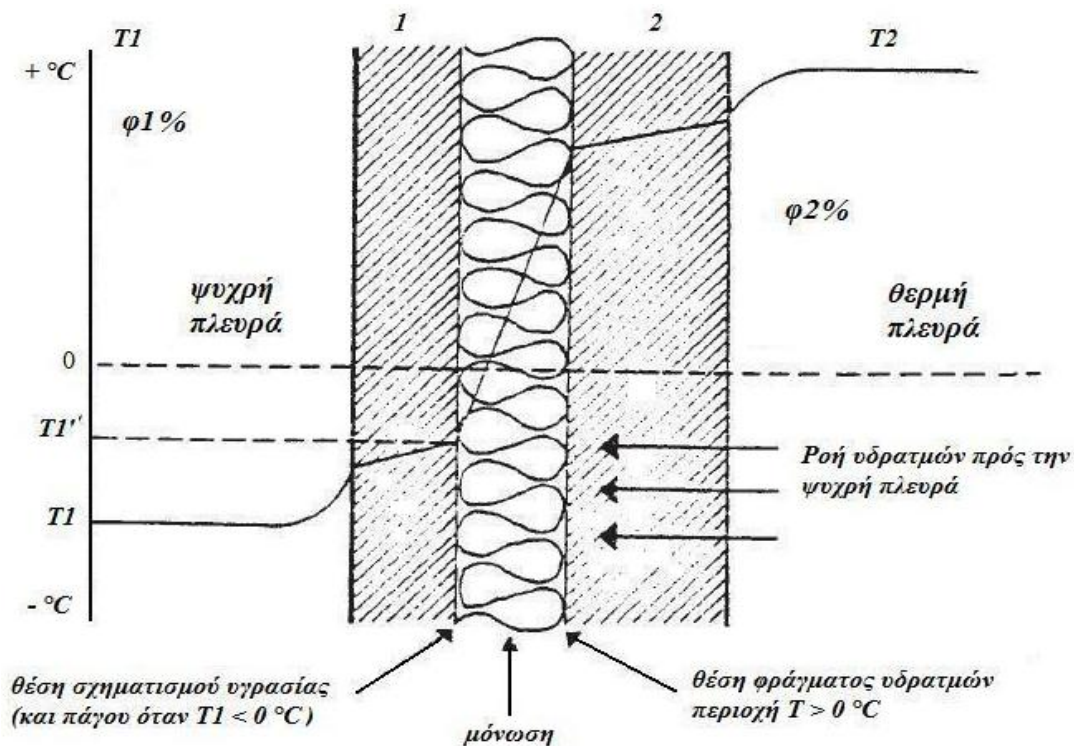
Η προστασία των τοίχων από την υγρασία γίνεται με την τοποθέτηση ενός **φράγματος υδρατμών** και με την χρήση υδρατμοδιαπερατού εξωτερικού επιχρίσματος (σοβάς) που ευνοεί την αναπνοή τους.

Το φράγμα υδρατμών έχει μεγάλη αντίσταση στη διέλευση των υδρατμών και μπορεί να είναι χρώμα αλουμινίου, γαλβανισμένη λαμαρίνα, ασφαλτόχαρτο, φύλλο αλουμινίου ή φύλλο πλαστικού (PVC).

Η θέση του φράγματος πριν ή μετά τη θερμομονωτική στρώση ευνοεί ή αποτρέπει το σχηματισμό εσωτερικής συμπύκνωσης λόγω της διάχυσης των υδρατμών, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου.

Η υγρασία λόγω συμπύκνωσης των διαχεόμενων υδρατμών στο εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου προκαλείται δυστυχώς πολλές φορές από άγνοια με την τοποθέτηση φράγματος υδρατμών στο εσωτερικό της εξωτερικής τοιχοποιίας. Οι ιδιοκτήτες αλλά και οι κατασκευαστές θέλοντας να παράσχουν μεγαλύτερη προστασία στις κατασκευές επιφορτίζουν τις τοιχοποιίες με επιπλέον υλικά που στη συνέχεια αποδυνκνούνται επιζήμια και καταστροφικά ή στην καλύτερη τουλάχιστον περίπτωση περιττά. Προκαλούν έτσι άνευ λόγου τη δημιουργία μιας πρόσκαιρης ή μόνιμης υγρασίας στο εσωτερικό του δομικού στοιχείου με αποτέλεσμα να προσβάλλονται τα υλικά κατασκευής στον πυρήνα της τοιχοποιίας και να περιορίζονται ή να εξαλείφονται οι θερμομονωτικές τους ιδιότητες [7].

Ανάλογα λοιπόν με την πορεία της διάχυσης των υδρατμών μπορεί να προκληθεί ή όχι συμπύκνωση. Ο γενικός κανόνας που πρέπει να ισχύει, είναι το φράγμα να τοποθετείται από τη **θερμή πλευρά** της θερμομονωτικής στρώσης (Σχ. 4.2). Αν όμως η θερμή πλευρά λόγω εσωτερικών κλιματικών συνθηκών ή χρήσης του χώρου δεν είναι πάντοτε η ίδια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, είναι προτιμότερο το φράγμα να αποφευχθεί ή να τοποθετηθεί και από τις δύο όψεις της θερμομονωτικής στρώσης. Για τα ελληνικά κλιματικά δεδομένα το φράγμα στο εσωτερικό ενός τοίχου μιας συμβατικής κατασκευής κατοικίας δεν έχει αποδειχθεί ότι είναι ούτε απαραίτητο ούτε σκόπιμο, απεναντίας είναι προτιμότερη η αποφυγή του [8].



Σχήμα 4.2: Θέση φράγματος υδρατμών

Εκτός από το φράγμα υδρατμών υπάρχουν και άλλοι τρόποι ώστε να αποφευχθεί η υγρασία στο κτίριο. Κάποιες βασικές αρχές προστασίας του κτιρίου από την υγρασία περιγράφονται παρακάτω:

1. Τα μονωτικά στρώματα που παρουσιάζουν μικρή αντίσταση στη διάχυση των υδρατμών πρέπει να τοποθετούνται κοντά στην εξωτερική πλευρά του τοιχώματος. Αντίθετα τα μονωτικά στρώματα μεγάλης αντίστασης πρέπει να τοποθετούνται κοντά στην εσωτερική πλευρά του τοιχώματος.
2. Η επιλογή των υλικών των διαφόρων στρωμάτων ενός τοιχώματος, πρέπει να γίνει κατά τρόπο ώστε να έχουμε σταδιακή μείωση της αντίστασης διάχυσης από μέσα προς τα έξω με παράλληλη αύξηση της θερμικής αντίστασης.
3. Αν σε ένα τοίχωμα τοποθετηθεί εξωτερικά φράγμα υδρατμών (π.χ. για προστασία από τη βροχή), θα πρέπει απαραίτητα να τοποθετηθεί και εσωτερικό φράγμα ίσης ικανότητας.
4. Μείωση της πίεσης των υδρατμών στους εσωτερικούς χώρους με τον αερισμό τους κατά τη χειμερινή περίοδο.

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογή της μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί εφαρμόσαμε τη μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Galerkin για μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας, σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις τοιχοποιίας. Η εφαρμογή της μεθόδου έγινε σε περιβάλλον Matlab. Αφού εισάγουμε τα δεδομένα της κάθε περίπτωσης το πρόγραμμα μας δίνει τη κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο σύμμεκτο τοίχωμα. Κατόπιν μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα αλλά και να παρατηρήσουμε ιδιαιτερότητες σχετικά με την θερμομόνωση και την υγρασιμότητα της κάθε περίπτωσης τοιχοποιίας ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα στη κατασκευή.

5.2 Εφαρμογές

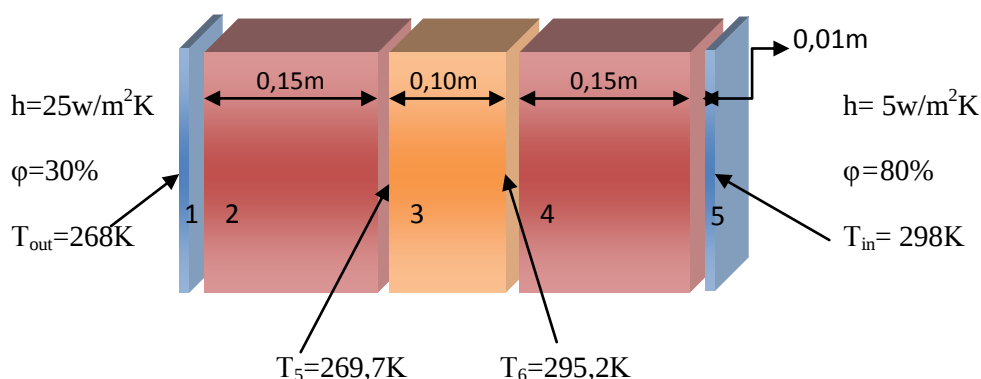
5.2.1 Θερμομόνωση στον πυρήνα της τοιχοποιίας

Η πρώτη περίπτωση που εξετάσαμε ήταν η τοποθέτηση θερμομονωτικού υλικού, συγκεκριμένα υαλοβάμβακα, στο πυρήνα ενός τοίχου κατασκευασμένου από πλήρεις οπτόπλινθους. Εσωτερικά και εξωτερικά ο τοίχος έχει καλυφθεί από ασβεστοκονίαμα (σοβάς) με σκοπό την προστασία από υγρασία, το ψύχος, το θόρυβο αλλά και για αισθητικούς λόγους. Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας αλλά και η φαινόμενη πυκνότητα των στοιχείων παρατίθενται στο παράρτημα Α.

Το σύμμεκτο αυτό τοίχωμα αποτελείται από πέντε στοιχεία. Τα στοιχεία 1 και 5 αποτελούνται από ασβεστοκονίαμα πάχους 0,01m το καθένα. Τα στοιχεία 2 και 4 αποτελούνται από οπτόπλινθους πλήρεις 0,15m πάχους ο καθένας, ενώ στο ενδιάμεσο, στοιχείο 3, έχει τοποθετηθεί υαλοβάμβακας πάχους 0,10m (Σχ. 5.1).

Επίσης θα πρέπει να ορίσουμε τις ακόλουθες συνθήκες ώστε να επιλύθει το πρόβλημα. Υποθέτουμε μονοδιάστατη ροή θερμότητας. Κατόπιν θεωρούμε εξωτερικά ατμοσφαιρικό αέρα θερμοκρασίας $T_{out} = 268K$ ($-5^{\circ}C$), σχετικής υγρασίας $\phi=30\%$, ενώ υποθέτουμε εξαναγκασμένη συναγωγή με συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας $h=25W/m^2K$. Εσωτερικά θεωρούμε ότι ο χώρος έχει θερμοκρασία $T_{in} = 298K$ ($25^{\circ}C$), σχετικής υγρασίας $\phi=80\%$, ενώ υποθέτουμε ελεύθερη συναγωγή με συντελεστή ειδικής συναγωγιμότητας $h=5W/m^2K$, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Επιλέξαμε τις ακραίες αυτές συνθήκες, που μπορούν όμως να εμφανισθούν

σε πολλές περιοχές κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ώστε να ελέγξουμε τις επιπτώσεις που θα έχουν στην εκάστοτε τοιχοποιία που εξετάστηκε.



Σχήμα 5.1: Προσθήκη υαλοβάμβακα στον πυρήνα της τοιχοποιίας

Στη συνέχεια εισάγουμε τα δεδομένα του προβλήματος και με τη βοήθεια του προγράμματος λαμβάνουμε τη κατανομή της θερμοκρασίας στο τοίχωμα. Τόσο το αρχείο δεδομένων εισόδου (*TEST1.INP*) όσο και οι αλγόριθμοι του προγράμματος (*heat1d.m* και *bansol.m*) παρατίθενται στο παράρτημα Β.

Η κατανομή της θερμοκρασίας φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.2: Κατανομή θερμοκρασίας τοιχώματος με υαλοβάμβακα

Οι κρίσιμες θερμοκρασίες για υγροποίηση των υδρατμών είναι οι $T_5=269,7\text{K}$ ($-3,3^\circ\text{C}$) και $T_6=295,2\text{K}$ ($22,2^\circ\text{C}$), όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Για θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα $T_{\text{out}} = 268\text{K}$ (-5°C) και σχετική υγρασία $\phi = 30\%$, η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ατμοσφαιρικού αέρα, για να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών, είναι $\Delta T=13,5^\circ\text{C}$ (βλ Παράρτημα Α, Πίνακας 3). Στη περίπτωση μας έχουμε $\Delta T = T_5 - T_{\text{out}} = -3,3 - (-5) = 1,7 < 13,5^\circ\text{C}$. Επειδή η

πραγματική διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη από την ελάχιστη, στην εσωτερική επιφάνεια δεν θα σχηματιστούν σταγόνες νερού.

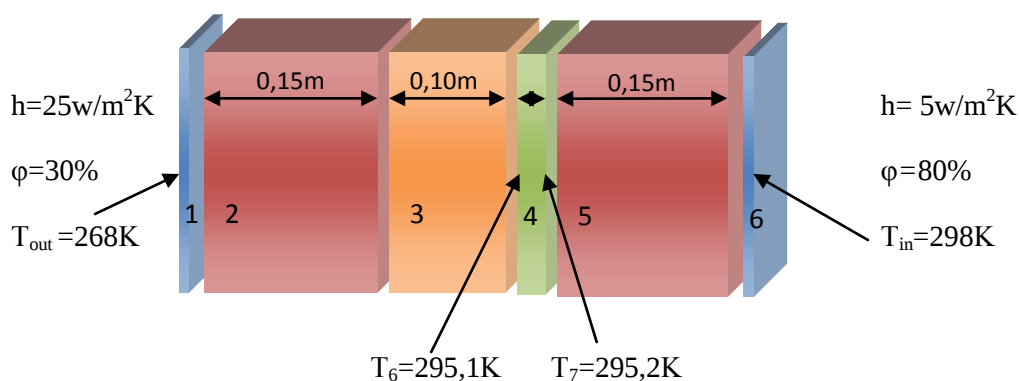
Για θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα $T_{in} = 298K$ ($25^{\circ}C$) και σχετική υγρασία $\phi=80\%$, η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ατμοσφαιρικού αέρα, για να έχουμε υγραποίηση των υδρατμών, είναι $\Delta T=3,7^{\circ}C$ (βλ Παράρτημα Α, Πίνακας 3). Στη περίπτωση μας έχουμε $\Delta T = T_{in} - T_6 = 25 - 22,2 = 2,8 < 3,7^{\circ}C$. Επειδή η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη από την ελάχιστη, στην εσωτερική επιφάνεια δεν θα έχουμε υγραποίηση των υδρατμών.

5.2.2 Θερμομόνωση στον πυρήνα της τοιχοποιίας με προσθήκη φράγματος υδρατμών

Η περίπτωση αυτή αποτελεί παραλλαγή της πρώτης, καθώς στο πυρήνα της τοιχοποιίας έγινε προσθήκη ενός φράγματος υδρατμών, συγκεκριμένα ασφαλτόχαρτου, ενώ τα υπόλοιπα υλικά παρέμειναν τα ίδια.

Το σύμμεικτο, λοιπόν, αυτό τοίχωμα αποτελείται από έξι στοιχεία. Τα στοιχεία 1 και 6 αποτελούνται από ασβεστοκονίαμα πάχους $0,01m$ το καθένα. Τα στοιχεία 2 και 5 αποτελούνται από οπτόπλινθους πλήρεις $0,15m$ πάχους ο καθένας, όπως και στη προηγούμενη περίπτωση. Το στοιχείο 3 αποτελείται από υαλοβάμβακα πάχους $0,10m$, ενώ στη θερμή πλευρά της θερμομονωτικής στρώσης, για τους λόγους που αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. §4.2.3), τοποθετείται το ασφαλτόχαρτο, στοιχείο 4, πάχους $0,005m$ (Σχ. 5.3).

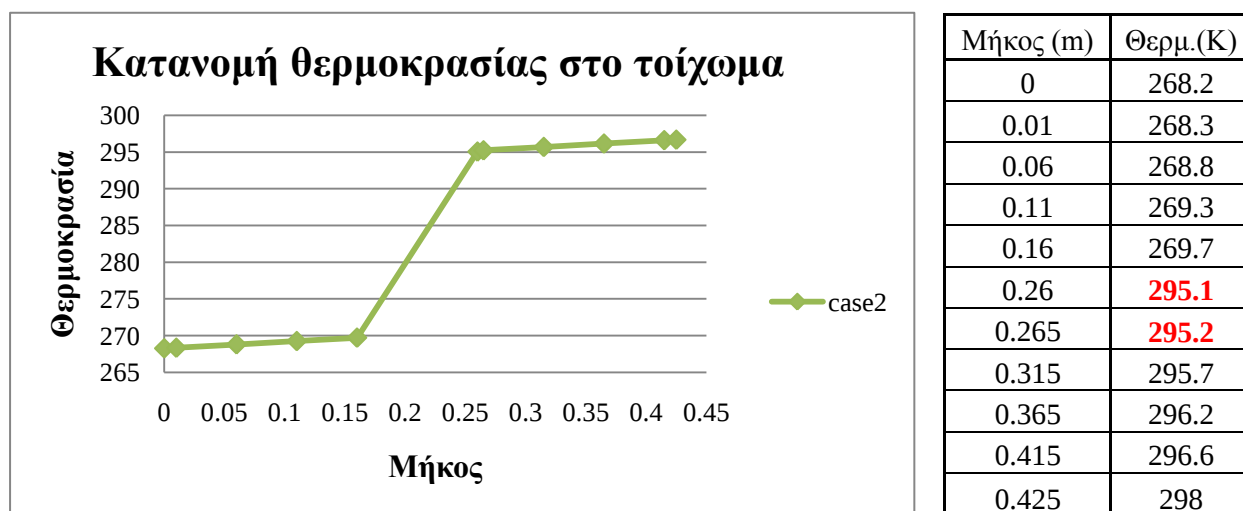
Οι εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και συναγωγής παραμένουν ίδιες.



Σχήμα 5.3: Προσθήκη φράγματος υδρατμών στον πυρήνα της τοιχοποιίας

Κατόπιν εισάγουμε τα νέα δεδομένα του προβλήματος στο πρόγραμμα και λαμβάνουμε τη κατανομή της θερμοκρασίας στο τοίχωμα. Το αρχείο των νέων δεδομένων εισόδου (*TEST2.INP*) παρατίθεται στο παράρτημα Β.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε τη κατανομή θερμοκρασίας του τοιχώματος:



Σχήμα 5.4: Κατανομή θερμοκρασίας τοιχώματος με ασφαλτόχαρτο

Οι κρίσιμες θερμοκρασίες για υγροποίηση των υδρατμών είναι οι $T_6=295,1\text{K}(22,1^\circ\text{C})$ με σχετική υγρασία 30% και $T_7=295,2\text{K}(22,2^\circ\text{C})$ με σχετική όμως υγρασία 80%, αφού το φράγμα υδρατμών έχει τοποθετηθεί μεταξύ της θέσης 6 και 7 (Σχ. 5.3).

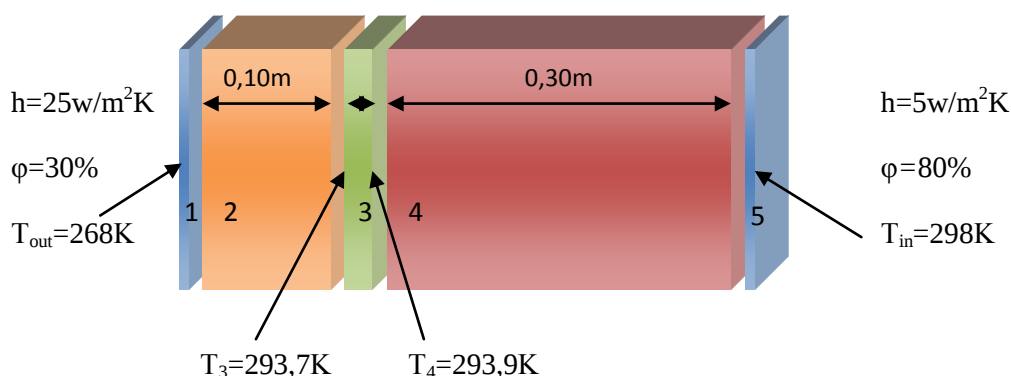
Για θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα $T_{\text{out}} = 268\text{K} (-5^\circ\text{C})$ και σχετική υγρασία $\varphi = 30\%$, η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ατμοσφαιρικού αέρα, για να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών, είναι $\Delta T=13,5^\circ\text{C}$ (βλ Παράρτημα Α, Πίνακας 3). Στη περίπτωση αυτή έχουμε $\Delta T = T_6 - T_{\text{out}} = 22,1 - (-5) = 27,1 > 13,5^\circ\text{C}$. Επειδή η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη, στην εσωτερική επιφάνεια του υαλοβάμβακα θα σχηματιστούν σταγόνες νερού. Θα έχουμε δηλαδή το φαινόμενο εσωτερικής συμπύκνωσης υδρατμών (βλ. §4.2.3), το οποίο θα έχει καταστροφικά αποτελέσματα τόσο στην οπτοπλινθοδομή, προκαλώντας αποσάρθρωση, όσο και στον υαλοβάμβακα μειώνοντας σημαντικά τις θερμομονωτικές του ιδιότητες.

Για θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα $T_{\text{in}} = 298\text{K} (25^\circ\text{C})$ και σχετική υγρασία $\varphi=80\%$, η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ατμοσφαιρικού αέρα, για να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών, είναι $\Delta T=3,7^\circ\text{C}$ (βλ Παράρτημα Α, Πίνακας 3). Στη περίπτωση αυτή έχουμε $\Delta T = T_{\text{in}} - T_7 = 25 - 22,2 = 2,8 < 3,7^\circ\text{C}$ και εφόσον η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη από την ελάχιστη, στην εσωτερική επιφάνεια δεν θα έχουμε υγροποίηση των υδρατμών.

5.2.3 Εξωτερική θερμομόνωση τοιχοποιίας

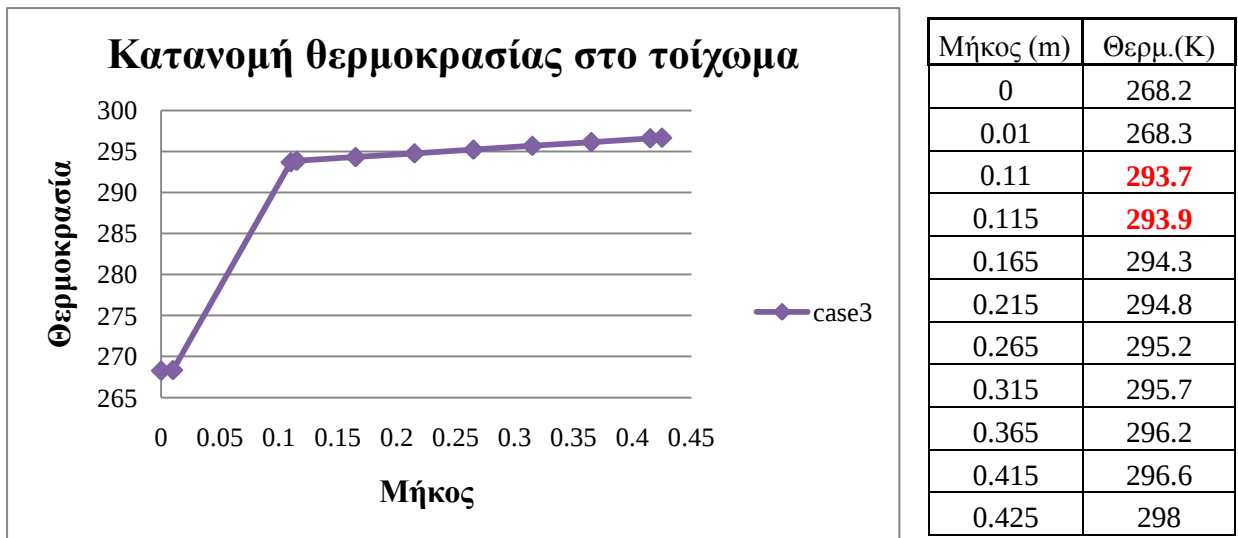
Στη περίπτωση αυτή έχουμε τοποθετήσει το θερμομονωτικό υλικό από υαλοβάμβακα στην εξωτερική πλευρά της τοιχοποιίας, κατασκευασμένης από πλήρεις οπτόπλινθους. Κατόπιν τοποθετήσαμε το φράγμα υδρατμών, ενώ εξωτερικά και εσωτερικά οι επιφάνειες έχουν καλυφθεί με επίχρισμα, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Οι εξωτερικές και εσωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και συναγωγής παραμένουν ίδιες.

Το σύμμεκτο, λοιπόν, τοίχωμα της περίπτωσης αυτής αποτελείται από πέντε στοιχεία. Τα στοιχεία 1 και 5 αποτελούν το επίχρισμα, συγκεκριμένα ασβεστοκονίαμα πάχους 0,01m το καθένα. Το στοιχείο 2, που είναι το θερμομονωτικό υλικό μας, αποτελείται από υαλοβάμβακα πάχους 0,10m, ενώ σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις ο τοίχος είναι ενιαίος, έτσι το στοιχείο 4 που αποτελείται από πλήρεις οπτόπλινθους, έχει πάχος 0,30m. Στη θερμή πλευρά της θερμομονωτικής στρώσης, όπως και πριν, τοποθετείται το φράγμα των υδρατμών, δηλαδή το στοιχείο 3, που αποτελείται από ασφαλτόχαρτο πάχους 0,005m (Σχ. 5.5).



Σχήμα 5.5: Θερμομόνωση στην εξωτερική επιφάνεια τοίχου

Αφού δημιουργήσουμε το νέο αρχείο δεδομένων εισόδου *TEST3.INP* (βλ. Παράρτημα Β) το εισάγουμε στο πρόγραμμα το οποίο μας δίνει τη κατανομή θερμοκρασίας του τοιχώματος όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 5.6: Κατανομή θερμοκρασίας τοιχώματος με εξωτερική θερμομόνωση

Τα σημεία που πρέπει να ελεγχθούν για τυχόν υγροποίηση των υδρατμών είναι τα εξής: Το σημείο με θερμοκρασία $T_3=293,7\text{K}$ ($20,7^\circ\text{C}$) και σχετική υγρασία 30%, και το σημείο με θερμοκρασία $T_4=293,9\text{K}$ ($20,9^\circ\text{C}$) και σχετική όμως υγρασία 80%, αφού το φράγμα υδρατμών έχει τοποθετηθεί μεταξύ της θέσης 3 και 4 (Σχ. 5.5).

Για θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα $T_{\text{out}} = 268\text{K}$ (-5°C) και σχετική υγρασία $\varphi = 30\%$, η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ατμοσφαιρικού αέρα, για να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών, είναι $\Delta T=13,5^\circ\text{C}$ (βλ Παράρτημα Α, Πίνακας 3). Στη περίπτωση αυτή έχουμε $\Delta T = T_3 - T_{\text{out}} = 20,7 - (-5) = 25,7 > 13,5^\circ\text{C}$. Επειδή η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη, στην εσωτερική επιφάνεια του υαλοβάμβακα θα σχηματιστούν σταγόνες νερού με αποτέλεσμα τη μείωση τις θερμομονωτικής του ικανότητας.

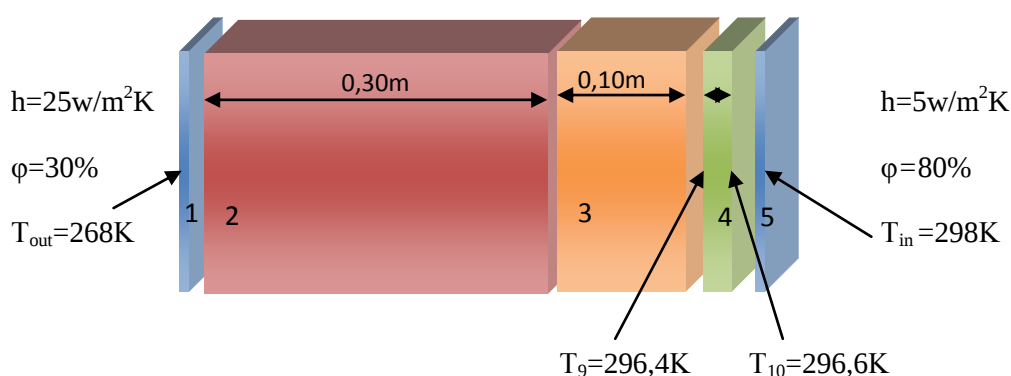
Για θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα $T_{\text{in}} = 298\text{K}$ (25°C) και σχετική υγρασία $\varphi=80\%$, η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ατμοσφαιρικού αέρα, για να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών, είναι $\Delta T=3,7^\circ\text{C}$ (βλ Παράρτημα Α, Πίνακας 3). Στη περίπτωση αυτή έχουμε $\Delta T = T_{\text{in}} - T_4 = 25 - 20,9 = 4,1 > 3,7^\circ\text{C}$ και εφόσον η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη, στην εσωτερική επιφάνεια θα έχουμε υγροποίηση των υδρατμών.

5.2.4 Εσωτερική θερμομόνωση τοιχοποιίας

Στη τελευταία αυτή περίπτωση έχουμε τοποθετήσει το θερμομονωτικό υλικό στην εσωτερική πλευρά της τοιχοποιίας. Από τη θερμή πλευρά της θερμομονωτικής στρώσης έχουμε τοποθετήσει το φράγμα υδρατμών, ενώ εξωτερικά κα εσωτερικά οι επιφάνειες έχουν καλυφθεί με επίχρισμα, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

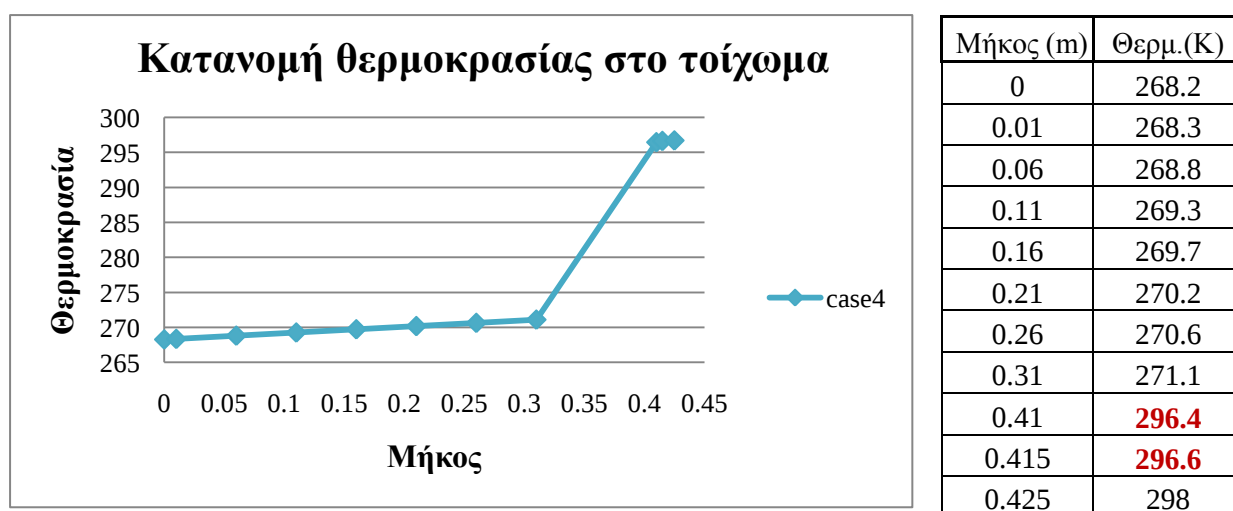
Οι εξωτερικές και εσωτερικές συνθήκες θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και συναγωγής παραμένουν ίδιες.

Το σύμμεκτο, λοιπόν, τοίχωμα της περίπτωσης αυτής αποτελείται από πέντε στοιχεία. Τα στοιχεία 1 και 5 αποτελούν το επίχρισμα, συγκεκριμένα ασβεστοκονίαμα πάχους 0,01m το καθένα. Το στοιχείο 2, είναι ένας ενιαίος τοίχος που αποτελείται από πλήρεις οπτόπλινθους, όπως και στη προηγούμενη περίπτωση, πάχους 0,30m. Το στοιχείο 3, είναι το θερμομονωτικό υλικό που χρησιμοποιήσαμε και αποτελείται από υαλοβάμβακα πάχους 0,10m. Κατόπιν τοποθετήθηκε το στοιχείο 4, δηλαδή το φράγμα υδρατμών που αποτελείται από ασφαλτόχαρτο πάχους 0,005m όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.7: Θερμομόνωση στην εσωτερική επιφάνεια τοίχου

Στη συνέχεια δημιουργούμε το νέο αρχείο δεδομένων εισόδου *TEST4.INP* (βλ. Παράρτημα Β) και το εισάγουμε στο πρόγραμμα το οποίο μας δίνει τη κατανομή θερμοκρασίας του τοιχώματος όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 5.8: Κατανομή θερμοκρασίας τοιχώματος με εσωτερική θερμομόνωση

Κατόπιν πρέπει να ελεγχούν τα κρίσιμα σημεία που πιθανόν να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών. Τα σημεία αυτά έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: Το σημείο 9 έχει θερμοκρασία $T_9=296,4\text{K}$ ($23,4^\circ\text{C}$) και σχετική υγρασία 30%, ενώ το σημείο 10 έχει θερμοκρασία $T_{10}=296,6\text{K}$ ($23,6^\circ\text{C}$) και σχετική υγρασία 80%, αφού το φράγμα υδρατμών έχει τοποθετηθεί μεταξύ της θέσης 9 και 10 (Σχ. 5.7).

Για θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα $T_{\text{out}} = 268\text{K}$ (-5°C) και σχετική υγρασία $\phi = 30\%$, η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ατμοσφαιρικού αέρα, για να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών, είναι $\Delta T = 13,5^\circ\text{C}$ (βλ Παράρτημα Α, Πίνακας 3). Στη αυτή τη περίπτωση έχουμε $\Delta T = T_9 - T_{\text{out}} = 23,4 - (-5) = 28,4 > 13,5^\circ\text{C}$ και επειδή η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη στην εσωτερική επιφάνεια του ναλοβάμβακα θα έχουμε υγροποίηση των υδρατμών, γεγονός που θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση τις θερμομονωτικής του ικανότητας.

Για θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα $T_{\text{in}} = 298\text{K}$ (25°C) και σχετική υγρασία $\phi=80\%$, η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και ατμοσφαιρικού αέρα, για να έχουμε υγροποίηση των υδρατμών, είναι $\Delta T=3,7^\circ\text{C}$ (βλ Παράρτημα Α, Πίνακας 3). Στη περίπτωση αυτή θα έχουμε $\Delta T = T_{\text{in}} - T_{10} = 25 - 23,6 = 1,4 < 3,7^\circ\text{C}$ και εφόσον η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη από την ελάχιστη, στην εσωτερική επιφάνεια δεν θα έχουμε υγροποίηση των υδρατμών.

5.3 Συμπεράσματα

Με χρήση πεπερασμένων στοιχείων μπορούμε να πραγματοποιήσουμε αποτελεσματική προσομοίωση, έλεγχο και ορθολογικό σχεδιασμό κάθε μορφής θερμομόνωσης. Κατά αυτό το τρόπο μας δίνεται η δυνατότητα αποφυγής ασθενών σημείων ή βλαβών κατά τη διάρκεια χρήσης της.

Παράρτημα Α

Πίνακας 1. Συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας δομικών στοιχείων

Υλικά	Φαινόμενη πυκνότητα	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	
	kg/m ³	kcal/mh°C	W/mK
Δομικά υλικά			
<i>Λίθοι</i>			
Συμπαγείς λίθοι (ασβεστόλιθος, μάρμαρο, γρανίτης, βασάλτης κ.λπ.)		3,00	3,49
Πορώδεις λίθοι			
Ψαμμίτης		2,00	2,33
Πλάκες τύπου Μάλτας		0,90	1,05
Άμμος φυσικής προελεύσεως με φυσική υγρασία		1,20	1,40
<i>Άργιλος</i>			
Πλίνθοι συμπαγείς ωμοί		0,80	0,93
Πλίνθοι μετ' αχύρου ωμοί		0,60	0,70
<i>Ξηρά υλικά πληρώσεως τοποθετούμενα χύδην εις διάκενα οροφών, τοίχων κ.λπ.</i>			
Άμμος διαμέτρου κόκκου <5 mm		0,50	0,58
Ψηφίδες διαμέτρου κόκκου 5-10 mm συλλέκτες και θραυστές		0,70	0,81
Χονδρόκοκκος κίσσηρις		0,16	0,19
Θραύσματα οπτολίνθων και κεράμων		0,35	0,41
Περλίτης διογκωμένος		0,055	0,064
<i>Επιχρίσματα (εσωτερικά και εξωτερικά), συνδετική κονία αρμών από:</i>			
Ασβεστοκονίαμα και ασβεστοτσιμεντοκονίαμα		0,75	0,87
Τσιμεντοκονίαμα		1,20	1,39
<i>Σκυροδέματα και ελαφρά σκυροδέματα (σε κατασκευαστικά στοιχεία χωρίς αρμούς και σε μεγάλου μεγέθους πλάκες)</i>			
Σκυρόδεμα δια συλλεκτών ή θραυστών αδρανών κλειστής δομής			
- Κατηγορία σκυροδέματος <B120		1,30	1,51
- Κατηγορία σκυροδέματος >B160		1,75	2,03
Γαρμπιλοσκυρόδεμα	1500	0,55	0,64
	1700	0,70	0,81
	1900	0,95	1,10
Κισσηρόδεμα	800	0,25	0,29
	1000	0,30	0,35
	1200	0,40	0,46
Κυψελωτό σκυρόδεμα σκληρυνθέν δι' ατμού	400	0,12	0,14
	500	0,16	0,19
	600	0,20	0,23
	800	0,25	0,29
	1000	0,30	0,35

Περλιτόδεμα [τσιμέντο / περλίτης (κατ' όγκο)]: 1:4 1:5 1:6 1:7 1:8 1:20		0,170	0,198
		0,140	0,163
		0,125	0,145
		0,115	0,134
		0,110	0,128
		0,070	0,081
Πλάκες εκ σκυροδέματος γύψου και αμιαντοτσιμέντου			
Πλάκες εκ κισσηροδέματος	800	0,25	0,29
Πλάκες εξ ελαφρού σκυροδέματος με ανάμικτα αδρανή	1400	0,50	0,58
Γυψοσανίδες	1200	0,50	0,58
Πλάκες εξ αμιαντοτσιμέντου	1800	0,30	0,35
Τοιχοποιία εκ τσιμεντοπλίνθων συμπεριλαμβανομένου και του κονιάματος των αρμών			
Τσιμεντόλιθοι πλήρεις με ασβεστολιθικά αδρανή	1600	0,68	0,79
	1800	0,85	0,99
	2000	0,95	1,10
Τσιμεντόλιθοι διάτρητοι με ασβεστολιθικά αδρανή	1200	0,48	0,56
	1400	0,60	0,70
	1600	0,68	0,79
Τσιμεντόλιθοι με διάκενα με ασβεστολιθικά αδρανή	1000	0,43	0,50
	1200	0,48	0,56
Κισσηρόλιθοι πλήρεις	800	0,35	0,41
	1000	0,40	0,46
	1200	0,45	0,52
	1400	0,55	0,64
	1600	0,68	0,79
Κισσηρόλιθοι με διάκενα 2 διακένων	1000	0,38	0,44
	1200	0,42	0,49
	1400	0,48	0,56
Κισσηρόλιθοι με διάκενα 3 διακένων	1400	0,42	0,49
	1600	0,48	0,56
Πλίνθοι εκ κυψελωτού σκυροδέματος εσκληρυσμένοι δι' ατμού	600	0,30	0,35
	800	0,35	0,41
	1000	0,40	0,46
Πλίνθοι εκ κυψελωτού σκυροδέματος εσκληρυσμένοι στον αέρα	800	0,38	0,44
	1000	0,48	0,56
	1200	0,60	0,70

Τοιχοποιία εξ οπτολίνθων συμπεριλαμβανομένου και του κονιάματος των αρμών			
Οπτόλινθοι πλήρεις	1000	0,40	0,46
	1200	0,45	0,52
	1400	0,52	0,60
	1800	0,68	0,79
Οπτόλινθοι διάτρητοι	1000	0,40	0,46
	1200	0,45	0,52
	1400	0,52	0,60
Πλακίδια επιστρώσεως	2000	0,90	1,05
Ξύλα			
Δρυς		0,18	0,21
Οξυά		0,15	0,17
Κωνοφόρα (πεύκο, έλατο κ.λπ.)		0,12	0,14
Κόντρα πλακέ, πλακάς, κ.λπ.		0,12	0,14
Μοριοσανίδες	900	0,15	0,17
Μέταλλα - Ύαλος			
Ύαλος		0,70	0,81
Χυτοσίδηρος και χάλυψ		50,00	53,15
Χαλκός		330,00	283,79
Ορείχαλκος		55,00	53,96
Αλουμίνιο		175,00	203,52
Συνθετικά και Ασφαλτικά υλικά εττιστρώσεως			
Λινόλεουμ	1200	0,16	0,19
Ασφαλτικό σκυρόδεμα	2100	0,60	0,70
Ασφαλτος	1050	0,15	0,17
Ασφαλτόχαρτο	1100	0,16	0,19
Θερμομονωτικά υλικά			
Πλάκες εξ υαλοβάμβακος βακελιτούχες και εκλιθοβάμβακος (ορυκτοβάμβαξ)		0,035	0,041
Υαλοβάμβαξ μη μορφοποιημένος	50	0,035	0,041
Πλάκες ελαφρών κατασκευών εκ ξυλομάλλου μετά ανόργανου συνδετικής κονιάς πάχους			
15 mm	570	0,120	0,140
25 - 35 mm	460-415	0,080	0,093
50 mm και μεγαλύτερου	390≤	0,070	0,081
Πλάκες εκ διογκωμένου φελλού	120	0,035	0,041
	160	0,038	0,044
	200	0,040	0,046
Πλακίδια εκ φελλού	450	0,055	0,064
Διογκωμένα συνθετικά υλικά		0,035	0,041
Σκληροί αφροί εκ συνθετικών υλικών		0,035	0,041

Πίνακας 2. Θερμοκρασία για θερμική άνεση σε χώρους σε χώρους διαμονής

Χώροι	°C
<i>Κατοικίες</i>	
Καθημερινό, υπνοδωμάτια, κουζίνες	+20
Προθάλαμοι, διάδρομοι, W.C.	+ 15
Κλιμακοστάσια	+ 10
Λουτρό	+22
<i>Καταστήματα και γραφεία</i>	
Καταστήματα, γραφεία, εστιατόρια, δωμάτια ξενοδοχείων	+20
Κλιμακοστάσια, διάδρομοι, W.C.	+ 15
<i>Εκπαιδευτικά κτίρια</i>	
Αίθουσες διδασκαλίας	+20
Χώροι εργαστηρίων	+15 : +18
Αμφιθέατρα	+ 18
Κλειστά γυμναστήρια	15
Αίθουσες λουτρών, αποδυτήρια	+22
Διάδρομοι, κλιμακοστάσια, κλειστές αίθουσες διαλεξιμάτων, W.C.	+5 : +10
Διάδρομοι, κλιμακοστάσια, W.C. νηπιαγωγείων	+ 15
Ιατρείο	+24
Χώροι διαφυλάξεως οργάνων και βεστιάρια	+ 15

Πίνακας 3. Ποσότητα υγρασίας κορεσμού σε σχέση με την θερμοκρασία του αέρα και διαφορά θερμοκρασίας ψυχρής επιφάνειας και αέρα για την υγραποίηση των υδρατμών

Θερμ. Αέρα (°C)	Υγρ. Κορεσμού (g/m ³)	Σχετική Υγρασία φ%												
		30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%
-20	0.90	-	10.7	9.1	8.1	7.0	5.9	5.2	4.4	3.7	2.9	2.3	1.7	1.1
-15	1.40	12.3	10.8	9.6	8.2	7.3	6.3	5.4	4.6	3.8	3.1	2.5	1.7	1.2
-10	2.14	12.9	11.3	9.9	8.7	7.6	6.5	5.7	4.8	4.0	3.2	2.5	1.7	1.2
-8	2.54	13.0	11.5	10.1	8.8	7.7	6.6	5.7	4.8	4.0	3.2	2.5	1.8	1.2
-6	2.99	13.4	11.7	10.3	8.9	7.8	6.8	5.8	4.9	4.1	3.3	2.5	1.8	1.2
-4	3.51	13.5	11.8	10.4	9.1	7.9	6.8	5.9	5.0	4.1	3.3	2.6	1.9	1.3
-2	4.13	13.7	11.9	10.6	9.2	8.1	6.9	6.0	5.1	4.2	3.4	2.6	1.9	1.3
0	4.8	13.9	12.1	10.7	9.3	8.1	7.0	6.0	5.1	4.2	3.4	2.7	1.9	1.3
2	5.6	14.3	12.5	11.0	9.7	8.5	7.4	6.4	5.4	4.6	3.7	3.0	2.2	1.5
4	6.4	14.7	12.9	11.4	10.0	8.9	7.7	6.7	5.7	4.9	4.0	3.1	2.2	1.5
6	7.3	15.1	13.3	11.8	10.4	9.2	8.4	7.0	6.0	5.1	4.0	3.2	2.3	1.5
8	8.3	15.6	13.7	12.2	10.8	9.6	8.4	7.3	6.1	5.1	4.1	3.2	2.3	1.5
10	9.4	16.0	14.2	12.6	11.0	10.0	8.6	7.4	6.3	5.2	4.2	3.3	2.4	1.6
12	10.7	16.5	14.6	13.0	11.6	10.1	8.8	7.5	6.3	5.3	4.3	3.3	2.4	1.6
14	12.1	16.9	15.0	13.4	11.8	10.3	8.9	7.6	6.5	5.4	4.3	3.4	2.3	1.6

16	13.9	17.4	15.5	13.6	12.0	10.4	9.0	7.8	6.6	5.5	4.4	3.5	2.3	1.7
18	15.4	17.8	15.7	13.8	12.1	10.6	9.2	7.9	6.7	5.6	4.5	3.5	2.5	1.7
20	17.3	18.1	15.9	14.0	12.3	10.7	9.3	8.0	6.8	5.6	4.6	3.6	2.6	
22	19.4	18.4	16.1	14.2	12.5	10.9	9.5	8.1	6.9	5.7	4.6	3.6	2.6	1.7
24	21.8	18.6	16.4	14.4	12.7	11.1	9.7	8.3	7.0	5.8	4.7	3.7	2.7	1.8
26	24.4	18.9	16.7	14.7	12.9	11.2	9.8	8.4	7.1	5.9	4.8	3.7	2.7	1.8
28	27.2	19.2	16.9	14.9	13.1	11.4	9.9	8.5	7.2	6.0	4.9	3.8	2.7	1.8
30	30.3	19.5	17.2	15.1	13.3	11.6	10.1	8.6	7.3	6.1	4.9	3.8	2.8	1.8
35	39.4	20.2	18.0	15.7	13.9	12.0	10.5	9.0	7.6	6.3	5.1	4.0	2.9	1.9
40	50.7	20.9	18.5	16.1	14.3	12.4	10.9	9.3	7.8	6.5	5.3	4.1	3.0	2.0
45	64.5	21.6	19.2	16.7	14.6	12.9	11.2	9.8	8.1	6.8	5.7	4.3	3.0	2.1
50	82.3	22.3	19.8	17.3	15.3	13.4	11.6	9.9	8.4	7.0	5.7	4.9	3.2	2.1

Παράρτημα Β

- Πρόγραμμα *heat1d.m* για μονοδιάστατη ροή θερμότητας

```
function []=heat1d2n()
clear all
close all
%----- HEAT1D2 -----
disp('*****');
disp('*          PROGRAM HEAT1D2          *');
disp('* T.R.Chandrupatla and A.D.Belegundu *');
disp('*****');

InputData;
Stiffness;
ModifyForBC;
BandSolver;
Output;

%----- function InputData -----
function [] = InputData();
global NN NE NBC NQ NBW TC
global X NB BC V H F S
global TITLE FILE1 FILE2
global LINP LOUT

disp(blanks(1));
FILE1 = input('Input Data File Name ','s');
LINP = fopen(FILE1,'r');
FILE2 = input('Output Data File Name ','s');
LOUT = fopen(FILE2,'w');

DUMMY = fgets(LINP);
TITLE = fgets(LINP);
DUMMY = fgets(LINP);

TMP = str2num(fgets(LINP));
[NE, NBC, NQ] = deal(TMP(1),TMP(2),TMP(3));
NN = NE + 1;
NBW = 2;
% NBW IS THE HALF-BAND-WIDTH

%----- Thermal Conductivity -----
DUMMY = fgets(LINP);
for I=1:NE
    TMP = str2num(fgets(LINP));
    [N, TC(N,1)]=deal(TMP(1),TMP(2));
end
%----- Coordinates -----
DUMMY = fgets(LINP);
for I=1:NN
    % TMP = str2num(fgets(LINP));
    % [N, X(N,1)]=deal(TMP(1),TMP(2));
    N = fscanf(LINP,'%d',[1 1]);
    X(N,1) = fscanf(LINP,'%g\n',[1 1]);
end
```

```

DUMMY = fgets(LINP);

%----- Boundary Conditions -----
for I = 1:NBC
    NB(I) = fscanf(LINP, '%d', [1 1]);
    BC(I,:) = upper(fscanf(LINP, '%s\n', [1 1]));
    if ~isempty(findstr(BC(I,:), 'TEMP'))
        V(I) = fscanf(LINP, '%g\n', [1 1]);
    elseif ~isempty(findstr(BC(I,:), 'FLUX'))
        V(I) = fscanf(LINP, '%g\n', [1 1]);
    elseif ~isempty(findstr(BC(I,:), 'CONV'))
        H(I) = fscanf(LINP, '%g', [1 1]);
        V(I) = fscanf(LINP, '%g\n', [1 1]);
    end
end
end
%--- CALCULATE AND INPUT NODAL HEAT SOURCE VECTOR ---
F = zeros(NN,1);
DUMMY = fgets(LINP);
if NQ > 0
    for I = 1:NQ
        N = fscanf(LINP, '%d', [1 1]);
        F(N) = fscanf(LINP, '%g\n', [1 1]);
    end
end
fclose(LINP);

%----- function Stiffness -----
function []=Stiffness();
global NN NE NBC NQ NBW TC
global X NB BC V H F S
global TITLE FILE1 FILE2
global LINP LOUT

%--- STIFFNESS MATRIX ---
S = zeros(NN,NBW);
for I = 1:NE
    I1 = I;
    I2 = I + 1;
    ELL = abs(X(I2) - X(I1));
    EKL = TC(I) / ELL;
    S(I1, 1) = S(I1, 1) + EKL;
    S(I2, 1) = S(I2, 1) + EKL;
    S(I1, 2) = S(I1, 2) - EKL;
end

%----- function ModifyForBC -----
function []=ModifyForBC();
global NN NE NBC NQ NBW TC
global X NB BC V H F S
global TITLE FILE1 FILE2
global LINP LOUT

%--- ACCOUNT FOR B.C.'S ---
AMAX = 0;
for I = 1:NN
    if S(I, 1) > AMAX; AMAX = S(I, 1); end
end

```

```

CNST = AMAX * 10000.;
for I = 1:NBC
    N = NB(I);
    if ~isempty(findstr(BC(I,:), 'CONV'))
        S(N, 1) = S(N, 1) + H(I);
        F(N) = F(N) + H(I) * V(I);
    elseif ~isempty(findstr(BC(I,:), 'FLUX'))
        F(N) = F(N) - V(I);
    elseif ~isempty(findstr(BC(I,:), 'TEMP'))
        S(N, 1) = S(N, 1) + CNST;
        F(N) = F(N) + CNST * V(I);
    end
end

%----- function BandSolver -----
-----
function []=BandSolver();
global NN NE NM NDIM NEN NDN
global ND NL NCH NPR NMPC NBW
global NN NE NBC NQ NBW TC
global X NB BC V H F S
global TITLE FILE1 FILE2
global LINP LOUT

[F] = bansol(NN,NBW,S,F);

%----- function Output -----
--
function []=Output();
global NN NE NBC NQ NBW TC
global X NB BC V H F S
global TITLE FILE1 FILE2
global LINP LOUT

disp(TITLE);
fprintf(LOUT, '%s\n', TITLE);
disp('NODE#    TEMPERATURE');
fprintf(LOUT, 'NODE#    TEMPERATURE\n');
for I=1:NN
    disp(sprintf('%d %15.5G', I, F(I)));
    fprintf(LOUT, '%d %15.5G\n', I, F(I));
end
fclose(LOUT);
disp(sprintf('RESULTS ARE IN FILE : %s', FILE2));

```

- **Κώδικας *bansol.m***

```

function [F] = bansol(NN,NBW,S,F)
% Band Solver

N = NN;
%----- Forward Elimination -----
for K=1:N-1
    NBK = N - K + 1;
    if (N - K + 1) > NBW
        NBK = NBW;
    end

```

```

for I=K+1:NBK+K-1
    I1 = I - K + 1;
    C = S(K, I1) / S(K, 1);
    for J=I: NBK+K-1
        J1 = J - I + 1;
        J2 = J - K + 1;
        S(I, J1) = S(I, J1) - C * S(K, J2);
    end
    F(I) = F(I) - C * F(K);
end
end
%----- Back Substitution -----
F(N) = F(N) / S(N, 1);
for II=1:N-1
    I = N - II;
    NBI = N - I + 1;
    if (N - I + 1) > NBW
        NBI = NBW;
    end
    SUM = 0.;
    for J=2:NBI
        SUM = SUM + S(I, J) * F(I + J - 1);
    end
    F(I) = (F(I) - SUM) / S(I, 1);
end

```

- **Αρχείο δεδομένων εισόδου *TEST1.INP***

```

HEAT1D DATA FILE
TEST1
NE      #BOUNDARY CONDITIONS (B.C.'S)      #NODAL HEAT SOURCES
9        2                                0
ELEM#    THERMAL CONDUCTIVITY
1         0.87
2         0.72
3         0.72
4         0.72
5         0.026
6         0.72
7         0.72
8         0.72
9         0.87
NODE COORDINATE
1         0
2         .01
3         .06
4         .11
5         .16
6         .26
7         .31
8         .36
9         .41
10        .42
NODE BC-TYPE followed by T0(if TEMP) or q0(if FLUX) or H and Tinf(if
CONV)
1         CONV
25        268
10        CONV
5         298
NODE      HEAT SOURCE

```

- **Αρχείο δεδομένων εισόδου *TEST2.INP***

```

HEAT1D DATA FILE
TEST2
NE      #BOUNDARY CONDITIONS (B.C.'S)      #NODAL HEAT SOURCES
10      2                                  0
ELEM#    THERMAL CONDUCTIVITY
1        0.87
2        0.72
3        0.72
4        0.72
5        0.026
6        0.19
7        0.72
8        0.72
9        0.72
10       0.87
NODE COORDINATE
1        0
2        .01
3        .06
4        .11
5        .16
6        .26
7        .265
8        .315
9        .365
10       .415
11       .425
NODE BC-TYPE followed by T0(if TEMP) or q0(if FLUX) or H and Tinf(if
CONV)
1        CONV
25       268
11       CONV
5        298
NODE      HEAT SOURCE

```

- **Αρχείο δεδομένων εισόδου *TEST3.INP***

```

HEAT1D DATA FILE
TEST3
NE      #BOUNDARY CONDITIONS (B.C.'S)      #NODAL HEAT SOURCES
10      2                                  0
ELEM#    THERMAL CONDUCTIVITY
1        0.87
2        0.026
3        0.19
4        0.72
5        0.72
6        0.72
7        0.72
8        0.72
9        0.72
10       0.87
NODE COORDINATE
1        0
2        .01
3        .11

```

```

4      .115
5      .165
6      .215
7      .265
8      .315
9      .365
10     .415
11     .425
NODE  BC-TYPE followed by T0(if TEMP) or q0(if FLUX) or H and Tinf(if
CONV)
1      CONV
25     268
11     CONV
5      298
NODE      HEAT SOURCE

```

- **Αρχείο δεδομένων εισόδου *TEST4.INP***

```

HEAT1D DATA FILE
TEST4
NE      #BOUNDARY CONDITIONS (B.C.'S)      #NODAL HEAT SOURCES
10      2      0
ELEM#    THERMAL CONDUCTIVITY
1        0.87
2        0.72
3        0.72
4        0.72
5        0.72
6        0.72
7        0.72
8        0.026
9        0.19
10       0.87
NODE  COORDINATE
1      0
2      .01
3      .06
4      .11
5      .16
6      .21
7      .26
8      .31
9      .41
10     .415
11     .425
NODE  BC-TYPE followed by T0(if TEMP) or q0(if FLUX) or H and Tinf(if
CONV)
1      CONV
25     268
11     CONV
5      298
NODE      HEAT SOURCE

```

Βιβλιογραφία

1. **Chandrupatla, Tirupathi R. and Belegundu, Ashok D.**, *Introduction to Finite Elements in Engineering*, 3rd edition, Prentice Hall, 2002.
2. **Κακάτσιος, Ξ.Κ.**, *Μετάδοση Θερμότητας*, Εκδόσεις ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, 2002.
3. Κανονισμός Θερμομόνωσης των Κτιρίων [ΦΕΚ 362 Δ'. 1979].
4. **ΚΑΠΕ**, *Οδηγός εξοικονόμησης ενέργειας μέσω θερμομόνωσης*, 1999.
5. **Περδίας, Σ.Δ.**, *Τα μυστικά για την ενεργειακή βελτίωση του ακινήτου σας*, Εκδόσεις TeKΔΟΤΙΚΗ, Αθήνα 2010.
6. **Περδίας, Σ.Δ.**, *Μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια και βιομηχανίες*, Σεμινάριο Ι.Ε.Κ.Ε.Μ. Τ.Ε.Ε., Αθήνα 2006.
7. **Παπαδόπουλος, Μ.**, *Θερμομόνωση κτιρίων*, Θεσσαλονίκη 1984.
8. **Αραβαντινός, Δ.**, *Το φράγμα υδρατμών στην εξωτερική τοιχοποιία*, Τεχνικά Χρονικά Επιστημονική Έκδοση Τ.Ε.Ε., Τόμος 15, Τεύχος 1-3, σελ. 45-55, 1995.
9. Περιοδικό ΚΤΙΡΙΟ, Τεύχος 7/2009, Εκδόσεις ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΗ ΔΟΜΗΣΗ ΕΠΕ, Θεσσαλονίκη 2009.
10. **Σανταμούρης, Μ.**, *Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων και οι νέες τεχνικές για τη μείωσή της*. Available from: www.buildings.gr
11. **Τσίππρας, Κ.**, *Θερμομόνωση, σημαντικός παράγοντας στην Οικολογική Δόμηση*). Available from: www.buildings.gr
12. **Αργυροπούλου, Α.**, *Κτίριο, ενέργεια, θερμομόνωση, περιβάλλον & η αλληλοεξάρτησή τους*, Μεταπτυχιακή Μελέτη στο Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Π.Κ., Χανιά 2009.
13. Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Τ.Ε.Ε. Available from: <http://portal.tee.gr/>