



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΨΥΞΗ ΟΡΟΦΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ COMSOL
MULTIPHYSICS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΖΕΥΓΑΡΙΔΗΣ Χ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΤΖΙΒΑΝΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΙΟΥΛΙΟΣ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Τζιβανίδη Χρήστο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αυτό θέμα και για την υπομονή που επέδειξε όλο αυτό το διάστημα που με καθοδηγούσε και με επέβλεπε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη, την υπομονή αλλά και για την κατανόηση που επέδειξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
1. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ	13
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.2 ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	13
1.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ.....	14
1.4 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ.....	15
1.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	17
1.6 ΚΡΙΣΙΜΟ ΣΗΜΕΙΟ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΥΓΡΗ ΚΑΙ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ.....	18
2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ	19
2.1 ΦΥΣΙΚΕΣ, ΤΕΧΝΙΚΕΣ, ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ P.C.M.....	19
2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	20
2.3 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	23
2.4 ΠΑΡΑΦΙΝΕΣ.....	24
2.5 ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ.....	25
2.6 ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΥΛΙΚΑ.....	27
2.7 ΕΥΤΗΚΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ.....	29
2.8 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΕΡΕΗΣ ΦΑΣΗΣ (ΥΑΣΦ).....	29
3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ	31
3.1 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ.....	31
3.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΠΟΨΥΞΗΣ / ΥΠΕΡΨΥΞΗΣ.....	33
3.3 ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	36
3.4 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ P.C.M. ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	37
3.5 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΜΕ ΑΛΛΑ ΥΛΙΚΑ.....	38
3.6 ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	39
3.7 ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ P.C.M. ΣΕ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	40
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΝΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ	41
4.1 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΑΡΩΣΗ (DSC).....	42
4.2 DSC ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΡΥΘΜΟ ΨΥΞΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ.....	43
4.3 DSC ΙΣΟΘΕΡΜΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ.....	44
4.4 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (DTA).....	46
4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ T-HISTORY.....	47

5. ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	53
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ.....	59
6.1 ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ.....	61
6.2 ΤΟΙΧΟΣ ΤΡΟΜΒΕ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	66
6.3 ΗΛΙΑΚΟΣ ΤΟΙΧΟΣ.....	67
6.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΑ ΠΑΡΑΘΥΡΑ.....	69
6.5 ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΕΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	71
6.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΙΧΟΥ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	72
6.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΔΟΔΑΠΕΔΙΑΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	73
6.8 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	76
6.9 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	77
6.10 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ.....	78
6.11 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ.....	79
6.12 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΟΧΗΜΑΤΑ.....	80
6.13 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΡΟΥΧΑ.....	81
6.14 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ.....	83
7. COMSOL.....	85
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ COMSOL MULTIPHYSICS.....	85
7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ COMSOL.....	86
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	141
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	143

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αλλαγή φάσης αφορά μεταβάσεις, μεταξύ των τριών καταστάσεων (στερεής, υγρής και αέριας) ενός θερμοδυναμικού συστήματος από τη μία φάση σε κάποια άλλη. Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό του φαινομένου αυτού είναι η παρατήρηση μιας ραγδαίας αλλαγής σε μία ή περισσότερες φυσικές ιδιότητες του συστήματος και κυρίως στη θερμοχωρητικότητά του με ταυτόχρονη μικρή μεταβολή σ' άλλες ιδιότητες, όπως στη θερμοκρασία του.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου μεταφοράς θερμότητας, το οποίο είναι ένα σύστημα σωληνώσεων που βρίσκεται στην οροφή ενός διαμερίσματος, ρέει σ' αυτό νερό και παρέχει ψύξη κατά τη διάρκεια της ημέρας μέσω ενός στρώματος υλικού αλλαγής φάσης (Phase Change Material – P.C.M.). Το υλικό αλλαγής φάσης έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης πολύ μεγαλύτερων ποσών θερμότητας σε σχέση με το τσιμέντο, ενώ μεταβαίνει στην αρχική του κατάσταση κατά τη διάρκεια της νύχτας, εξισορροπώντας τις ηλεκτρικές καταναλώσεις και μειώνοντας τις ημερήσιες κορυφές φορτίων.

Σε πρώτη φάση γίνεται ταξινόμηση των κυριότερων υλικών αλλαγής φάσης, περιγράφονται οι ιδιότητες και οι πιο εξειδικευμένες εφαρμογές τους. Αναφέρονται τα προβλήματα και οι τρόποι αντιμετώπισής τους, όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών αυτών. Η μέτρηση των ιδιοτήτων των υλικών γίνεται συνήθως με διαφορική θερμιδομετρική ανάλυση (DSC), με διαφορική θερμική ανάλυση (DTA) ή με τη μέθοδο T-History. Για την ολοκλήρωση του θεωρητικού μέρους γίνεται μια σύντομη αναφορά στα κυριότερα ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα.

Στο υπολογιστικό μέρος, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση και προσομοίωση του μοντέλου είναι το COMSOL MULTIPHYSICS. Το πρόγραμμα αυτό παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης σύνθετων και αλληλεπιδραστικών φυσικών φαινομένων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αποτελεί δε την ιδανική πλατφόρμα μοντελοποίησης και σχεδιασμού για πληθώρα εφαρμογών. Έτσι λοιπόν, παρουσιάζονται όλα τα βήματα δημιουργίας του μοντέλου του συστήματος που αφορούν τη γεωμετρία, τις σταθερές, τις μεταβλητές, τις εξισώσεις, τη δομή και την πυκνότητα του πλέγματος και τέλος την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

Λέξεις κλειδιά: Υλικά αλλαγής φάσης, Σύστημα ψύξης οροφής, Προσομοίωση, Comsol Multiphysics, Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

,

ABSTRACT

A phase-change material (P.C.M.) is a substance with a high heat of fusion which, by melting and solidifying at a certain temperature, is capable of storing and releasing large amounts of energy. Heat is absorbed or released when the material changes from solid to liquid and vice versa. There are also others phase changes, such as solid–liquid, solid–gas and liquid–gas, but the only phase change used for P.C.Ms is the solid–liquid change.

In this thesis, a numerical procedure for solving transient, three-dimensional heat-transfer problems of space cooling was developed, by using cold water flowing during the night within regularly arranged pipes, embedded in the ceiling within a layer of phase change material (P.C.M.). Such systems are advantageous over the usual ceiling cooling systems because (1) the P.C.M. layer may store considerably greater amounts of heat than those stored in the concrete slab, and (2) night cooling takes place under reduced electricity prices and meets the requirement of smoothing out electricity consumption by reducing daily peak loads.

At first, a classification of the main P.C.Ms is made, describing their properties and more specific applications. Their properties are measured by Differential scanning calorimetry (DSC), Differential thermal analysis (DTA) and T-history method. For the completion of the theoretical part, there is a brief overview of active and passive solar systems.

The selected simulation software was COMSOL Multiphysics, which is a finite element analysis solver and Simulation software for various physics and engineering applications, especially coupled phenomena, or multiphysics. The COMSOL Multiphysics simulation environment facilitates all the steps in the modeling process – defining the selected geometry, meshing, specifying physics, solving the problem, and then visualizing the results. It also serves as a platform for the application of specific modules.

Keywords: Phase Change Material (P.C.M.), Ceiling cooling system, Simulation, Comsol Multiphysics, Finite Element Method (F.E.M.)

1. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη Θερμοδυναμική η μετάβαση (ή αλλαγή) φάσης είναι η διαδικασία μετάβασης ενός θερμοδυναμικού συστήματος από τη μία φάση σε κάποια άλλη. Το ξεχωριστό χαρακτηριστικό του φαινομένου αυτού είναι η παρατήρηση μιας ραγδαίας αλλαγής σε μία ή περισσότερες φυσικές ιδιότητες του συστήματος και κυρίως στη θερμοχωρητικότητά του με ταυτόχρονη μικρή μεταβολή σ' άλλες ιδιότητες, όπως στη θερμοκρασία του. Συνήθως, ο όρος αλλαγή φάσης αναφέρεται σε μεταβάσεις μεταξύ των τριών πρώτων καταστάσεων (στερεής, υγρής και αέριας). Για την επίτευξη της αλλαγής φάσης (τήξη ή στερεοποίηση) απαιτούνται μεγάλα ποσά θερμότητας που απορροφούνται από το υλικό π.χ. η τήξη του πάγου. Ακριβώς σ' αυτό το φαινόμενο στηρίζεται η τεχνολογία των υλικών αλλαγής φάσης (P.C.M.) και τα χρησιμοποιεί για να αποθηκεύει θερμική ενέργεια. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μέσω της διαδικασίας αλλαγής φάσης ενός υλικού, υπό σταθερή θερμοκρασία, ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα. Είναι δυνατόν σε κάποιες περιπτώσεις να εμφανιστεί αλλαγή κατάστασης μη-αδιαβατικά, με τέτοιο τρόπο, ώστε το θερμοδυναμικό σύστημα να υποστεί τα όρια της αλλαγής φάσης, χωρίς όμως να παρατηρείται η αλλαγή αυτή καθ' αυτή, όπως παρατηρείται στα φαινόμενα της υπερψύξης και της υπερθέρμανσης. Η κατάσταση που προκύπτει δεν είναι ενεργειακά σταθερή και χαρακτηρίζεται ως ενεργειακά ημί-σταθερή.

Τα P.C.M. είναι μίγματα που λιώνουν και στερεοποιούνται σε καθορισμένη θερμοκρασία και είναι ως εκ τούτου ικανά να αποθηκεύουν και να αποδίδουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Όταν ένα P.C.M. πρόκειται να υπαχθεί σε αλλαγή φάσης, απαιτείται ένα πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας, το οποίο μπορεί να παρέχει η αποθήκευση θερμότητας σε λανθάνουσα μορφή. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι η μεταφορά πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας συγκριτικά με την αισθητή θερμότητα.

1.2 ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όλα τα υλικά που είναι γνωστά, ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν, μπορούν να βρισκονται σε μία από τις τρεις φάσεις:

- ✓ στερεή
- ✓ υγρή
- ✓ αέρια

Αν χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ταξινόμησης ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας μέσα στο υλικό (χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό τη γενικότερη θερμική συμπεριφορά του υλικού), τότε θα μπορούσαν να δημιουργηθούν δύο κατηγορίες :

- Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή αισθητής θερμότητας σ' ολόκληρο το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης τους.
- Τα υλικά που αποθηκεύουν θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σ' ένα τμήμα του θερμοκρασιακού εύρους χρήσης τους, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα συναλλάσσουν θερμότητα με τη μορφή αισθητής θερμότητας.

Για την πρώτη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος για τη θερμική συμπεριφορά τους αποτελεί η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση ή όγκο, ενώ για τη δεύτερη κατηγορία χαρακτηριστικό μέγεθος αποτελεί η λανθάνουσα θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης.

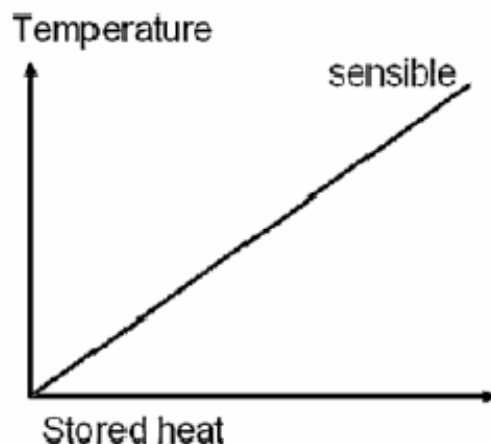
Βασική παρατήρηση για τις τιμές των δύο μεγεθών είναι ότι η τιμή της λανθάνουσας θερμότητας είναι πολλαπλάσια της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση ή όγκο.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Το βασικότερο όμως, είναι το χαρακτηριστικό τους να διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, σε συνδυασμό με την υψηλή ενεργειακή πυκνότητά τους ανά μάζα και όγκο.

1.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΑΙΣΘΗΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Ο τρόπος αποθήκευσης ζέστης ή κρύου είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες φυσικές ή χημικές διαδικασίες, οι οποίες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι υπό τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Στο σχήμα που ακολουθεί, φαίνεται ότι καθώς αποθηκεύεται θερμότητα υπό τη μορφή αισθητής θερμότητας, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας όταν υφίσταται αποθήκευση θερμότητας.



Σχήμα 1.1. Αποθήκευση θερμότητας ως αισθητή θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η αύξηση θερμοκρασίας μπορεί να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα. Η θερμότητα που αποθηκεύεται ονομάζεται αισθητή θερμότητα. Η αποθήκευση θερμότητας υπό μορφή αισθητής θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο σε στερεά δομικά στοιχεία, όπως τούβλο, πέτρα κλπ. καθώς επίσης και σε υγρά, όπως το νερό. Τα αέρια λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητάς τους δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας.

1.4 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Αν η θερμότητα αποθηκεύεται ως λανθάνουσα θερμότητα, τότε έχουμε μια αλλαγή φάσης του υλικού στο οποίο αποθηκεύεται η θερμότητα. Επομένως, διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Εξάτμιση του υλικού που αποθηκεύεται η θερμότητα.

Η εξάτμιση είναι μια αλλαγή φάσης με μεγάλη μεταβολή του ενθαλπικού περιεχομένου του υπό εξάτμιση υλικού, ωστόσο η διαδικασία της εξάτμισης είναι αναγκαίο να γίνεται σε καθορισμένες συνθήκες, οι οποίες είναι :

- ▶ Σταθερός όγκος : Η εξάτμιση συνοδεύεται από αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης στον όγκο που εξατμίζεται, κάτι που τεχνικά δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί.

- ▶ Σταθερή πίεση σε κλειστά θερμοδυναμικά συστήματα : Η οποία, όμως προκαλεί αύξηση του όγκου, γεγονός που επίσης, δεν είναι τεχνολογικά επιτεύξιμο.

- ▶ Σταθερή πίεση σε ανοιχτά θερμοδυναμικά συστήματα : Καθώς το υλικό φορτίζεται θερμικά προκειμένου να εξατμιστεί, εξατμίζεται και διαφεύγει στο περιβάλλον. Ο μόνος τρόπος για να αποφορτιστεί το υλικό είναι να συλλεχθεί ξανά από το περιβάλλον. Το μόνο υλικό που είναι δυνατόν να συλλεχθεί από το περιβάλλον είναι το νερό.

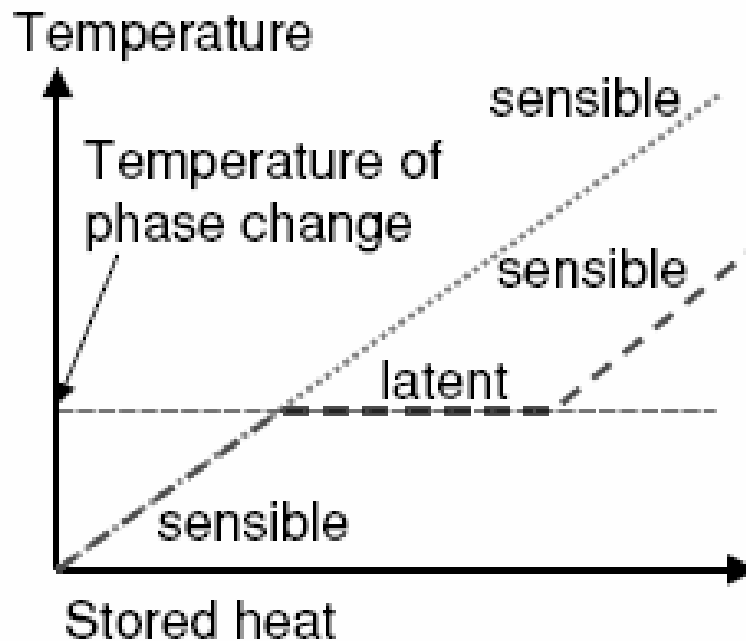
Όλα αυτά καθιστούν δύσκολη τη μεταχείριση των αερίων, γι' αυτό δεν ενδιαφέρουν πρακτικά, ως υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

- Αλλαγή φάσης μεταξύ στερεού και υγρού (τήξη).

Η τήξη είναι επίσης μια αλλαγή φάσης με μεγάλη μεταβολή του ενθαλπικού περιεχομένου του υπό τήξη υλικού. Η τήξη χαρακτηρίζεται από μικρή αλλαγή του όγκου του υλικού, που συνήθως υπολογίζεται στο 10 % του αρχικού όγκου. Αν το υλικό το οποίο τήκεται τοποθετηθεί σ' ένα χώρο, τότε λόγω της τήξης η αλλαγή της πίεσης του υγρού δεν αλλάζει σημαντικά. Έτσι, η στερεοποίηση (μετάβαση από την υγρή στην στερεή φάση) και η τήξη (μετάβαση από την στερεή στην υγρή φάση) γίνονται υπό σταθερή θερμοκρασία. Ειδικότερα, κατά τη διαδικασία της τήξης, η θερμότητα μεταφέρεται στο υλικό αποθήκευσης, ενώ παράλληλα η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία τήξης. Αν η ενθαλπία τήξης έχει μεταφερθεί στο υλικό, τότε η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί και οποιαδήποτε

περαιτέρω πρόσδοση θερμότητας στο υλικό, αυξάνει τη θερμοκρασία του, δηλαδή αποθηκεύεται σ' αυτό ως αισθητή θερμότητα. Οι αλλαγές φάσεων μεταξύ υγρού και στερεού έχουν πολλές τεχνικές εφαρμογές.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η αποθήκευση θερμότητας ως λανθάνουσα θερμότητα για την περίπτωση αλλαγής φάσης μεταξύ στερεού – υγρού.



Σχήμα 1.2. Αποθήκευση θερμότητας ως λανθάνουσα θερμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας

- Αλλαγή φάσης μεταξύ στερεού και στερεού.

Η αλλαγή φάσης στερεού – στερεού παρουσιάζει ομοιότητες σε σχέση μ' αυτήν των στερεών και υγρών, αλλά συνήθως δε συνοδεύονται από αλλαγές της ενθαλπίας του υλικού. Επίσης, η μικρή τιμή της λανθάνουσας θερμότητας που εμφανίζει τις περισσότερες φορές, την καθιστούν λιγότερο εφαρμόσιμη στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Τα υλικά τα οποία αλλάζουν φάση στερεού – υγρού και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ζέστης ή κρύου, λέγονται υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ή P.C.M..

1.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

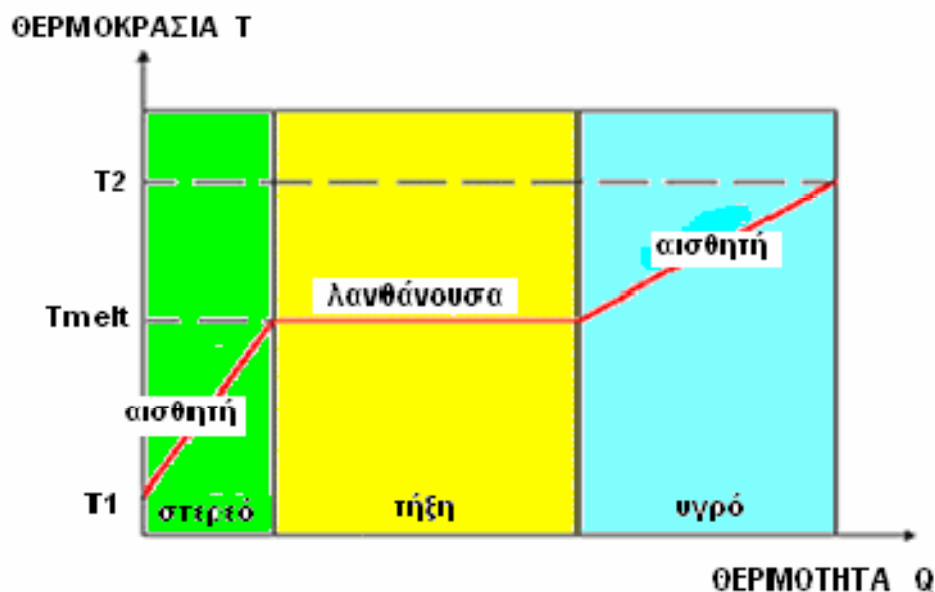
Η μεταβολή λανθάνουσας θερμότητας, γνωστή και ως θερμότητα τήξης είναι το ποσό θερμότητας που πρέπει να απορροφηθεί ή να εκλυθεί, ώστε 1 gr ουσίας να μεταβληθεί από στερεά σε υγρή φάση ή και αντίστροφα.

Ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης και η θερμοκρασία στην οποία αυτή εμφανίζεται, ονομάζεται σημείο τήξης. Όταν αφαιρείται θερμική ενέργεια από ένα υλικό, η θερμοκρασία του μειώνεται. Αντίστοιχα, όταν προσφέρεται θερμότητα σε ένα υλικό, η θερμοκρασία του αυξάνεται.

Στο σημείο μετάβασης μεταξύ στερεής και υγρής φάσης, απαιτείται περισσότερη θερμότητα. Για να υπάρξει μετάβαση από υγρό σε στερεό, τα μόρια της ουσίας πρέπει να τοποθετηθούν αυστηρώς διατεταγμένα και για να γίνει αυτό, θα πρέπει να αφαιρεθεί θερμότητα, ώστε να μεταπέσει το σύστημα σε μία χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Αντιθέτως, για να έχουμε την αντίστροφη διαδικασία και τη μετάβαση από την στερεή κρυσταλλική μορφή στην υγρή, χρειάζεται απορρόφηση θερμότητας για τη λύση των διαμοριακών δεσμών. Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης παρατηρείται με τη μέτρηση της θερμοκρασίας κατά τη στερεοποίηση του νερού.

Στην περίπτωση κλειστού δοχείου με νερό θερμοκρασίας δωματίου, με δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας του μέσου, αν αυτό τοποθετηθεί σε ψυχρό περιβάλλον, παρατηρείται σταθερή μείωση της θερμοκρασίας μέχρι σημείου ελαφρώς μικρότερου της θερμοκρασίας πήξης-τήξης. Τότε, η θερμοκρασία αυξάνει οριακά μέχρι το σημείο στερεοποίησης και έχουμε τη δημιουργία κρυστάλλων στο νερό, δηλαδή την έναρξη της στερεοποίησης. Μετά το πέρας της στερεοποίησης, η θερμοκρασία θα συνεχίσει την πτώση της, έως ότου ικανοποιηθεί η ισορροπία θερμοκρασιών περιβάλλοντος και (πλέον) πάγου. Η θερμοκρασία ανακόπτει την κάθοδό της στο σημείο πήξης εξαιτίας της λανθάνουσας θερμότητας πήξης. Αυτή προφανώς ισούται με τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης η οποία πρέπει να αφαιρεθεί από το υλικό, ώστε να συνεχισθεί η θερμοκρασιακή πτώση.

Τα παραπάνω παρατηρούνται και στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 1.3. Διάγραμμα αλλαγής φάσης

Όπως, έχουμε αναφέρει και πιο πάνω, ένα υλικό μπορεί να αποθηκεύσει θερμότητα με δύο μορφές. Της αισθητής που εκφράζεται με συνακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού και της λανθάνουσας με την απαραίτητη αλλαγή φάσης.

Η αποθηκευτική ικανότητα ενός υλικού αλλαγής φάσης που θερμαίνεται από θερμοκρασία T_1 σε T_2 , αν υφίσταται αλλαγή φάσης σε θερμοκρασία T^* , είναι το άθροισμα της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του στερεού από T_1 σε T^* , της λανθάνουσας θερμότητας σε θερμοκρασία T^* και της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του υγρού από T^* σε T_2 :

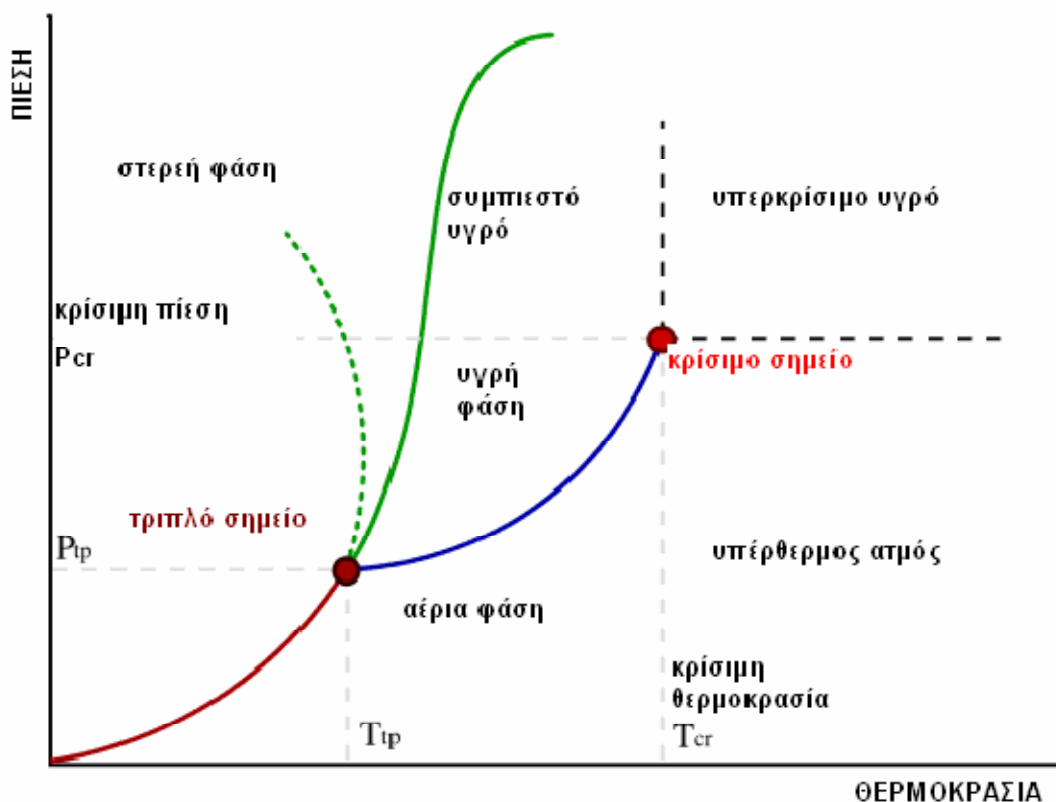
$$Q_s = m (T^* - T_1) c_s + \lambda + (T_2 - T^*) c_l$$

όπου m είναι η μάζα του υλικού, c_s και c_l είναι οι θερμοχωρητικότητες της στερεής και της υγρής φάσης αντίστοιχα και λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα.

Η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του νερού είναι 79.72 cal/gr ή 334.5 kJ/kg.

1.6 ΚΡΙΣΙΜΟ ΣΗΜΕΙΟ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΥΓΡΗ ΚΑΙ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ

Σε συστήματα που περιέχουν υγρή και αέρια φάση υπάρχει ένας συνδυασμός πίεσης και θερμοκρασίας που ονομάζεται κρίσιμο σημείο. Στο σημείο αυτό το υγρό είναι τόσο θερμό και υπό κατάλληλη πίεση, ώστε η διάκριση μεταξύ υγρής και αέριας φάσης είναι σχεδόν αδύνατη.



Σχήμα 1.4. Ποιοτικό διάγραμμα T - P καθαρής ουσίας

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

2.1 ΦΥΣΙΚΕΣ, ΤΕΧΝΙΚΕΣ, ΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ P.C.M.

Η κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και η μεγάλη ενθαλπία τήξης είναι οι βασικές απαιτήσεις που πρέπει να καλυφτούν από ένα P.C.M. . Ωστόσο, υπάρχουν απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν για τις περισσότερες, αλλά όχι για όλες τις εφαρμογές. Οι βασικότερες από αυτές είναι οι ακόλουθες :

- Φυσικές ιδιότητες :

1. Κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, ώστε να εξασφαλισθεί η αποθήκευση και στη συνέχεια η απελευθέρωση της θερμότητας σε μια εφαρμογή με σταθερό θερμοκρασιακό εύρος.

2. Μεγάλο ποσό ενθαλπίας αλλαγής φάσης (ΔH) για να επιτευχθεί υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης θερμότητας σε σχέση με την αποθήκευση που θα γινόταν αν είχαμε αποθήκευση ενέργειας με αισθητή θερμότητα.

3. Μεγάλη τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή της αποθηκευμένης θέρμανσης ή ψύξης με ικανοποιητικό ποσό θερμορροής.

4. Δυνατότητα αναστρεψιμότητας των αλλαγών φάσεων, ώστε το υλικό να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί πολλές φορές. Η σταθερότητα των κύκλων φόρτισης του υλικού στη διεθνή βιβλιογραφία καλούνται « cycling stability ».

5. Μικρό ποσό υπόψυξης (subcooling), ώστε να βεβαιωθούμε ότι το υλικό τήκεται και στερεοποιείται στις ίδιες θερμοκρασίες.

- Τεχνικές ιδιότητες :

1. Μικρή τιμή της πίεσης ατμών, ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα βρίσκεται το υλικό αλλαγής φάσης.

2. Μικρή μεταβολή του όγκου κατά την αλλαγή φάσης, επίσης για να μειωθούν οι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής στο δοχείο που θα φέρει το εν λόγω υλικό.

3. Φυσική και χημική σταθερότητα του υλικού για να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής.

4. Συμβατότητα με άλλα υλικά, ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια διάρκεια ζωής του στο δοχείο, χωρίς να επηρεάζεται η δομή και η σύστασή του από τα υλικά των τοιχωμάτων του δοχείου.

- Κινητικές ιδιότητες :

1. Υψηλή εμπύρινη αναλογία (nucleation rate), ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της υπόψυξης της υγρής φάσης.

2. Υψηλή ταχύτητα ανάπτυξης των κρυστάλλων, ώστε το σύστημα να μπορεί να καλύπτει τη ζήτηση ανακτώντας θερμότητα από το σύστημα αποθήκευσης.

- Οικονομικές ιδιότητες :

1. Χαμηλή τιμή πώλησης, ώστε να είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα προϊόντα, τα οποία προσφέρουν αποθήκευση θερμότητας για θέρμανση και ψύξη.

2. Μη τοξικά, για περιβαλλοντικούς λόγους και λόγους ασφάλειας.

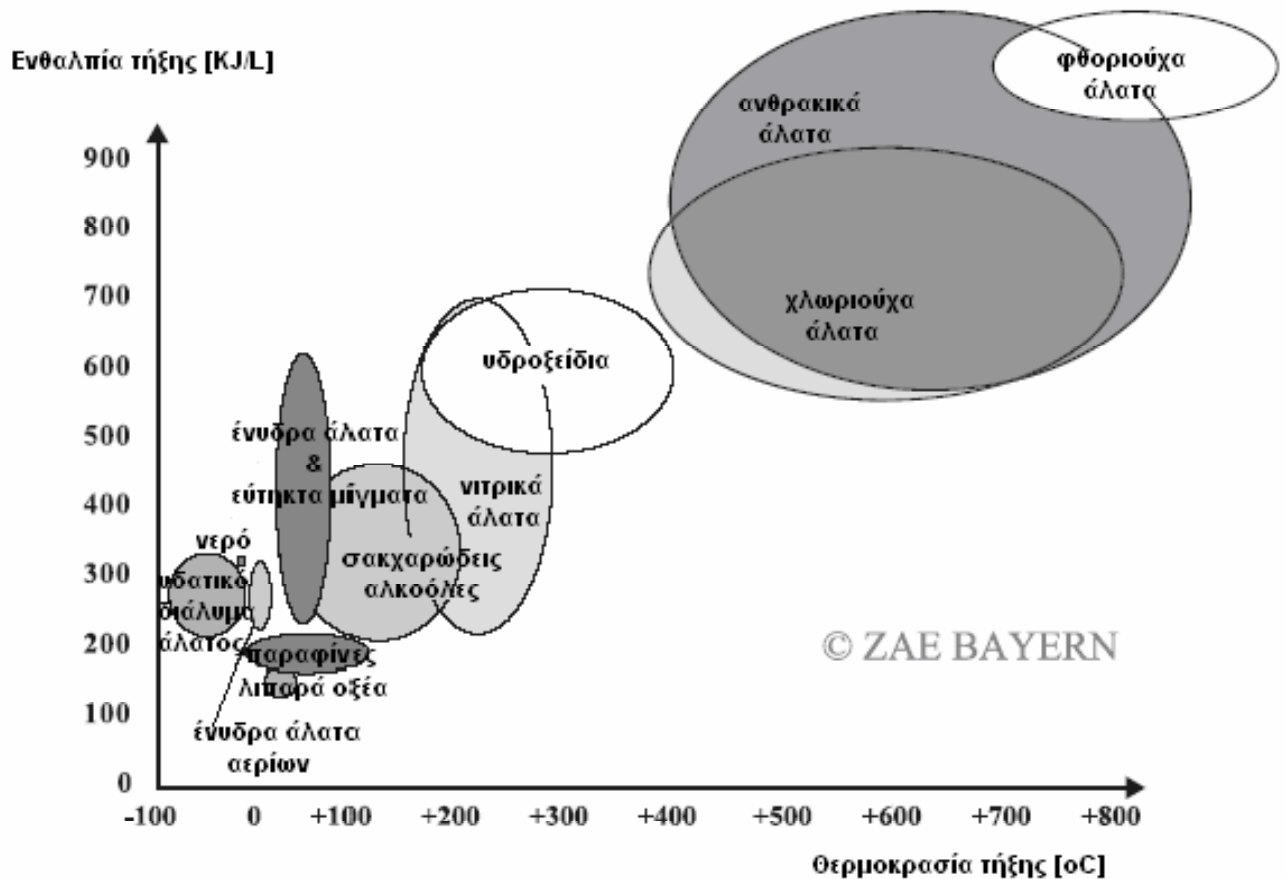
3. Ανακυκλώσιμα, επίσης για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους.

Συνήθως, η επιλογή της χρήσης ενός υλικού αλλαγής φάσης γίνεται με κριτήριο τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, την ενθαλπία και τη δυνατότητα αναστρεψιμότητας του κύκλου ψύξης – τήξης. Όμως, στην πλειονότητα των περιπτώσεων ένα υλικό δεν είναι δυνατόν να καλύψει όλες τις παραπάνω απαιτήσεις, διότι για παράδειγμα όταν η θερμική αγωγιμότητα είναι μικρή, τότε απαιτείται η τοποθέτηση του υλικού σε κάψουλες (encapsulation), ώστε να διευκολυνθεί η μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας. Επομένως, έχουν αναπτυχθεί στρατηγικές και προσεγγίσεις οι οποίες έχουν στόχο να αντιμετωπίσουν αυτά τα προβλήματα

2.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Το πιο γνωστό υλικό αλλαγής φάσης είναι το νερό, το οποίο κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο, μπορεί να αποθηκεύσει πολύ μεγάλα ποσά θερμότητας (περίπου 80 φορές περισσότερη αποθηκευμένη ενέργεια σε σχέση με την υγρή του κατάσταση). Μερικές όμως από τις ιδιότητές του, δημιουργούν πολλά προβλήματα κατά τη χρήση του ως P.C.M. . Αυτές είναι η θερμοκρασία πήξης του στους 0°C, η μεγάλη μεταβολή της πυκνότητάς του συναρτήσει με τη θερμοκρασία, κ.λ.π. Έτσι, αναπτύχθηκαν υλικά με βάση το νερό, ώστε να παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματά του, όπως η μεγάλη αγωγιμότητα και η μεγάλη τιμή της λανθάνουσας θερμότητάς του, αλλά όχι και τα μειονεκτήματά της χρήσης του και ιδιαίτερα τη θερμοκρασία τήξης. Μ' αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν τα πρώτα P.C.M., που είναι τα ένυδρα άλατα μία κατηγορία υλικών που αναπτύσσεται ακόμα και σήμερα. Τα ένυδρα άλατα είναι σχετικά ασταθείς ενώσεις με μόρια νερού που ανάλογα με την αποβολή ή απορρόφηση θερμότητας από το σύστημα, αποβάλλουν ή προσλαμβάνουν τα μόρια νερού.

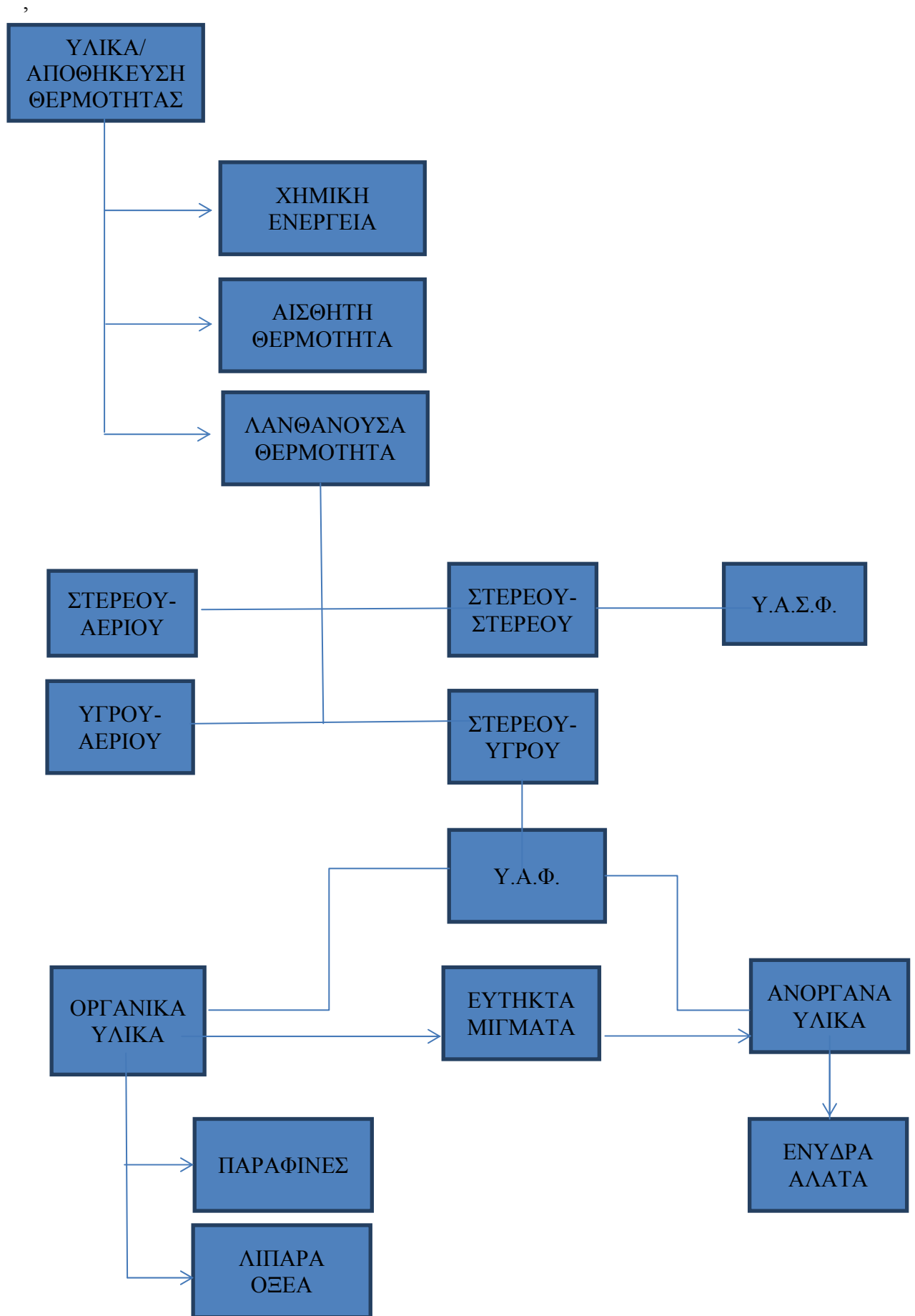
Ανάλογα με τις τεχνικές εφαρμογές, στις οποίες χρησιμοποιούνται τα P.C.M. πολλές διαφορετικές κατηγορίες υλικών έχουν μελετηθεί στο παρελθόν. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το τυπικό εύρος της ενθαλπίας κατά την τήξη συναρτήσει της θερμοκρασίας τήξης για τις πιο υποσχόμενες απ' αυτές τις κατηγορίες.



Σχήμα 1.5. Κλάσεις των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PCM σε σχέση με το τυπικό φάσμα της θερμοκρασίας τήξης και της ενθαλπίας τήξης τους (γράφημα: ZAE Bayern)

Τα υλικά που αλλάζουν φάση και ειδικότερα αυτά που από στερεά μετατρέπονται σε υγρά ομαδοποιούνται με βάση τη σύστασή τους σε οργανικά και ανόργανα υλικά. Η κατηγορία των οργανικών υλικών αντιπροσωπεύεται κυρίως από τις παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά (μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως και 25), καθώς και από τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών, ενώ των ανόργανων υλικών κυρίως από τα διαλύματα των ένυδρων αλάτων.

Μία κατηγορία υλικών αλλαγής φάσης που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και βρίσκεται υπό έρευνα, είναι η κατηγορία που περιλαμβάνει υλικά προερχόμενα από ανακυκλωμένα φυτικά ή ζωικά έλαια, των οποίων η διαθεσιμότητα αυξάνεται, καθώς αυξάνεται ολοένα και περισσότερο η παγκόσμια παραγωγή απορριμμάτων τα οποία εμφανίζουν μεγάλη περιεκτικότητα σε τρόφιμα.



Σχήμα 1.6. Ταξινόμηση υλικών αλλαγής φάσης

Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τη θερμοκρασία ή το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης, σε υλικά που αλλάζουν φάση κάτω από τους 15⁰C και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού ή σε μεταφορά ευπαθών υλικών (ιατρικές εφαρμογές) και σε υλικά που αλλάζουν φάση πάνω από τους 90⁰C και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ψύξης με απορρόφηση. Όλα τα άλλα υλικά με ενδιάμεσες τιμές θερμοκρασίας αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές θέρμανσης, σε συνεργασία με ηλιακά συστήματα ή εφαρμογές εξομάλυνσης των φορτίων κλιματισμού, καθώς επίσης και για αποθήκευση θερμότητας.

Τα υλικά που αλλάζουν φάση μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση τη θερμοκρασία τήξης τους και τη λανθάνουσα θερμότητα σε οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα υλικά.

2.3 ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα οργανικά υλικά αντιπροσωπεύονται κυρίως, όπως προαναφέραμε, από τις παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά, τα οποία είναι μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 έως 25. Εξίσου σημαντικές κατηγορίες οργανικών υλικών είναι τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών. Τα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης αναλύονται περαιτέρω σε παραφίνες και μη παραφίνες.

Στα πλεονεκτήματα των οργανικών P.C.M. συγκαταλέγεται το ότι τα περισσότερα είναι μη διαβρωτικά, υπάρχει μικρή πιθανότητα ρύπανσης του νερού, καθώς και αμελητέα εμφάνιση του φαινομένου “supercooling”, το οποίο οδηγεί στην μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης και επομένως σε περιορισμό της λανθάνουσας θερμότητας, που αποδίδεται σε σχέση με την συνήθη ή την απόδοσή της σε μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος. Επιπλέον, παρέχουν χημική και θερμική σταθερότητα, χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες P.C.M. και η παραγωγή τους γίνεται για ποικίλες εμπορικές εφαρμογές

Τα μειονεκτήματα των οργανικών P.C.M. είναι η χαμηλότερη θερμότητα υγροποίησης, ο χαμηλότερος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ιδιότητα που περιορίζει τις εφαρμογές τους και γι' αυτό το λόγο έχουν εξεταστεί πολλές περιπτώσεις εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή χρήση δοχείων και σωλήνων με πτερύγια, με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας μέσα στο υλικό. Επίσης, στα οργανικά υλικά επηρεάζεται αρκετά η πυκνότητα του υλικού από τη φάση, ώστε είναι δυνατόν, όταν το υλικό στερεοποιηθεί και αυξηθεί η πυκνότητά του, να αποκολληθεί από τα τοιχώματα του δοχείου, γεγονός που θα επηρεάσει αρκετά το φαινόμενο της αγωγής θερμότητας (ουσιαστικά δεν είναι πλέον αγωγή, αλλά αγωγή-συναγωγή θερμότητας), καθώς και το ότι είναι αναφλέξιμα σε χαμηλές θερμοκρασίες.

2.4 ΠΑΡΑΦΙΝΕΣ

Οι παραφίνες που έχουν σημείο τήξης από 30 έως 90 °C έχουν 18 έως 50 άτομα άνθρακα. Όσο αυξάνεται το μήκος αλυσίδας του άνθρακα, τόσο αυξάνεται το μοριακό βάρος και η θερμοκρασία τήξης. Η ειδική θερμοχωρητικότητα τους είναι περίπου 2.1 kJ / kg °K και η λανθάνουσα θερμότητά τους από 180 έως 230 kJ / kg. Οι παραφίνες είναι μίγματα, που σε θερμοκρασία δωματίου έχουν την μορφή κεριού. Χημικά είναι μια ομάδα αλκανικών υδρογονανθράκων μεγάλου μοριακού βάρους, με γενικό μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} , με n μεγαλύτερο του 20. Η πιο απλή παραφίνη που συναντάται είναι το μεθάνιο (CH_4). Τα βαρύτερα μόρια παραφινών με 5 – 19 άτομα άνθρακα (οκτάνιο C_8H_{18}) εμφανίζονται ως υγρά σε συνήθεις θερμοκρασίες, ενώ με 20 – 40 άτομα άνθρακα σχηματίζουν στερεά σώματα.

Η φυσική ιδιότητα των παραφινών που ενδιαφέρει κυρίως τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, είναι το σημείο τήξης τους. Αυτό συμβαίνει γιατί θα πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να εξασφαλίζεται η αλλαγή φάσης τους μέσα στο εύρος θερμοκρασιών που απαιτείται από την εκάστοτε εφαρμογή.

Το σημείο τήξης τους ακολουθεί ένα είδος γραμμικής μεταβολής, καθώς εξαρτάται από το μοριακό βάρος τους. Όσο μεγαλύτερο είναι το μόριο της ένωσης, τόσο υψηλότερο είναι και το σημείο τήξης της ένωσης. Το σημείο τήξης εκτός από το μοριακό βάρος επηρεάζεται και από τη σταθερότητα της μοριακής δομής της ένωσης. Τα αλκάνια με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα σχηματίζουν καλά οργανωμένες στερεές δομές, σε αντίθεση με τα αλκάνια με περιττό αριθμό. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι τα αλκάνια με περιττό αριθμό εμφανίζουν χαμηλότερα σημεία τήξης, καθώς κατά τη μετάβασή τους στην υγρή φάση απαιτούν λιγότερη ενέργεια για τη διάσπαση της δομής τους.

Οι περισσότερες παραφίνες αποτελούνται από ευθείες ανθρακικές αλυσίδες με δύο μεθυλικά μόρια κοντά στο τέλος της αλυσίδας. Διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες, ανάλογα με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα τους. Υπάρχουν οι n -παραφίνες, οι οποίες έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα και οι ισο-παραφίνες, των οποίων η ανθρακική αλυσίδα αποτελείται από περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα. Το κατά πόσο μία παραφίνη θα είναι ισο-παραφίνη ή όχι, εξαρτάται από τον αριθμό των αλκανίων που περιέχονται στην ουσία (75% έως 100%). Το σημείο τήξης των παραφινών εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ατόμων άνθρακα του μορίου.

Οι παραφίνες είναι ιδανικά υλικά για χρήση ως υλικά αλλαγής φάσης, ωστόσο θέλουν προσοχή κατά τη χρήση τους, καθώς είναι εύφλεκτα υλικά. Έχουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος και μπορούν να δημιουργηθούν, μέσω μιγμάτων, υλικά κατάλληλα να καλύψουν οποιοδήποτε εύρος θερμοκρασιών, ανάλογα με την εκάστοτε εγκατάσταση. Επίσης, οι παραφίνες ως οργανικές ενώσεις είναι φθηνές και άφθονες. Έχουν αρκετά καλή αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με άλλα υλικά, όπως επίσης έχουν το πλεονέκτημα να μην υπερψύχονται, δηλαδή όλο το υλικό στερεοποιείται, χωρίς εμφάνιση υπέρψυξης, άρα το υλικό αποδίδει τη μέγιστη αποθηκευτική ικανότητά του. Επίσης, σαν οργανικές ουσίες, δεν εμφανίζουν στη διάρκεια ζωής τους το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων, πράγμα που από μόνο του σημαίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ακόμα, οι παραφίνες έχουν άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση χωρίς να επηρεάζονται καθόλου οι ιδιότητές τους. Αυτό οφείλεται στο ότι παρουσιάζουν χαμηλή πίεση ατμοποίησης, με αποτέλεσμα τις ελάχιστες απώλειες υλικού σ' ένα μεγάλο βάθος χρόνου χρήσης. Επιπλέον, δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο. Ένα άλλο επιπλέον πλεονέκτημα των παραφινών είναι

ότι χαρακτηρίζονται από χημική και θερμική σταθερότητα. Τέλος, ένα μειονέκτημα των παραφινών είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που εμφανίζουν, ωστόσο μπορεί εύκολα να ξεπεραστεί, μέσω εμπλουτισμού του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή με χρήση ειδικών διαμορφωμένων πτερυγίων.

Παρόλα τα πλεονεκτήματα των παραφινών, πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα το γεγονός, ότι πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 10K (περίπου 9K πριν το σημείο τήξης και 1K μετά από αυτό). Ένα τέτοιο φαινόμενο αν δε ληφθεί υπ' όψιν, μπορεί να οδηγήσει σε μη σωστή εκλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές.

Η πλειοψηφία των οργανικών P.C.M. δεν είναι παραφίνες, είναι οξείδια. Χαρακτηρίζονται από τον χημική τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ και το σημείο τήξης τους είναι κοντά σ' αυτό των παραφινών. Το μειονέκτημά τους είναι ότι είναι τοξικά και πιο ακριβά από τις παραφίνες. Καθένα από τα υλικά σ' αυτήν την κατηγορία έχει τις δικές του ιδιότητες σε αντίθεση με τις παραφίνες, των οποίων οι ιδιότητες σχεδόν ταυτίζονται. Σ' αυτήν την κατηγορία ανήκουν και τα λιπαρά οξέα, οι εστέρες και οι αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών. Αυτή είναι η μεγαλύτερη κατηγορία υλικών που είναι υποψηφία για την αποθήκευση της αλλαγής φάσης. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτών των οργανικών υλικών, είναι τα εξής:

- ❖ υψηλή θερμοκρασία τήξης
- ❖ ευφλεκτότητα
- ❖ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- ❖ χαμηλό σημείο ανάφλεξης
- ❖ διαφορετικό επίπεδο τοξικότητας
- ❖ αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες

2.5 ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ

Στην Οργανική Χημεία και ειδικότερα στη Βιοχημεία, λιπαρό οξύ ονομάζεται ένα καρβοξυλικό οξύ, συνήθως με μακρά ανθρακική αλυσίδα, είτε κορεσμένη, είτε ακόρεστη. Τα λιπαρά οξέα προέρχονται από φυσικά λίπη και έλαια με τουλάχιστον 8 άτομα άνθρακα στην αλυσίδα τους, ωστόσο στην ίδια κατηγορία μπορεί να συμπεριληφθούν και οξέα με μικρότερο μοριακό βάρος όπως το βουτυρικό οξύ, το οποίο εμφανίζει 4 άτομα άνθρακα στην αλυσίδα του.

Τα λιπαρά οξέα είναι είτε κορεσμένα, είτε ακόρεστα. Η βασική διαφορά των δύο κατηγοριών είναι ότι τα κορεσμένα οξέα δεν περιέχουν καθόλου διπλούς δεσμούς ή άλλα λειτουργικά σύνολα κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας, ενώ τα ακόρεστα οξέα, τα οποία είναι παρόμοιας μορφής με τα κορεσμένα, περιέχουν αλκύλια κατά μήκος της ανθρακικής αλυσίδας με αποτέλεσμα να υπάρχουν διπλοί δεσμοί μεταξύ των ατόμων του άνθρακα.

Τα λιπαρά οξέα εμφανίζουν σημεία τήξης και λανθάνουσα θερμότητα παρόμοια μ' αυτά των παραφινών. Επίσης, παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως η αποθήκευση θερμότητας, η έλλειψη του φαινομένου υπόψυξης και του διαχωρισμού των φάσεων, η μη-τοξικότητα και η συμβατότητά τους με τα περισσότερα υλικά, καθώς επίσης και χημική σταθερότητα.

Στους παρακάτω πίνακες διακρίνουμε οργανικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά αλλαγής φάσης.

Compound	Melting point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
Butyl stearate	19	140
Paraffin C ₁₆ -C ₁₈	20-22	152
Capric-Lauric acid	21	143
Dimethyl sabacate	21	120
Polyglycol E 600	22	127.2
Paraffin C ₁₃ -C ₂₄	22-24	189
(34% Mistiric acid + 66% Capric acid)	24	147.7
1-Dodecanol	26	200
Paraffin C ₁₈ (45-55%)	28	244
Vinyl stearate	27-29	122
Capric acid	32	152.7

Πίνακας 2.1. Οργανικές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως P.C.M.

Material	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
Paraffin C14	4	165	Not available	Not available
Paraffin C15-C16	8	153	Not available	Not available
Paraffin C16-C18	20-22	152	Not available	Not available
Paraffin C18	28	244	0.148 (liquid, 40 °C), 0.358 (solid, 25 °C)	774 (liquid, 70 °C) 814 (solid, 20 °C)
Erythritol	118	340	0.326 (liquid, 140 °C), 0.733 (solid, 20 °C)	1,300 (liquid, 140 °C), 1,480 (solid, 20 °C)
High density polyethylene (HDPE)	100-150	200	Not available	Not available

Πίνακας 2.2. Θερμοκρασία τήξης, ροή θερμότητας, θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα παραφινών και αλκοολούχων σακχάρων που έχουν χρησιμοποιηθεί ως P.C.M.

Material	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
Caprylic acid	16	149	0.149 (liquid, 38 °C)	901 (liquid, 30 °C) 981 (solid, 13 °C)
Butyl stearate	19	140	Not available	Not available
Capric acid	32	153	0.153 (liquid, 38 °C), 0.149 (liquid, 40 °C)	886 (liquid, 40 °C), 1,004 (solid, 24 °C)
Lauric acid	42-44	178	0.147 (liquid, 50 °C)	870 (liquid, 50 °C), 1,007 (solid, 24 °C)
Myristic acid	49-58	186, 204	Not available	861 (liquid, 55 °C), 990 (solid, 24 °C)
Palmitic acid	61, 64	185, 203	0.162 (liquid, 68 °C), 0.159 (liquid, 80 °C),	850 (liquid, 65 °C) 989 (solid, 24 °C)

Πίνακας 2.3. Θερμοκρασία τήξης, ροή θερμότητας, θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα λιπαρών οξέων που έχουν χρησιμοποιηθεί ως P.C.M.

2.6 ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΥΛΙΚΑ

Τα ανόργανα υλικά καλύπτουν μία μεγάλη θερμοκρασιακή κλίμακα. Περιλαμβάνουν το νερό στους 0°C, υδατικά διαλύματα αλάτων σε θερμοκρασίες μικρότερες από 0°C, ένυδρα άλατα μεταξύ 5°C και 130°C και τέλος διάφορα άλατα από 150°C και πάνω. Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να χωριστούν σε ένυδρα άλατα και μεταλλικά.

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος των ανόργανων υλικών. Η αρχή λειτουργίας των ένυδρων αλάτων, βασίζεται στην αποβολή του κρυσταλλικού νερού, το οποίο αποβάλλεται όταν προσδοθεί θερμότητα στο άλας σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό, αποθηκεύεται θερμότητα στο υλικό αλλαγής φάσης, η οποία αποβάλλεται με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος. Το πιο συνηθισμένο ένυδρο άλας είναι το άλας του Glauber $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, το οποίο περιέχει 44% Na_2SO_4 και 56% H_2O με θερμότητα τήξης 32,4°C και λανθάνουσα θερμότητα 254 KJ/Kg. Αν και είναι ένα από τα φθηνότερα υλικά που κυκλοφορούν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, τα προβλήματα διαχωρισμού των φάσεων, ο σχηματισμός ιζήματος και το φαινόμενο supercooling περιορίζουν το εύρος των εφαρμογών.

Η κατηγορία των μεταλλικών ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης περιλαμβάνει τα χαμηλής τήξης μέταλλα αλλά και τα εύτηκτα μέταλλα. Αυτά τα υλικά δεν έχουν θεωρηθεί ακόμη κατάλληλα ως τεχνολογία υλικών αλλαγής φάσης, κυρίως λόγω του βάρους τους. Ωστόσο, όταν θα απαιτούνται υλικά με μεγάλη συγκέντρωση όγκου, τότε θα επιλεχθούν ως τα καταλληλότερα λόγω της υψηλής θερμότητας τήξης τους ανά μονάδα όγκου. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των μεταλλικών και άλλων υλικών αλλαγής φάσης είναι η υψηλή θερμική αγωγιμότητα των πρώτων. Μερικά από τα χαρακτηριστικά των υλικών αυτών είναι τα εξής:

- χαμηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα βάρους
- υψηλή θερμοκρασία τήξης ανά μονάδα όγκου
- υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- χαμηλή ειδική θερμότητα
- σχετικά χαμηλή πίεση ατμού

Τα πλεονεκτήματα των ανόργανων P.C.M. σε σύγκριση με τα οργανικά είναι η μεγαλύτερη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης, η μη αναφλεξιμότητά τους, η σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητά τους και η υψηλότερη πυκνότητά τους.

Τα μειονεκτήματα των ανόργανων P.C.M. είναι ότι είναι διαβρωτικά, ότι είναι συνήθως η εμφάνιση του φαινομένου “supercooling”, η πιθανή δημιουργία ιζήματος λόγω του διαχωρισμού των φάσεων, η αβέβαιη θερμική σταθερότητα στις κυκλικές φορτίσεις, το αυξημένο κόστος αγοράς τους σε σχέση με τα οργανικά και τέλος, το ότι αποτελούν υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα τον πιθανό εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου, όταν είναι εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υψηλά ποσοστά υγρασίας.

Η ανάμιξη δύο ή περισσότερων ανόργανων συστατικών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ενός νέου υλικού αλλαγής φάσης με βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τα συστατικά του.

Στους παρακάτω πίνακες διακρίνουμε ανόργανες ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά αλλαγής φάσης.

Compound	Melting point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
KF·4H ₂ O	18.5	231
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.8	125.9
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29	190.8
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	296
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32	251

Πίνακας 2.4. Ανόργανες ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως P.C.M.

Material	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m K)	Density (kg/m ³)
H ₂ O	0	333	0.612 (liquid, 20 °C)	998 (liquid, 20 °C) 917 (solid, 0 °C)
LiClO ₃ ·3H ₂ O	8	253	Not available	1,720
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29 30	171, 192	0.540 (liquid, 39 °C) 1.088 (solid, 23 °C)	1,562 (liquid, 32 °C), 1,496 (liquid), 1,802 (solid, 24 °C) 1,710 (solid, 25 °C)
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	296	Not available	Not available
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	35–44	265 280	0.476 (liquid) 0.514 (solid)	1,522
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48–55	187, 209	Not available	1,670 (liquid) 1,750 (solid)
Na(CH ₃ COO)·3H ₂ O	58	226, 264	Not available	1,280 (liquid) 1,450 (solid)
Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	78	265, 280	0.653 (liquid, 86 °C) 1.255 (solid, 23 °C)	1,937 (liquid, 84 °C) 2,180 (solid)
Mg(NO ₃) ₂ ·6 H ₂ O	89 90	149, 163	0.490 (liquid, 95 °C) 0.669 (solid, 55.6 °C)	1,550 (liquid, 94 °C) 1,636 (solid, 25 °C)
MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	165, 169	0.570 (liquid, 120 °C) 0.704 (solid, 110 °C)	1,450 (liquid, 120 °C) 1,569 (solid, 20 °C)
NaNO ₃	307	172	0.5	2,260
KNO ₃	333	266	0.5	2,110
KOH	380	145	0.5	2,044
MgCl ₂	714	452	Not available	2,140
NaCl	800	492	5	2,160
Na ₂ CO ₃	854	276	2	2,533
KF	857	452	not available	2,370
K ₂ CO ₃	897	236	2	2,290

Πίνακας 2.5. Θερμοκρασία τήξης, ροή θερμότητας, θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα ανόργανων υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί ως P.C.M.

2.7 ΕΥΤΗΚΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Εύτηκτα ονομάζονται τα μίγματα P.C.M., τα οποία μπορεί να είναι είτε οργανικά, είτε ανόργανα ή ακόμα και μίγμα ανόργανων με οργανικά υλικά αλλαγής φάσης. Τέτοιου είδους μίγματα δεν εμφανίζουν διαχωρισμό φάσεων ούτε κατά την τήξη, αλλά ούτε και κατά την πήξη τους, λόγω της σύνθετης κρυσταλλικής δομής που αναπτύσσουν στις διεργασίες αυτές. Προφανές είναι πως τα εύτηκτα P.C.M. αναπτύχθηκαν λόγω των δυνατοτήτων που παρέχουν στους σχεδιαστές, ώστε να επιτύχουν τα επιθυμητά σημεία τήξης για την κάθε εφαρμογή. Θεωρείται δε, ότι συμπεριφέρονται και αντιμετωπίζονται σαν ένυδρα άλατα. Βασικό πλεονέκτημα με τα εύτηκτα P.C.M. είναι ότι εμφανίζουν την τάση να συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα και των δύο ομάδων, ενώ παράλληλα δεν έχουν την τάση να κάνουν το ίδιο με τα μειονεκτήματα. Το βασικό τους μειονέκτημα όμως είναι το κόστος παραγωγής, το οποίο είναι διπλάσιο έως τριπλάσιο απ' ότι των οργανικών και ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης.

Compound	Melting temperature (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)
66.6% $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 33.3% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25	127
48% CaCl_2 + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H_2O	26.8	188
47% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ + 53% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	136
60% $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ + 40% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	30	200.5

Πίνακας 2.6. Ανόργανες εύτηκτες ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως P.C.M.

2.8 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΕΡΕΗΣ ΦΑΣΗΣ (ΥΑΣΦ)

Σε περιπτώσεις αλλαγής φάσης στερεού-στερεού (ΥΑΣΦ), η θερμότητα αποθηκεύεται καθώς το υλικό μεταπίπτει από τη μία κρυσταλλική δομή σε κάποια άλλη. Παρ' όλο που οι περισσότερες τέτοιες μεταπτώσεις εμφανίζουν μικρή αποθηκευτική ικανότητα υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας και μικρή ογκομετρική αλλαγή, υπάρχουν μεταπτώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα, σχεδόν όσο και μία μετάπτωση από στερεό σε υγρό. Τα πλεονεκτήματα αυτών των P.C.M. είναι προφανή, καθώς δεν περιλαμβάνεται κανένας από τους περιορισμούς των υπολοίπων υλικών, όπως για παράδειγμα της μεγάλης ογκομετρικής αλλαγής, της τάσης ατμών, της διαρροής ή της διάβρωσης. Ωστόσο, δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα και ακόμη βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο.

3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως υλικό αλλαγής φάσης σπάνια συγκεντρώνει όλες τις απαραίτητες ιδιότητες, ώστε να είναι πλήρως αποδοτικό. Γι' αυτόν το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι προκειμένου να επιλυθούν ή να αποφευχθούν τέτοιου είδους προβλήματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικότερα προβλήματα, αλλά και πιθανούς τρόπους επίλυσής τους που εμφανίζονται σ' αυτού του είδους τα υλικά.

3.1 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ

Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης και κυρίως τα ένυδρα άλατα έχουν πιο περίπλοκη συμπεριφορά από τα οργανικά υλικά, καθώς εκτός από τις φάσεις τήξης και στερεοποίησης περνούν και τα στάδια της ενυδάτωσης και της αφυδάτωσης. Τα ένυδρα άλατα εμφανίζουν τρεις κύριους τύπους συμπεριφοράς κατά τη μετάβασή τους από τη μία φάση σε κάποια άλλη:

- τον ομοιόμορφο,
- τον ανομοιόμορφο
- τον ημι-ομοιόμορφο.

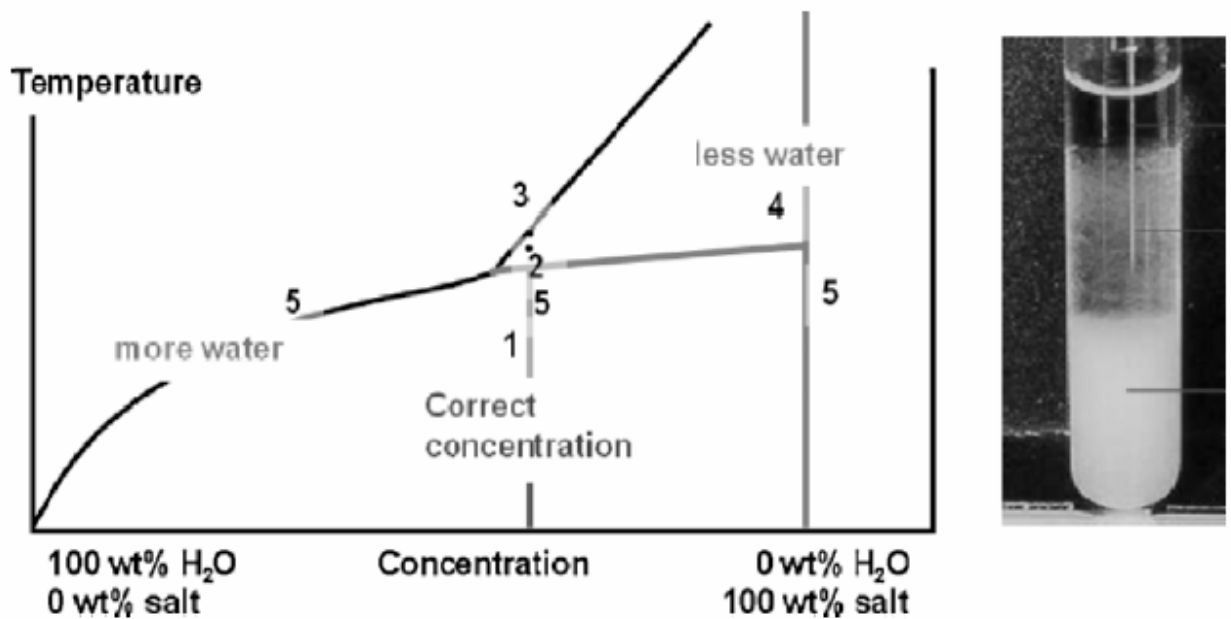
Η επιθυμητή συμπεριφορά είναι αυτή του ομοιόμορφου τρόπου τήξης, ο οποίος λαμβάνει χώρα όταν η σύσταση της στερεάς φάσης είναι ίδια με τη σύσταση της υγρής. Η ανομοιόμορφη τήξη συμβαίνει στην περίπτωση που κατά την τήξη του P.C.M. εμφανίζονται δύο ξεχωριστές φάσεις. Αυτές είναι ένα κορεσμένο διάλυμα και ένα ιζήμα αδιάλυτης άνυδρης ουσίας. Η ημι-ομοιόμορφη τήξη γίνεται όταν το P.C.M. έχει δύο ή περισσότερες ένυδρες μορφές με διαφορετικές συστάσεις στερεού μέρους και διαφορετικά σημεία τήξης.

Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσης (phase separation ή semi congruent melting), οφείλεται στην μεγάλη θερμοαποθηκευτική ικανότητα των ένυδρων αλάτων που είναι δύσκολο να διατηρηθεί καθώς μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης του υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών. Η κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο διαχωρισμός των φάσεων του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός ανύδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος (ανομοιόμορφη τήξη), δημιουργώντας μη αναστρέψιμη διαδικασία που οδηγεί σε συχνή εξασθένηση των ιδιοτήτων τους.

Το ένυδρο άλας αποτελείται από δύο συστατικά, το αλάτι και το νερό. Αρχικά η απλή φάση του αλάτος θερμαίνεται από το σημείο 1 έως το σημείο 2. Στο σημείο 1 το υλικό βρίσκεται σε στερεή φάση. Από το σημείο 3 και πάνω το υλικό βρίσκεται σε

υγρή κατάσταση. Ανάμεσα στα σημεία 2 και 3 έχουμε το σχηματισμό δύο φάσεων. Στη μία φάση έχουμε την υγρή και στην άλλη φάση έχουμε μία μικρή ποσότητα με λιγότερο νερό. Αυτό το σημείο είναι το σημείο 4. Το αποτέλεσμα της διαφορετικής πυκνότητας των δύο αυτών φάσεων είναι ο μακροσκοπικός διαχωρισμός τους, άρα και οι διαφορές στις συγκεντρώσεις των χημικών που σχηματίζουν το υλικό αλλαγής φάσης. Αυτό διακρίνεται στο σημείο 5.

Ο ακριβής μηχανισμός του φαινομένου περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα.

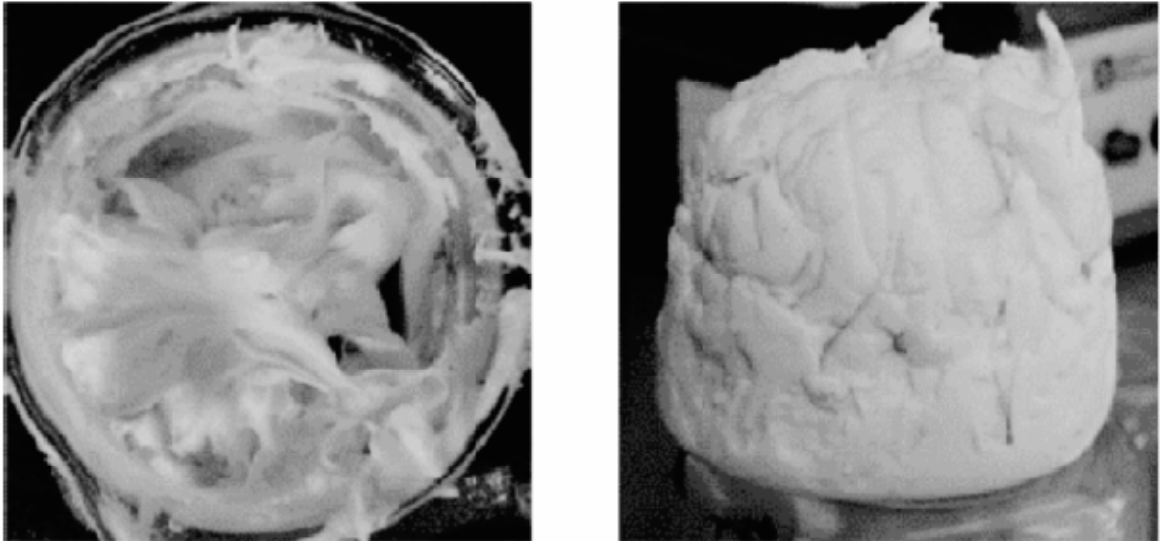


Σχήμα 3.1. Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων άλατος-νερού, αντιστοιχία των φάσεων με δοκιμαστικό σωλήνα, για δεδομένη σύσταση και συγκεκριμένες θερμοκρασίες

Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων διαχωρισμού φάσεων χρησιμοποιούνται κολλοειδή προσθετικά (gelling additives), τα οποία δημιουργούν μια δομή γύρω από τις φάσεις των συστατικών του υλικού και δεν επιτρέπουν τη διέλευση φάσεων με διαφορετικές πυκνότητες διαμέσου της δομής τους.

Εναλλακτικά, αν δε χρησιμοποιηθούν προσθετικά, είναι δυνατόν να αναθερμάνουμε το μίγμα και με μοριακή διάχυση να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η χρήση κολλοειδών προσθετικών σε ένυδρο άλας χλωριούχου ασβεστίου.



Σχήμα 3.2. Χρήση κολλοειδούς προσθετικού σε ένυδρο άλας $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

3.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΠΟΨΥΞΗΣ / ΥΠΕΡΨΥΞΗΣ (SUBCOOLING – SUPERCOOLING)

Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που αφορά στο σύνολο των ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης, αλλά και σε μέρος των οργανικών είναι το φαινόμενο του supercooling (υπέρψυξη). Ο συνδυασμός του φαινομένου της αποσύνθεσης του ένυδρου άλατος, καθώς επίσης και τα μειωμένα επίπεδα πυρηνοποίησης κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του υλικού οδηγούν στην εμφάνιση του φαινομένου. Ένα ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης θα έπρεπε να στερεοποιείται και να τήκεται στην ίδια θερμοκρασία.

Το φαινόμενο του supercooling είναι η διαδικασία της ψύξης ενός υγρού σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο στερεοποίησής του, χωρίς το υγρό να στερεοποιηθεί. Γενικά, ένα υγρό κάτω από το σημείο στερεοποίησής του θα διαμορφώσει κρυσταλλική δομή γύρω από έναν παράγοντα διαμόρφωσης κρυσταλλικής δομής (πυρήνα κρυστάλλου). Κατά τη διάρκεια της υπόψυξης το υλικό βρίσκεται σε μια ασταθή κατάσταση, δηλαδή δε βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία.

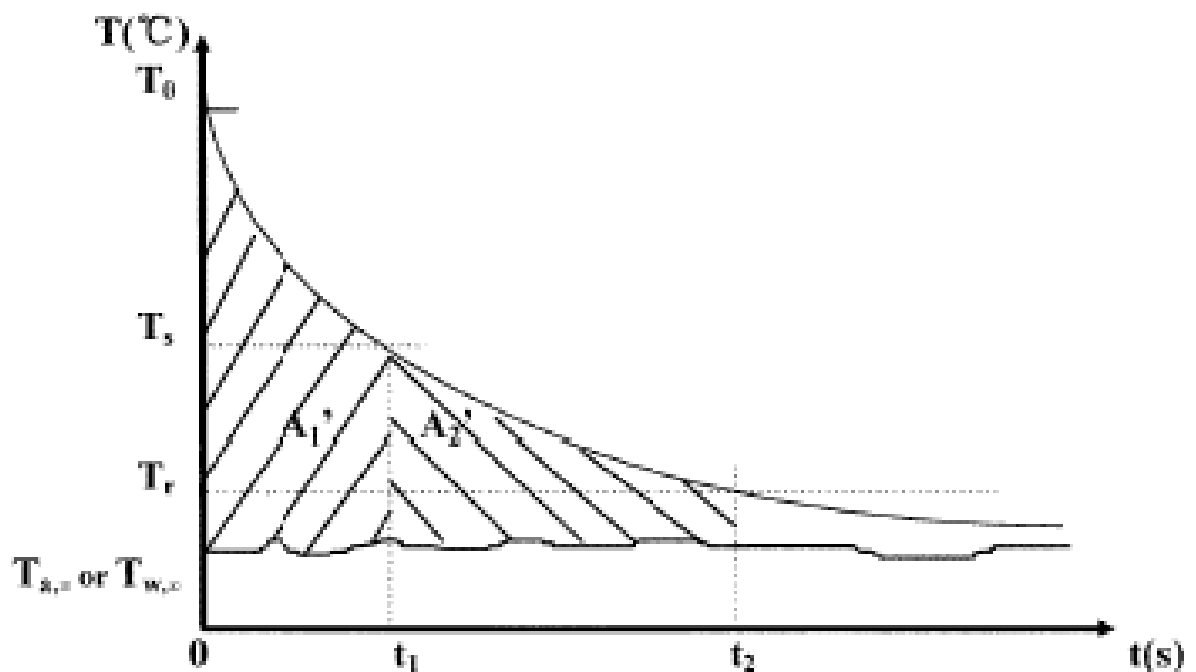
Η ύπαρξη supercooling οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης, συνεπώς η λανθάνουσα θερμότητα αποδίδεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την επιθυμητή ή σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Βασική παρατήρηση είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ψύξης του δείγματος, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός supercooling. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο βαθμός του supercooling δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο όγκος του δείγματος, η «καθαρότητα» του υλικού, ο ρυθμός ψύξης και η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.

Το φαινόμενο είναι εμφανές αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου κατά τη ψύξη ενός δείγματος P.C.M., όπου παρουσιάζεται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού P.C.M. πριν την εκκίνηση της αλλαγής φάσης κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης. Κατά τη συνέχιση της ψύξης, η θερμοκρασία του δείγματος αυξάνεται και σταθεροποιείται, τις περισσότερες φορές για μικρό χρονικό διάστημα, στη θερμοκρασία στερεοποίησης, καθώς ακολουθεί πτώση της μέχρι την ολοκλήρωση της στερεοποίησης.

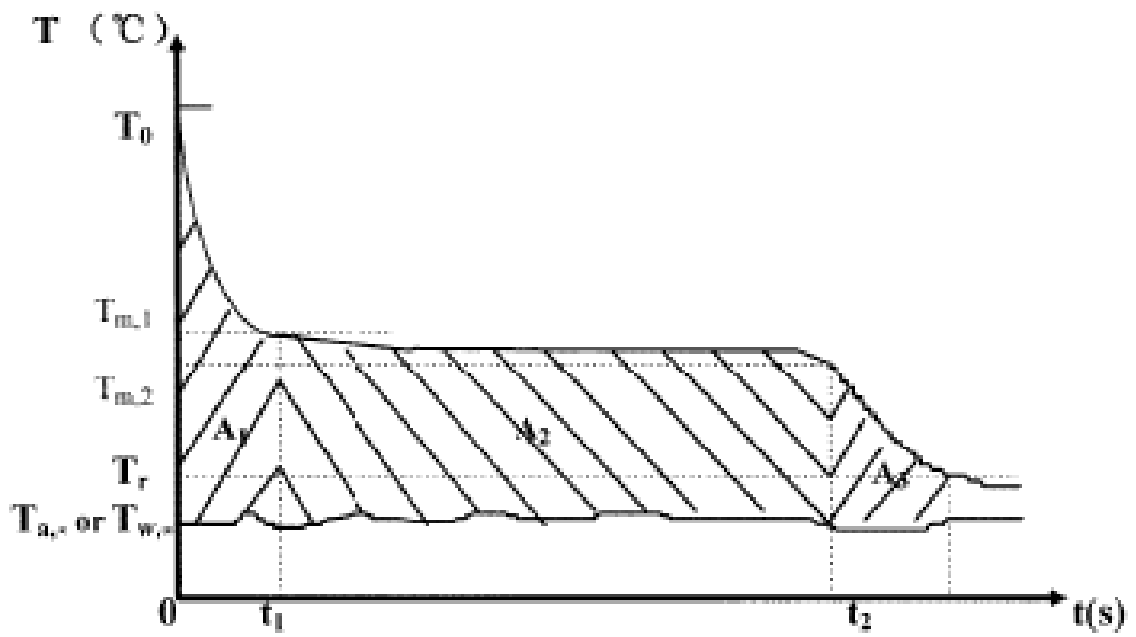
Εφαρμογές του φαινομένου βρίσκουμε και στη βιομηχανία με τη μέθοδο της αστραπιαίας κατάψυξης (flash freezing), όπου η στερεοποίηση επιθυμητών αντικειμένων επιτυγχάνεται με την έκθεση αυτών σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Αυτό επιτυγχάνεται διότι ένα υπέρψυκτο υγρό μπορεί να παραμείνει στην υγρή φάση αρκετά κάτω από το σημείο στερεοποίησής του, όταν το ίδιο το υγρό έχει λιγότερες πιθανότητες σχηματισμού αρχικού πυρήνα κρυστάλλου, αν δηλαδή είναι καθαρό, χωρίς προσμίξεις ή άλλους παράγοντες, ή αν το δοχείο στο οποίο βρίσκεται είναι λείο σε ικανοποιητικό βαθμό. Από τη στιγμή όμως που για κάποιον από τους παραπάνω λόγους ένα υπέρψυκτο υγρό μπει σε φάση στερεοποίησης, αυτή θα συντελεστεί σε ιδιαίτερα μικρό χρονικό διάστημα.

Η αντίστοιχη διαδικασία για τη τήξη ενός στερεού είναι πολύ πιο δύσκολη καθώς ένα στερεό για δοσμένη πίεση θα λειώσει πάντα σε σχεδόν ίδια θερμοκρασία.

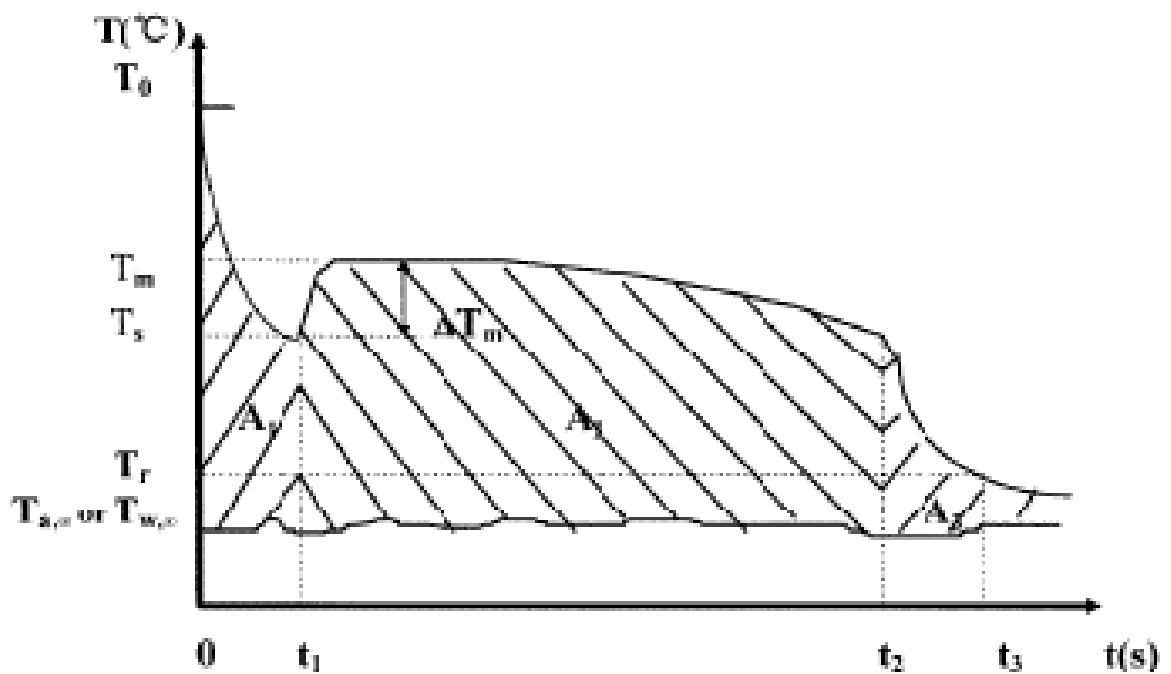
Το φαινόμενο της υπέρψυξης όσο εντείνεται τόσο μη αποδοτικότερη κάνει τη λειτουργία του P.C.M. και κατά συνέπεια την αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας.



Σχήμα 3.3. Τυπική καμπύλη ψύξης του νερού



Σχήμα 3.4. Τυπική καμπύλη ψύξης ενός υλικού αλλαγής φάσης χωρίς supercooling



Σχήμα 3.5. Τυπική καμπύλη ψύξης ενός υλικού αλλαγής φάσης με supercooling

Το φαινόμενο είναι δυνατόν να περιορισθεί με χρήση ενός πυρήνα (nucleator), ο οποίος προστίθεται στο P.C.M. για να εξασφαλίσει ότι η στερεή φάση θα σχηματισθεί με μηδαμινή ή ακόμα και καθόλου υπόψυξη.

Τα είδη των πυρήνων που μπορούν να προστεθούν είναι τα ακόλουθα :

- «Εγγενής» Πυρήνες (Intrinsic nucleators) : Πρόκειται για ίδια συστατικά του P.C.M.. Πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το P.C.M., επειδή αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να τήξουν μαζί μ' αυτό και κατόπιν να είναι ανενεργά.
- ✓ «Συμβατοί» Πυρήνες (Extrinsic nucleators) : Πρόκειται για χημικά, τα οποία παρουσιάζουν όμοια δομή με αυτή των P.C.M.. Αυτό σημαίνει ότι έχουν παρόμοιες θερμοκρασίες τήξης με το P.C.M. που χρησιμοποιούμε. Επίσης, θα πρέπει να φυλάσσονται ξεχωριστά από το P.C.M., επειδή αλλιώς υπάρχει κίνδυνος να τήξουν μαζί μ' αυτό και κατόπιν να είναι ανενεργά.

Για τα περισσότερα P.C.M. έχουν βρεθεί κατάλληλοι πυρήνες που περιορίζουν το φαινόμενο του supercooling, ωστόσο για τα νεότερα υλικά αλλαγής φάσης η αναζήτηση πυρήνα είναι χρονοβόρα και πολλές φορές ανεπιτυχής.

3.3 ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η χαμηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας ενός P.C.M. είναι μια φυσική ιδιότητα των μη μεταλλικών υγρών και αποτελεί μειονέκτημα για ένα P.C.M., καθώς για να υπάρχει αποδοτική μεταφορά θερμότητας πρέπει το υπεύθυνο υλικό να έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι το P.C.M., αποθηκεύει ένα μεγάλο ποσό θερμότητας σε μικρό όγκο και αυτή η θερμότητα πρέπει να μεταφερθεί μέσω της επιφάνειας αυτού του όγκου στο εξωτερικό περιβάλλον, ώστε να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα.

Γενικά υπάρχουν δύο τρόποι βελτίωσης της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού, οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω :

- Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιώντας μεταφορά μάζας, με μεταφορά. Ο μηχανισμός της μεταφοράς εμφανίζεται μόνο κατά την υγρή φάση και επομένως ενεργεί μόνο όταν θερμότητα μεταφέρεται στο P.C.M.. Όταν η θερμότητα εξάγεται, οι στερεές μορφές σχηματίζονται στις συναλλασσόμενες με θερμότητα επιφάνειες.
- Βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη των αντικειμένων με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα στο P.C.M..

3.4 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ P.C.M. ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Η τοποθέτηση των P.C.M. σε κάψουλες και η χρήση σύνθετων υλικών είναι αναγκαία για τεχνικούς λόγους, διότι υπάρχει κίνδυνος να έχουμε διαρροή της υγρής φάσης από το χώρο στον οποίο αυτή χρησιμοποιείται. Διακρίνουμε δύο είδη ενσωμάτωσης των P.C.M. σε κάψουλες :

- ✓ Ενσωμάτωση σε κάψουλες με διάμετρο μεγαλύτερη του 1 cm. : Αυτή η μέθοδος διατηρεί το υλικό του P.C.M. σε πεπερασμένο χώρο και εμποδίζει την επαφή του με άλλα συστατικά. Επίσης, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει και άλλα πλεονεκτήματα, όπως ότι βελτιώνει τη συμβατότητα του υλικού με το περιβάλλον, καθώς λειτουργεί σαν φράγμα μεταξύ του P.C.M. και του χώρου που αυτό ευρίσκεται, βελτιώνει τη διακίνηση του P.C.M. κατά την παραγωγή του και μειώνει ουσιαστικά τις μεταβολές του όγκου, που συνήθως αποτελούν ένα πλεονέκτημα για τις περισσότερες εφαρμογές.

- ✓ Ενσωμάτωση σε κάψουλες με διάμετρο μικρότερη του 1 mm. : Η μέθοδος έχει τα ίδια χαρακτηριστικά μ' αυτή της προηγούμενης μεθόδου, αλλά έχει επιπλέον άλλα δύο προτερήματα. Βελτιώνει τη μετάδοση θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο λόγω του μεγάλου ποσοστού της επιφάνειας συναλλαγής και επίσης ότι βελτιώνει ουσιαστικά τη σταθερότητα της κυκλικής φόρτισης καθώς ο διαχωρισμός των φάσεων είναι ιδιαίτερα περιορισμένος λόγω των μικροσκοπικών διαστάσεων της κάψουλας που εμπεριέχει το P.C.M..

Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που αποτελούνται από ένα P.C.M. και τουλάχιστον ένα άλλο υλικό. Το άλλο υλικό χρησιμοποιείται για να βελτιώσει κάποιες από τις ιδιότητες του P.C.M.. Η χρήση σύνθετων ενώσεων έχει επιπλέον τα εξής πλεονεκτήματα :

- ❖ Βελτιώνει τη σταθερότητα της κυκλικής φόρτισης, αφού οι μικροσκοπικές δομές μειώνουν ουσιαστικά το διαχωρισμό των φάσεων στο τήγμα.

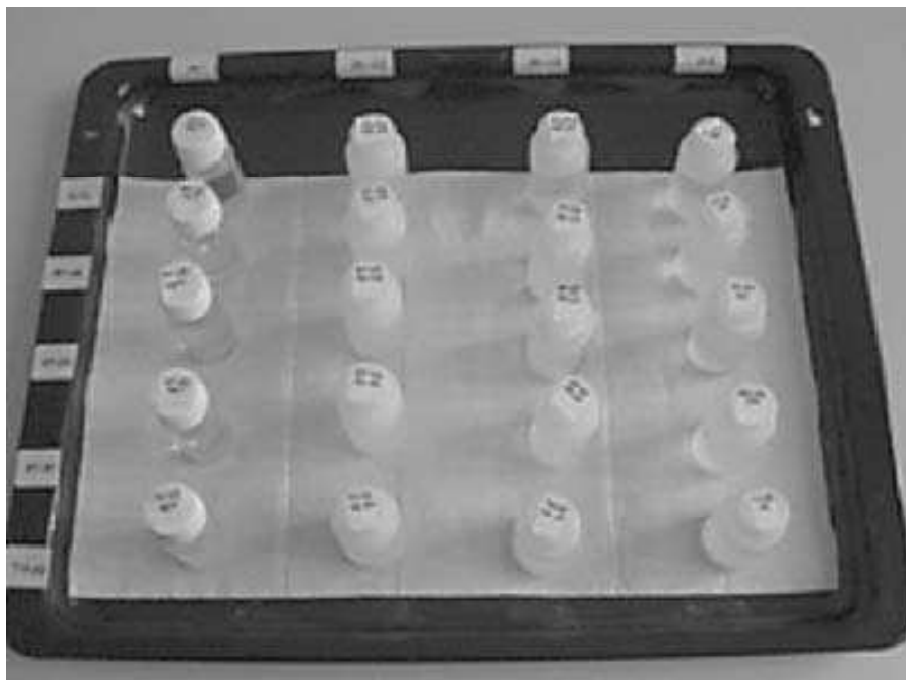
- ❖ Βελτιώνει τη μεταφορά θερμότητας, μέσω της προσθήκης των υλικών με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα όπως για παράδειγμα το γραφίτη.

3.5 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΜΕ ΑΛΛΑ ΥΛΙΚΑ

Η συμβατότητα των P.C.M. μ' άλλα υλικά είναι σημαντική τόσο για τη διάρκεια ζωής του δοχείου ή της κάψουλας που περιέχει το P.C.M., όσο και για μία πιθανή διαρροή του τήγματος προς τον περιβάλλοντα χώρο, όπου μπορεί να προξενήσει προβλήματα. Τα πιο συνήθη προβλήματα αναφορικά με τη συμβατότητα των υλικών και τα P.C.M. είναι τα ακόλουθα :

- Διάβρωση των μετάλλων όταν έρθουν σε επαφή με ανόργανα P.C.M..
- Απώλεια σταθερότητας δομής των πλαστικών όταν έρχονται σε επαφή με οργανικά P.C.M..
- Μετακίνηση υγρών ή αερίων μέσω πλαστικών δοχείων, τα οποία επηρεάζουν την απόδοση του περιεχόμενου ανόργανου ή οργανικού P.C.M. με το περιβάλλον.

Η επίλυση του προβλήματος βασίζεται σε εμπειρικές τεχνικές. Αυτό σημαίνει ότι ο έλεγχος της συμβατότητας προέρχεται από πειράματα που γίνονται σε συνθήκες τυπικές της εκάστοτε εφαρμογής. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων καθορίζουν την τελική επιλογή των χρησιμοποιούμενων υλικών.



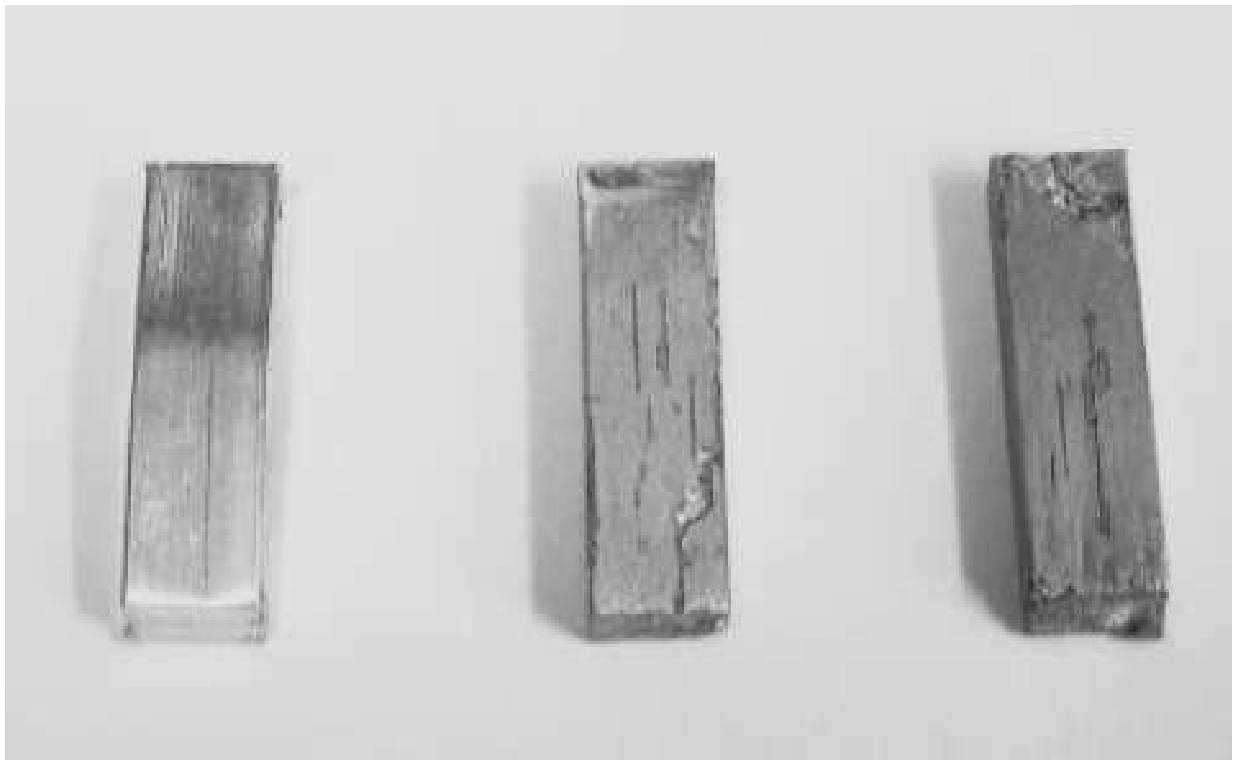
Σχήμα 3.6. Πείραμα συμβατότητας πλαστικού-ανόργανου και πλαστικού οργανικού P.C.M.

3.6 ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Πολύ σημαντικός παράγοντας στη λειτουργία ενός υλικού αλλαγής φάσης είναι να μην είναι διαβρωτικό, κυρίως απέναντι σε μεταλλικά υλικά. Ωστόσο, τα ανόργανα υλικά στην πλειοψηφία τους είναι διαβρωτικά, οι παραφίνες όμως όχι. Η διαβρωτικότητα ενός υλικού αλλαγής φάσης μπορεί σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές θερμοκρασίας και φάσης σε βάθος χρόνου να καταστρέψει τη συσκευασία του υλικού αλλαγής φάσης και κατ' επέκταση το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Σε πολλές θερμικές εφαρμογές με υλικό αλλαγής φάσης ο γραφίτης χρησιμοποιείται για την βελτίωση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας, όμως ενισχύει και το φαινόμενο της οξείδωσης, όπου και όταν αυτό εμφανίζεται.

Οι ακόλουθες φωτογραφίες αποδίδουν χαρακτηριστικά τις διαστάσεις του φαινομένου και το πόσο σημαντικό είναι το εν λόγω πρόβλημα να αντιμετωπίζεται από την αρχή, διότι είναι δυνατόν να αχρηστεύσει εντελώς το θερμικό σύστημα στο οποίο χρησιμοποιείται το διαβρωτικό υλικό αλλαγής φάσης.

Παρουσιάζεται ένα κομμάτι αλουμινίου, το οποίο έχει οξειδωθεί λόγω συνεργασίας με διαβρωτικό υλικό αλλαγής φάσης.



Σχήμα 3.7. Εμφάνιση διαβρωτικών φαινομένων στο υλικό της συσκευασίας λόγω συνεργασίας με ένυδρο άλας.

3.7 ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ P.C.M. ΣΕ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Το σοβαρότερο κριτήριο για την αξιοποίηση των P.C.M. σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών, χωρίς όμως εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους, ο οποίος μετριέται καλύτερα σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού παρά σε πραγματικό χρόνο. Η ανεπάρκεια σταθερότητας των υλικών οφείλεται σε δύο λόγους :

- ✓ Στο ότι η χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το P.C.M. έχει μικρή σταθερότητα.
- ✓ Στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν να λάβει χώρα μεταξύ του P.C.M. και των υλικών που έρχεται σε επαφή.

Το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών που ως αντικείμενο αναφοράς έχουν την διατήρηση των ιδιοτήτων των P.C.M. κατά την περιοδική φόρτιση και αποφόρτισή τους ή τη διαβρωτική τους ικανότητα αφορούν τα ένυδρα άλατα. Για τις παραφίνες και τα παράγωγα υλικά τους έχει βρεθεί ότι έχουν άριστη σταθερότητα στις θερμικές τους ιδιότητες, καθώς επίσης και καμία επίδραση όταν έρχονται σ' επαφή με τα περισσότερα υλικά (μέταλλα αλλά και δομικά υλικά). Αντιθέτως, τα ένυδρα άλατα παρουσιάζουν διαβρωτικές τάσεις όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τα περισσότερα διαδεδομένα μέταλλα .

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΝΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Το να γνωρίζουμε τις φυσικές και τεχνικές ιδιότητες ενός υλικού αλλαγής φάσης είναι απαραίτητο, τόσο για την ανάπτυξη όσο και για το σχεδιασμό των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι ο ακριβής υπολογισμός τους είναι μία πολύ σημαντική διαδικασία, η οποία δεν πρέπει ποτέ να παραλείπεται, καθώς από αυτήν τη διαδικασία γίνεται η εκλογή του κατάλληλου υλικού για κάθε περίπτωση.

Κάθε υλικό εμφανίζει ομοιογένεια ως προς τις ιδιότητές του σ' ολόκληρη τη μάζα του, δηλαδή η μέτρηση κάποιας ιδιότητας ενός υλικού δίνει το ίδιο αποτέλεσμα, ανεξαρτήτως από πού πήραμε το δείγμα, τη γεωμετρία του ή ακόμα και από το μέγεθός του. Ωστόσο, η ομοιογένεια των υλικών δεν εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος μέχρι ενός ορίου. Όταν το μέγεθος γίνεται μικρότερο του ορίου αυτού, τότε το υλικό δεν είναι πια ομογενές, οπότε οποιαδήποτε ιδιότητα μετρηθεί, χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο δείγμα και όχι ολόκληρο το υλικό. Επίσης, πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν, ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ορισμένες ιδιότητες επηρεάζονται αρκετά από τις συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν την συγκεκριμένη στιγμή. Αυτές χαρακτηρίζονται ως ιδιότητες ενός αντικειμένου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος, όπως είναι τα C_p και C_v .

Οι κυριότερες ιδιότητες του υλικού που πρέπει να εξετάζονται είναι:

- Το σημείο τήξης
- Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- Η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
- Η λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης - στερεοποίησης
- Ο βαθμός supercooling
- Ο βαθμός διαχωρισμού των φάσεων
- Ο βαθμός διάβρωσης σε διάφορα «κοινά» υλικά

Οι ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης εξετάζονται με δύο μεθόδους:

- Με μεθόδους με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε περιορισμένο χρονικό διάστημα και για ένα μόνο κύκλο φόρτισης του υλικού.
- Με μεθόδους με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε μεγάλο χρονικό διάστημα και για πολλούς κύκλους φόρτισης του υλικού.

Οι πιο συνήθεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του σημείου τήξης, της λανθάνουσας θερμότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας, είναι:

- Η συμβατική θερμιδομετρική μέθοδος (Conventional Calorimetry Method)
- Το ψηφιακό θερμιδόμετρο (Differential Scanning Calorimetry - DSC)
- Η διαφορική θερμική ανάλυση (Differential Thermal Analysis - DTA)

Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η ακρίβεια των μετρούμενων μεγεθών, ενώ τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

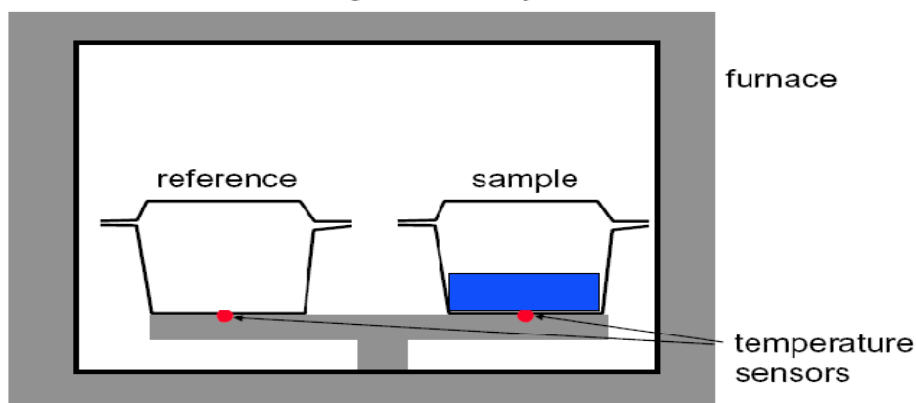
- Το δείγμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ μικρό, γεγονός που είναι αντίθετο με τη γνώση ότι ορισμένες ιδιότητες των υλικών αλλαγής φάσης επηρεάζονται από το μέγεθος του δείγματος ή από το αν το υλικό αλλαγής φάσης είναι συσκευασμένο ή όχι. Επιπλέον, αν το υλικό είναι μη ομογενές είναι δύσκολη έως αδύνατη η επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος.
- Σε μία μέτρηση είναι αδύνατον να μετρήσουμε ταυτόχρονα πολλά δείγματα, οπότε θα πρέπει να επαναλαμβάνεται το πείραμα για κάθε νέο δείγμα.
- Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και των μετρήσεων είναι πολύπλοκος και πολυδάπανος.

4.1 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΑΡΩΣΗ (DSC)

Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης ιδιοτήτων και αφορά τη μέτρηση θερμικής ικανότητας για πολύ μικρά δείγματα. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση διαφορών στις θερμικές αντιδράσεις στις οποίες υποβάλλονται το υλικό αναφοράς που εξετάζουμε και ένα δείγμα μέσω ενός θερμοκρασιακού προγράμματος. Για τα υλικά αλλαγής φάσης η μέθοδος DSC υπολογίζει τις καμπύλες τήξης και στερεοποίησης και τις συνδεδεμένες μ' αυτές τιμές της λανθάνουσας θερμότητας. Μπορεί να αποδώσει γραφήματα θερμορροής - θερμοκρασίας, με την παρακάτω διαδικασία:

Γνωστή ποσότητα μάζας υλικού αλλαγής φάσης τοποθετείται σε κλειστό δοχείο με γνωστό όγκο. Αυτό το δοχείο, όπως και άλλο ένα ίδιο, άδειο, τοποθετούνται μέσα στο DSC. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται με γνωστό και σταθερό ρυθμό, μετράται πόσο περισσότερη θερμότητα απαιτεί το υπό μελέτη δοχείο, ώστε να διατηρεί τη θερμοκρασία του σταθερή και ίδια μ' αυτή του άδειου δοχείου. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει συνεχώς, σε κάποιο σημείο θα φτάσει τη θερμοκρασία τήξης του υλικού αλλαγής φάσης.

DSC – differential scanning calorimetry



Σχήμα 4.1. Διάταξη μέτρησης με μέθοδο DSC

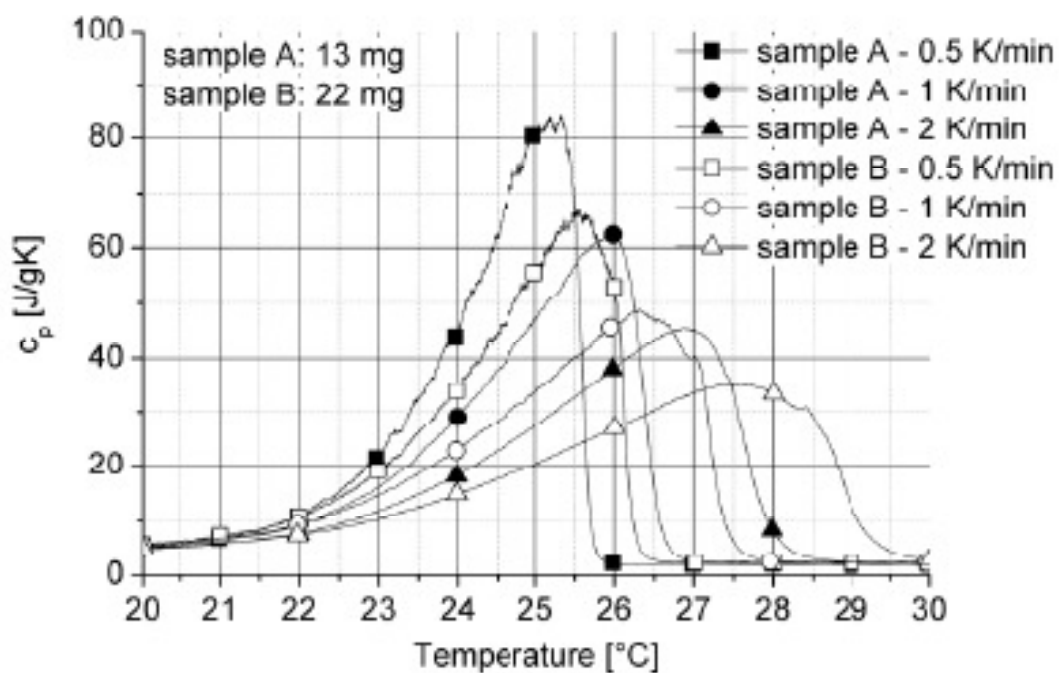
Υπάρχουν δύο μοντέλα για τη μέθοδο αυτή. Το μοντέλο σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης και το μοντέλο ισόθερμων βημάτων.

4.2 DSC ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΡΥΘΜΟ ΨΥΞΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Η εφαρμογή της μεθόδου DSC σταθερού ρυθμού ψύξης και θέρμανσης δεν είναι κατάλληλη για τη μέτρηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας των υλικών αλλαγής φάσης. Αυτό συμβαίνει, διότι κατά την αλλαγή φάσης, το δείγμα δε βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και έχουμε σημαντική κατανομή της θερμοκρασίας, μέσα σ' αυτό. Για το λόγο αυτό οδηγούμαστε σε λάθος αποτελέσματα, των οποίων η απόκλιση εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Το μέγεθος του δείγματος
- Το ρυθμό θέρμανσης
- Το μέγεθος της θερμοχωρητικότητας
- Τη θερμική αγωγιμότητα

Επειδή οι θερμοφυσικές ιδιότητες των μετρούμενων υλικών συνήθως δεν είναι γνωστές με την επιθυμητή ακρίβεια, η απόκλιση αυτή δεν μπορεί μαθηματικώς να ελαχιστοποιηθεί.

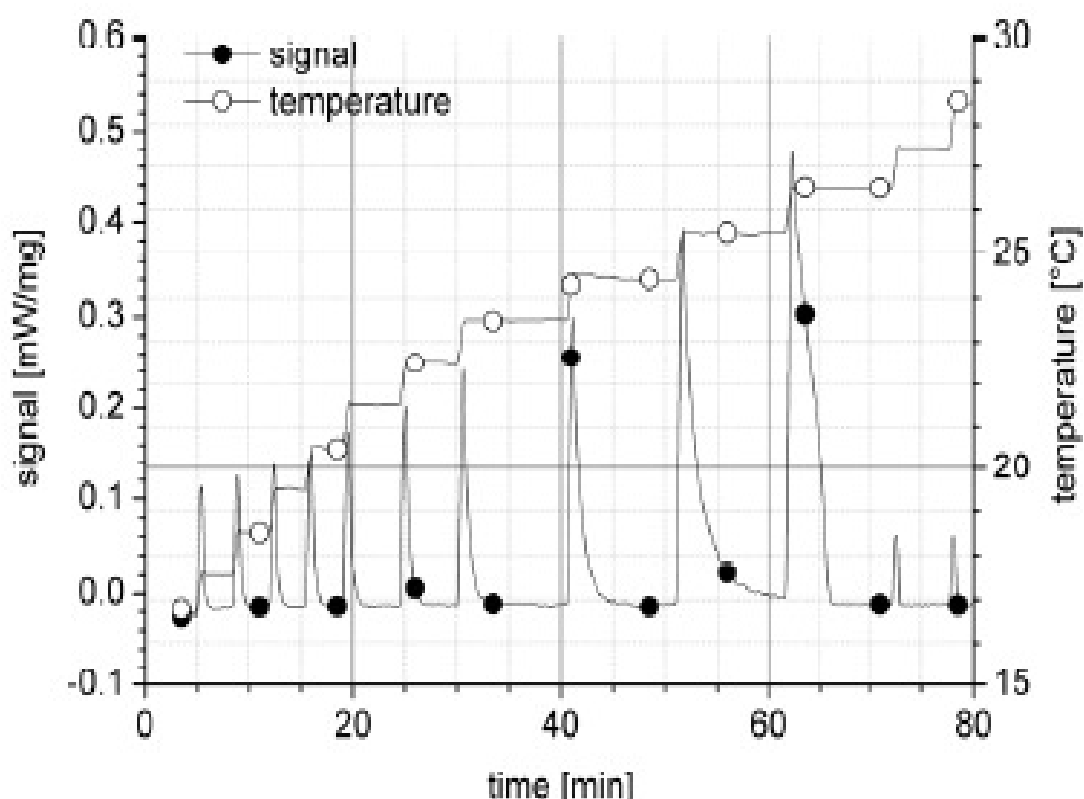


Σχήμα 4.2. Επίδραση της μεταβολής της μάζας του δείγματος και του ρυθμού θέρμανσης σε μετρήσεις της θερμοχωρητικότητας $C_p(T)$ με τη μέθοδο DSC

4.3 DSC ΙΣΟΘΕΡΜΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ

Στην περίπτωση αυτή το δείγμα θερμαίνεται βηματικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Το δείγμα ακολουθεί τα βήματα με κάποια χρονική υστέρηση και έτσι παράγεται το σήμα εξόδου. Όταν θα φτάσει το δείγμα σε θερμική ισορροπία, το σήμα μηδενίζεται και ακολουθεί το επόμενο ισόθερμο βήμα. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του σήματος είναι ανάλογο της, εκ του δείγματος, απορροφούμενης θερμότητας, στο συγκεκριμένο ισόθερμο βήμα.

Η εφαρμογή της DSC ισόθερμων βημάτων είναι πιο χρονοβόρα και πιο περίπλοκη κατά την επεξεργασία απ' ότι η δυναμική μέτρηση θερμοχωρητικότητας. Το μεγάλο πλεονέκτημα σε σύγκριση με τη δυναμική μέτρηση είναι ότι η απόκλιση στη μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος είναι γνωστή, αφού σχετίζεται με το μέγεθος του ισόθερμου βήματος. Έτσι, με ελάττωση του μεγέθους του βήματος επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια.



Σχήμα 4.3. Τυπικό διάγραμμα ροής θερμότητας και θερμοκρασίας σε μέτρηση DSC με ισόθερμα βήματα

Η μέθοδος μέτρησης DSC έχει δώσει αρκετά ακριβή αποτελέσματα κάνοντας όμως χρήση δειγμάτων πολύ μικρών διαστάσεων (της τάξης των μm). Σε εμπορικές

εφαρμογές όμως η μέθοδος αυτή ενδεχομένως να μη δώσει ασφαλή αποτελέσματα γιατί αυτό είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο δείγμα από το συγκεκριμένο υλικό που μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε. Αυτό απαιτείται γιατί όταν γίνει ένας μεγάλος κύκλος δοκιμών τήξης - στερεοποίησης σ' ένα μεγαλύτερο δείγμα, είναι πολύ πιθανό αυτό να χάσει την ομοιογένεια των ιδιοτήτων του σ' όλη την έκτασή του. Για το λόγο αυτό, στις περιπτώσεις των μεγαλύτερων δειγμάτων προτιμούμε τη χρήση κάποιας παρεμβατικής μεθόδου δοκιμών για καταγραφή των ιδιοτήτων τους.

DSC – unsolved problems

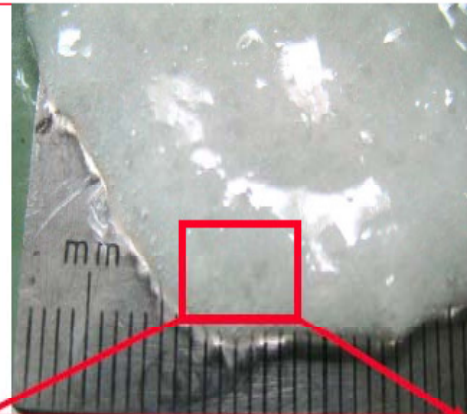


ZAE BAYERN

main problem: small sample mass

many PCM are inhomogeneous
(e.g. contain nucleators, graphite,
gelling material)

crucible size



correct composition of the sample ?

- storage capacity
- phase change temperature
- subcooling



Ecostock 2006

© Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

Σχήμα 4.4. Εικόνα της ανομοιογένειας που παρουσιάζουν τα περισσότερα P.C.M.

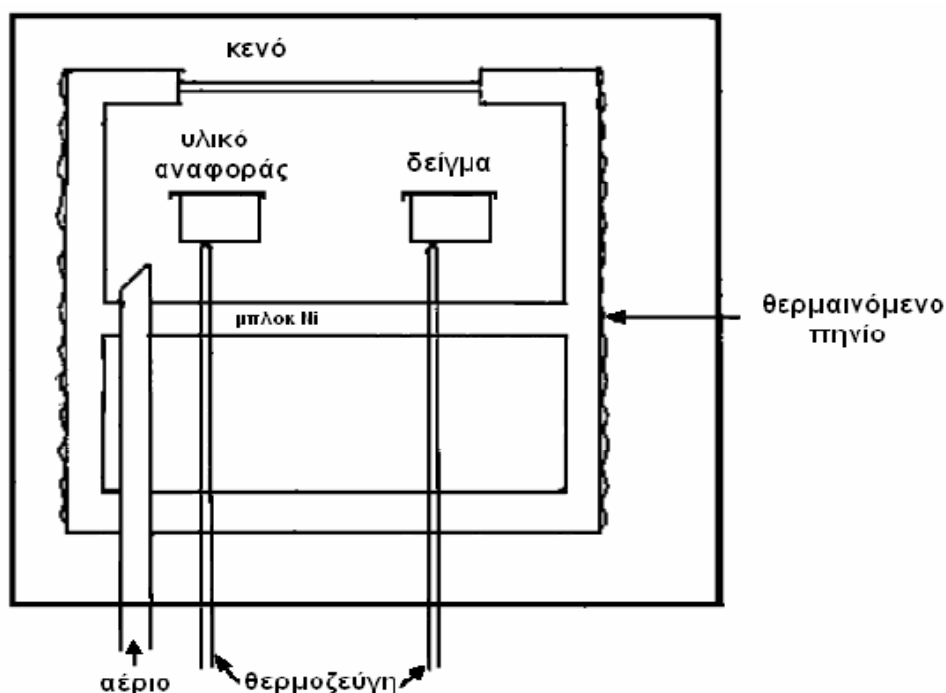
4.4 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (DTA)

Η μέθοδος DTA περιλαμβάνει τη θέρμανση ή την ψύξη ενός δείγματος και ενός αδρανούς υλικού αναφοράς κάτω από όμοιες συνθήκες, καταγράφοντας ταυτόχρονα τις θερμοκρασιακές διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ τους. Η ύπαρξη του αδρανούς δείγματος συμβάλλει στον εντοπισμό των αλλαγών του δείγματος που μελετάμε, που οφείλονται στην απορρόφηση ή στην έκλυση θερμότητας.

Ο λόγος που η μέθοδος DTA μπορεί να εφαρμοστεί στη μελέτη θερμικών ιδιοτήτων και αλλαγών φάσης που δε χαρακτηρίζονται από ενθαλπικές μεταβολές, είναι ότι θερμοκρασιακές διαφορές μπορούν να προκύψουν μεταξύ δείγματος και αδρανούς υλικού αναφοράς, αλλά και μεταξύ δύο αδρανών δειγμάτων, όταν η απόκρισή τους στην προσφερόμενη θερμότητα είναι διαφορετική.

Η γενική διάταξη διεξαγωγής της μεθόδου DTA αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- Μία συσκευή συγκράτησης δείγματος κατάλληλα συνδεδεμένη με θερμοζεύγη, δοχεία δειγμάτων και μία κεραμική ή μεταλλική κατασκευή (block)
- Την εστία
- Μία συσκευή προγραμματισμού θερμοκρασίας
- Ένα καταγραφικό σύστημα



Σχήμα 4.5. Σχηματική αναπαράσταση κελιού DTA

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την πειραματική διαδικασία της μεθόδου DTA είναι οι εξής:

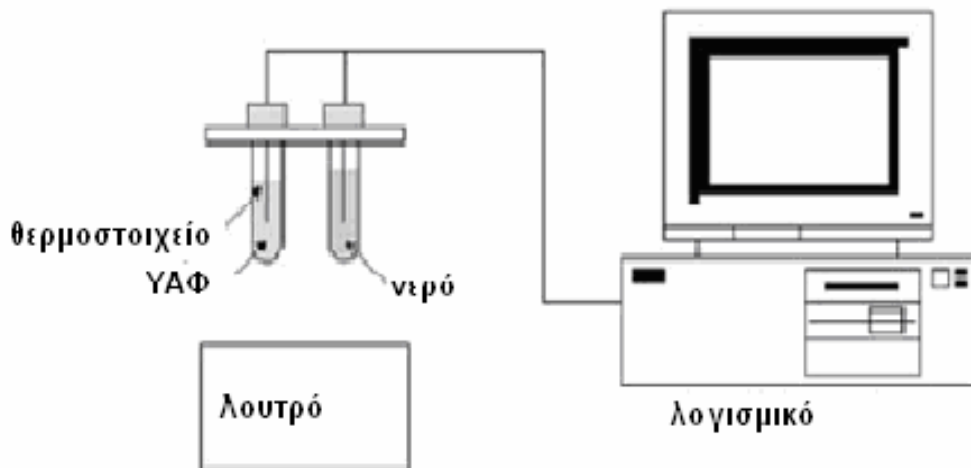
- Τα αποτελέσματα των πειραμάτων μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικά για μεγαλύτερα δείγματα, επειδή πραγματοποιούνται σε δείγματα υλικών σε σκόνη
- Η συσκευασία στην οποία περιέχονται τα δείγματα, μπορεί να προκαλέσει υψηλές αποκλίσεις μεταξύ φαινομενικά ίδιων δειγμάτων
- Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας, μπορεί να αυξηθεί τόσο ώστε να προκαλέσει κορεσμό της αποκριτικής ικανότητας της μετρητικής διάταξης
- Για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών αλλαγών φάσης θα πρέπει η ακραία θερμοκρασία που θα εμφανιστεί κατά τη μετρητική διαδικασία να είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του δείγματος
- Το σχήμα του ακρότατου που προκύπτει τελικά, εξαρτάται από το βάρος του δείγματος και το ρυθμό θέρμανσης που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία. Μάλιστα η μείωση του ενός, αντιστοιχεί με τη μείωση του άλλου, με αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις να έχουμε απότομα ακρότατα βελτιωμένης ανάλυσης.

4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ T-HISTORY

Το μέγεθος του δείγματος που θα επιλέξουμε προς μελέτη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς χρειάζεται να είναι αντιπροσωπευτικό του υλικού απ' το οποίο προέρχεται. Αυτό είναι και το σοβαρό μειονέκτημα της μεθόδου μέτρησης DSC, καθώς το μέγεθος των δειγμάτων που εξετάζει είναι συνήθως μικρότερο της τάξης των 0.1ml. Στα ανομοιογενή υλικά η μελέτη τόσο μικρού δείγματος δεν είναι ενδεικτική ολόκληρου του υλικού. Επίσης, το φαινόμενο υπόψυξης που παρατηρείται κατά τη μέτρηση τόσο μικρών δειγμάτων δεν είναι αντιπροσωπευτικό των μεγαλύτερων δειγμάτων του ίδιου υλικού. Η μέθοδος T-HISTORY μελετά ποσοτικά μεγαλύτερα δείγματα για τη μέτρηση ιδιοτήτων ανομοιογενών υλικών.

Γι' αυτήν τη μέθοδο αναμένονται θετικά αποτελέσματα μόνο στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός Biot είναι μικρότερος του 0.1, περιορισμός που τίθεται, εξ' αιτίας της υπόθεσης μιας ομοιόμορφης θερμοκρασίας του P.C.M. σ' ένα σωλήνα δοκιμής κατά την αποφόρτιση.

Η απλή πειραματική διάταξη της μεθόδου T-HISTORY, απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα καθώς και οι σωλήνες των δοκιμών.



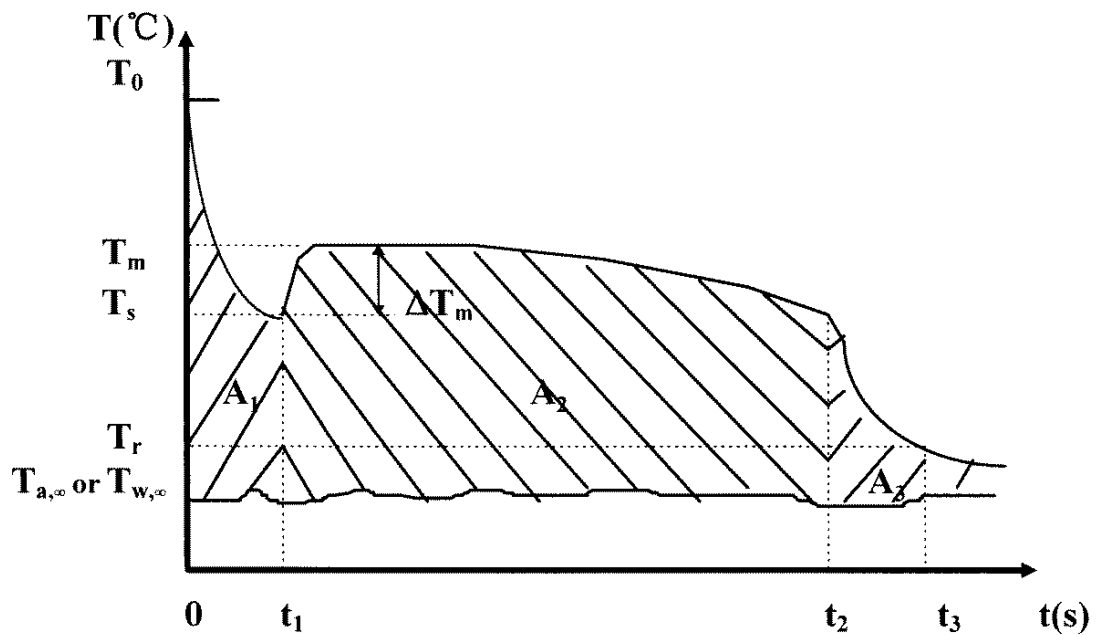
Σχήμα 4.6. Εργαστηριακή διάταξη T-HISTORY



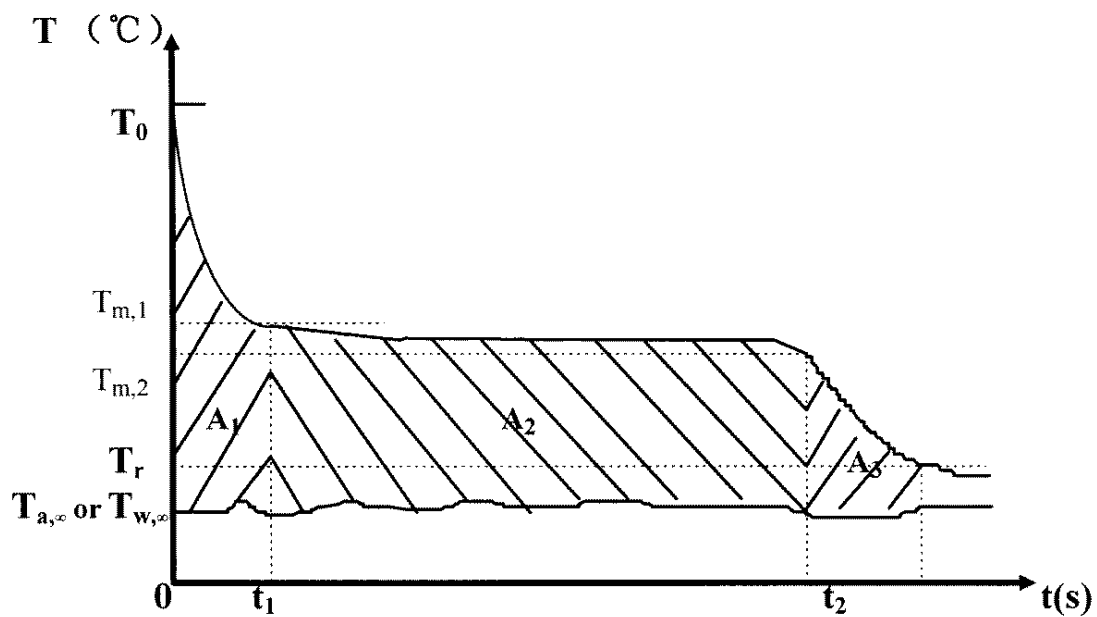
Σχήμα 4.7. Σωλήνες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο T-HISTORY

Οι σωλήνες δοκιμής γεμίζονται αντίστοιχα με το P.C.M. και με το υλικό αναφοράς, το οποίο συνήθως είναι καθαρό νερό, του οποίου οι θερμοκρασίες παραμένουν αρχικά ίδιες και μεγαλύτερες από τη χαμηλή θερμοκρασία του P.C.M.. Το πείραμα της μεθόδου T-HISTORY είναι πολύ απλό. Οι σωλήνες δοκιμής παραμένουν αρχικά κάθετα σ' ένα λουτρό σταθερής θερμοκρασίας και βραχυπρόθεσμα εκτίθενται στην ατμόσφαιρα. Οι θερμοκρασίες στους σωλήνες δοκιμής και την ατμόσφαιρα αρχίζουν ταυτόχρονα να μετρώνται. Οι δύο καμπύλες T-HISTORY, που εμφανίζουν τη

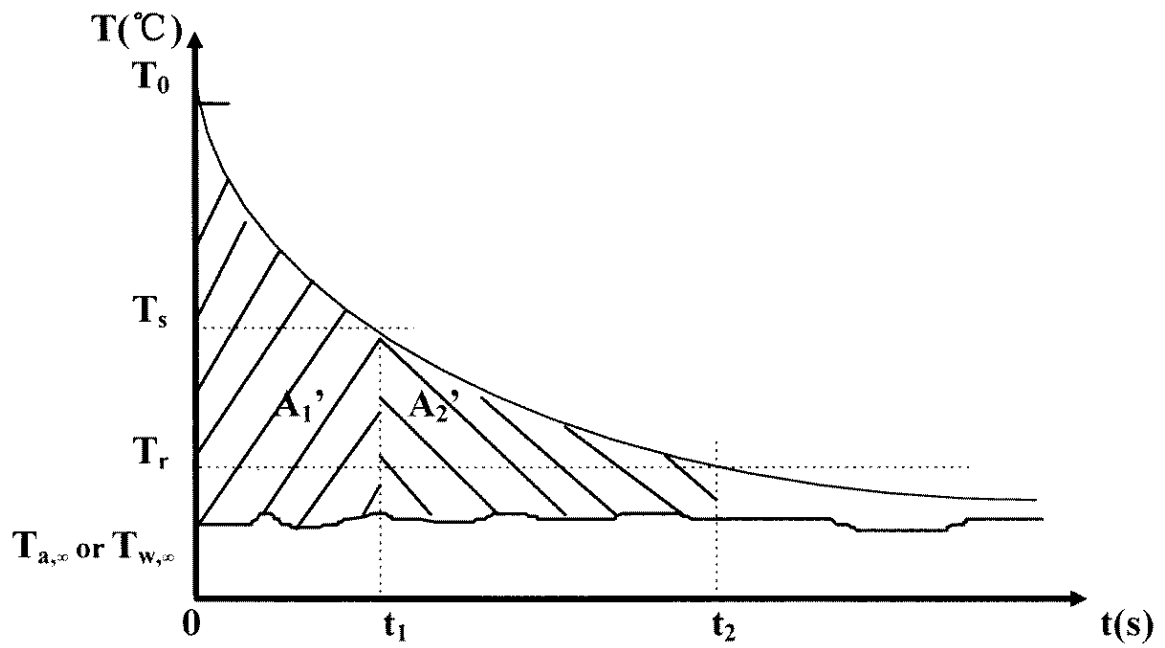
μεταβολή της θερμοκρασίας, λαμβάνονται για το P.C.M. και για το υλικό αναφοράς. Οι θερμικές ιδιότητες όπως η θερμότητα τήξης και η ειδική θερμοχωρητικότητα, μπορούν να υπολογιστούν από τα μετρημένα πειραματικά δεδομένα και τις καμπύλες αυτές.



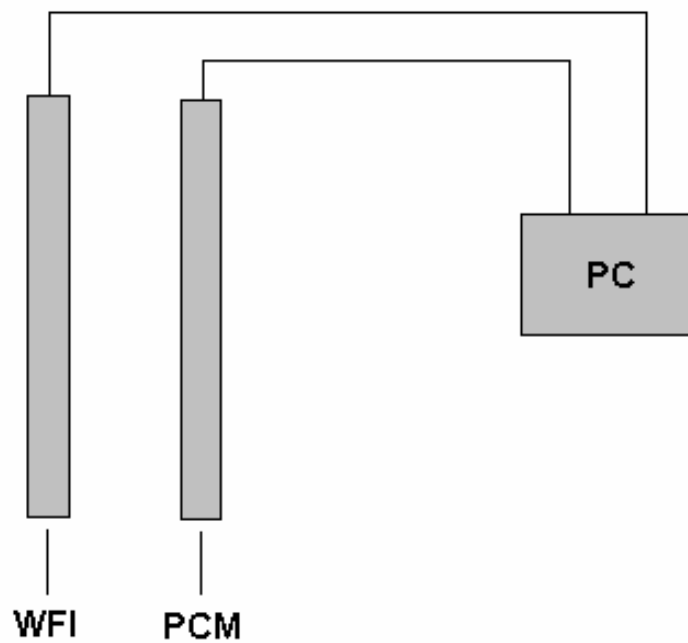
Σχήμα 4.8. Τυπική καμπύλη T-HISTORY ενός P.C.M. που παρουσιάζει υπόψυξη



Σχήμα 4.9. Τυπική καμπύλη T-HISTORY ενός P.C.M. που δεν παρουσιάζει υπόψυξη



Σχήμα 4.10. Τυπική καμπύλη T-HISTORY νερού

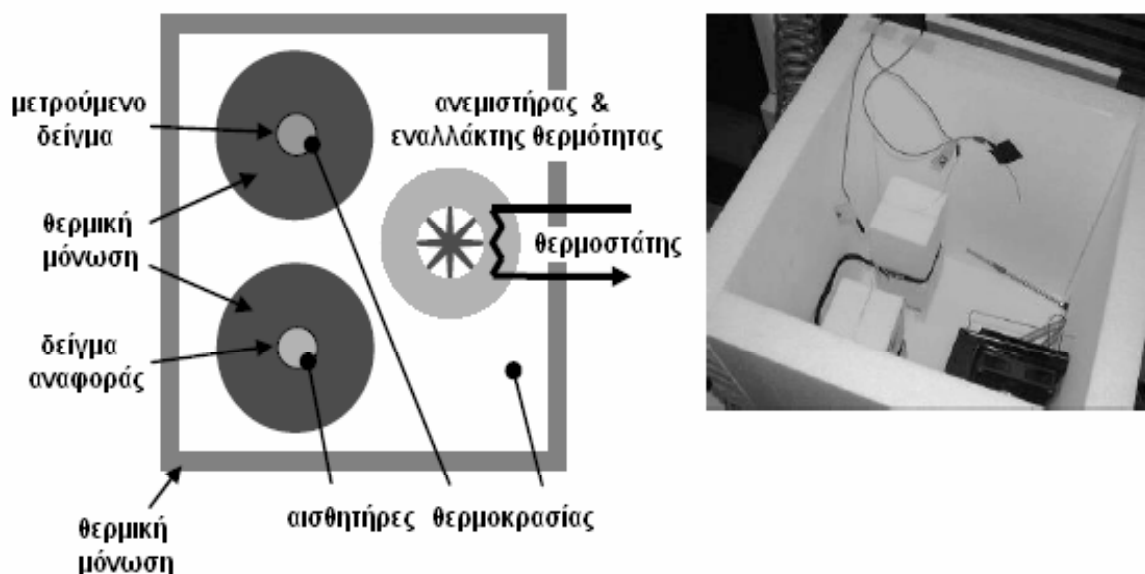


Σχήμα 4.11. Τυπική μετρητική διάταξη T-HISTORY

Το πρώτο κρίσιμο πρόβλημα στη μέθοδο T-HISTORY, είναι στην αντιμετώπιση του φαινομένου της υπόψυξης. Πρέπει αρχικά να οριστεί το σημείο απελευθέρωσης της υπόψυξης, ως το ένα άκρο της περιόδου αλλαγής φάσης. Ο βαθμός εμφάνισης της υπόψυξης ποικίλλει και σχετίζεται με όρους όπως η ταχύτητα, η καθαρότητα και είναι απολύτως ανεξάρτητος από το τέλος της αλλαγής φάσης. Η τροποποιημένη μέθοδος T-HISTORY, χρησιμοποιεί ένα σημείο καμπής ως όριο μεταξύ των περιόδων αλλαγής φάσης και μεταφοράς αισθητής θερμότητας, το σημείο όπου η πρώτη παράγωγος της καμπύλης T-HISTORY για το υλικό αλλαγής φάσης γίνεται ελάχιστη. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, ή μειώνεται βαθμιαία κατά τη λανθάνουσα απελευθέρωση θερμότητας, ενώ μειώνεται εκθετικά στη διαδικασία ψύξης που συνοδεύει την αισθητή θερμότητα μόνο. Ωστόσο, το σημείο καμπής που χρησιμοποιήθηκε ως όριο μεταξύ των περιόδων λανθάνουσας και στερεάς κατάστασης αισθητής θερμότητας, δεν είναι πάντα εύκολο να επιλεγεί.

Άσχετα από το βαθμό εμφάνισης του φαινομένου του supercooling, η θερμοκρασία τήξης που λαμβάνεται με την τροποποιημένη μέθοδο T-HISTORY συμφωνεί με αυτήν της μεθόδου DSC, όπως έχει διαπιστωθεί σε πολλές πειραματικές διαφορές. Στη μέθοδο αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μετρηθεί ακριβώς η λανθάνουσα θερμότητα που απορροφά ο δοκιμαστικός σωλήνας με το P.C.M..

Άλλα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού, το μεγάλο μέγεθος του δείγματος, η ταυτόχρονη μέτρηση πολλών δειγμάτων σε ένα πείραμα καθώς και η οπτική παρατήρηση του φαινομένου. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι το σφάλμα των μετρήσεων επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την προσεκτική κατασκευή της διάταξης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται καθώς και από τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας



Σχήμα 4.12. Διάταξη T-HISTORY για πειραματικές μετρήσεις θέρμανσης – ψύξης σε εύρος $-5^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$. Αριστερά η σχηματική απεικόνιση και δεξιά η πραγματική διάταξη.

,

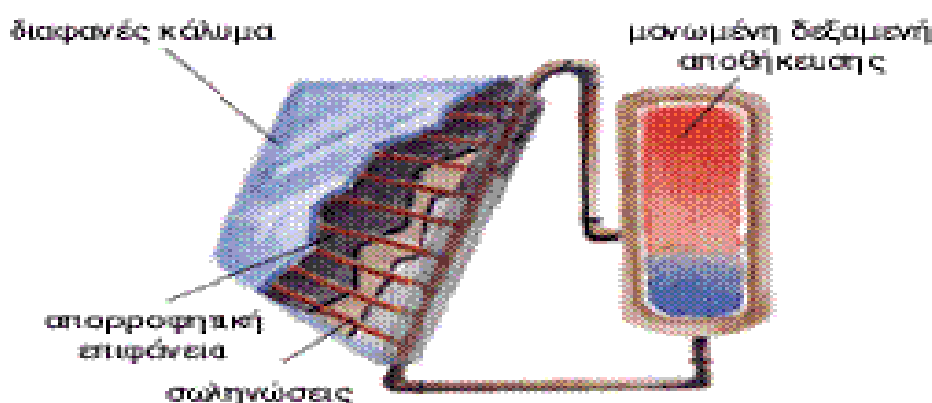
5. ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη θέρμανση και την ψύξη ενός χώρου με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια χρειάζεται να συλλεχθεί, να αποθηκευτεί και να διανεμηθεί κατάλληλα στο χώρο. Όταν μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση του νερού και για θέρμανση χώρου. Αυτό γίνεται εφικτό με χρήση ηλιακών θερμικών συστημάτων που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια και τη μετατρέπουν σε θερμότητα. Για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά και τα ηλιοθερμικά συστήματα.

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι όσα συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε νερό, σε αέρα ή σε κάποιο άλλο ρευστό. Η πλέον διαδεδομένη εφαρμογή των συστημάτων αυτών είναι η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, οι γνωστοί σ' όλους ηλιακοί θερμοσίφωνες.

Στα ενεργητικά ηλιακά συστήματα η ηλιακή ενέργεια που αποθηκεύεται στην μονάδα αποθήκευσης μπορεί να βρίσκεται σε μορφή αισθητής ή και λανθάνουσας θερμότητας και η ενέργεια διανέμεται στο χώρο χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές βάνες, ανεμιστήρες ή και άλλα μέσα. Αντιθέτως, στα παθητικά συστήματα η συλλογή, αποθήκευση και διανομή της ενέργειας γίνεται με φυσικά μέσα και γενικότερα δε χρησιμοποιείται καθόλου μηχανική ή ηλεκτρική ισχύς ή ηλεκτρονικός έλεγχος.

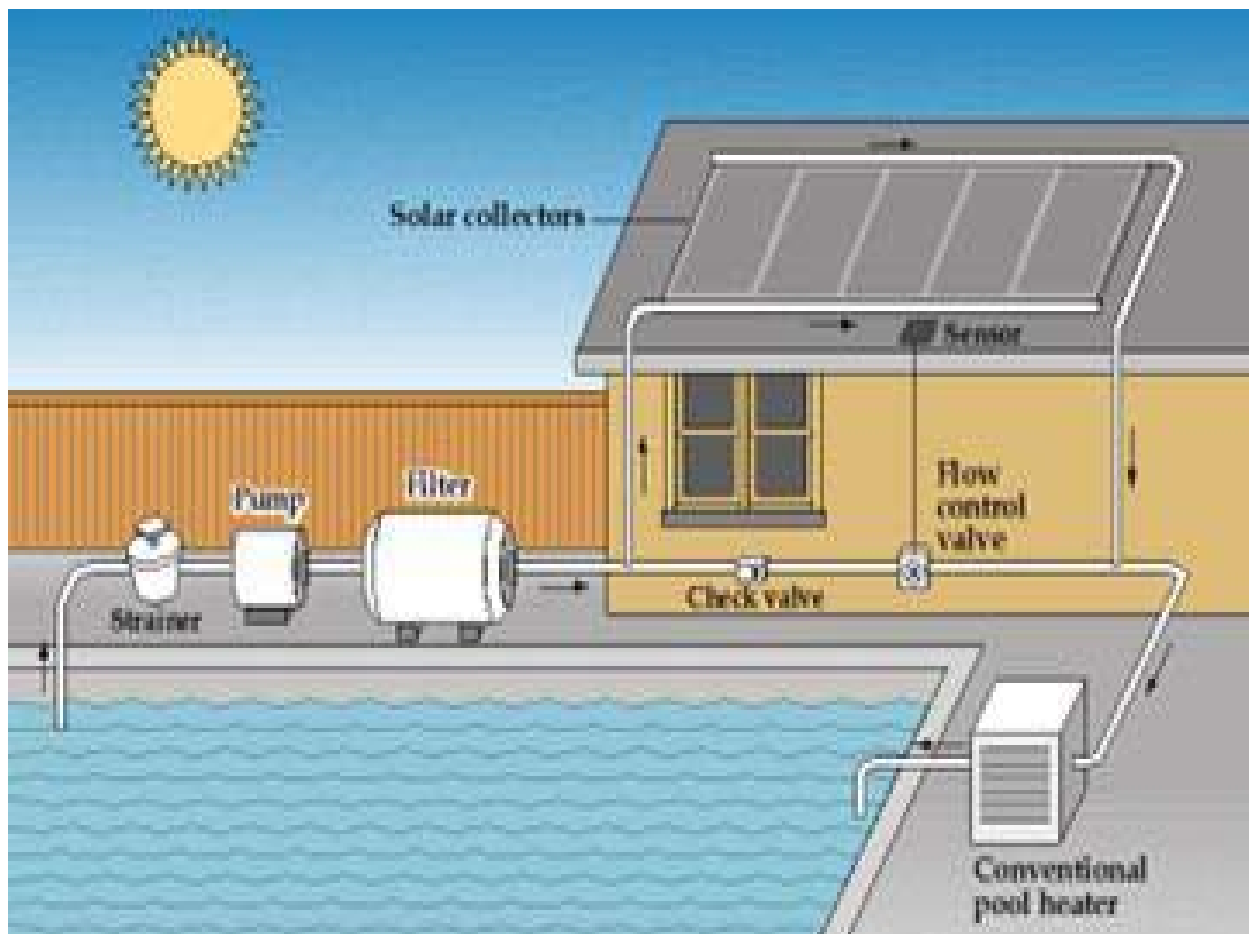
Η "καρδιά" ενός ενεργητικού ηλιακού συστήματος είναι ο ηλιακός συλλέκτης. Ο συλλέκτης αυτός περιλαμβάνει μια μαύρη, συνήθως επίπεδη μεταλλική επιφάνεια, η οποία απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται. Πάνω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα (συνήθως από γυαλί ή πλαστικό) που παγιδεύει τη θερμότητα (φαινόμενο θερμοκηπίου). Στη συνέχεια, σ' επαφή με την απορροφητική επιφάνεια τοποθετούνται λεπτοί σωλήνες μέσα στους οποίους διοχετεύεται κάποιο υγρό, που πάγει την θερμότητα και τη μεταφέρει με τη βοήθεια μικρών αντλιών (κυκλοφορητές), σε μια μεμονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως στην οροφή του κτιρίου, με νότιο προσανατολισμό και κλίση 30° - 60° ως προς τον ορίζοντα, ώστε να μεγιστοποιηθεί το ποσό της ακτινοβολίας που συλλέγεται ετησίως.



Σχήμα 5.1. Γενική λειτουργία ενεργητικού ηλιακού συστήματος

Εκτός από την οικιακή χρήση, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη σήμερα, ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε απαιτείται θερμότητα χαμηλής θερμοκρασιακής στάθμης. Έτσι, η χρήση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ψύξης, για τον κλιματισμό χώρων και για άλλες εφαρμογές, εμφανίζεται ως μία από τις πολλά υποσχόμενες προοπτικές.

Η τεχνολογία των κεντρικών ηλιακών συστημάτων θεωρείται μια αρκετά αποδοτική λύση για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε κατοικίες, ξενοδοχεία, εστιατόρια, βιομηχανίες κ.ο.κ.

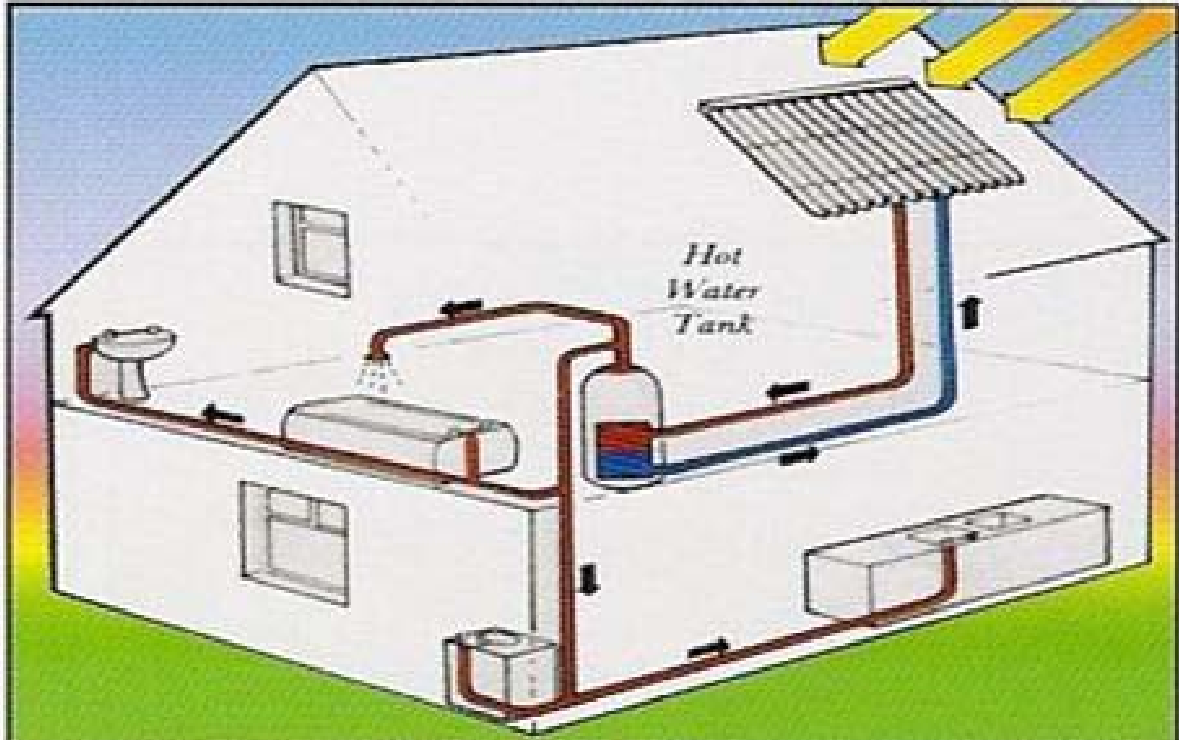


Σχήμα 5.2. Γενικές εφαρμογές ενεργητικών ηλιακών συστημάτων

Μια άλλη εφαρμογή που έχει γίνει ευρέως γνωστή στην Ευρωπαϊκή αγορά είναι ο συνδυασμός παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και θέρμανσης χώρων με ενεργητικά ηλιακά συστήματα.

Η χρήση των συστημάτων αυτών μπορεί να εξοικονομήσει συμβατική ενέργεια σε νέα ή παλιά κτήρια, με την προϋπόθεση όμως ότι έχουν ληφθεί όλα τα εφικτά μέτρα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη μεγιστοποίηση της οικονομικότητας της εγκατάστασης. Επιπλέον, είναι πολύ σημαντικός ο σωστός σχεδιασμός του

ηλιακού συστήματος και η προσεκτική εξέταση της οικονομικότητας της εγκατάστασης για την αποφυγή λανθασμένων επιλογών και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.



Σχήμα 5.3. Εφαρμογή ενεργητικού ηλιακού συστήματος για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης

Στα παθητικά συστήματα τα στοιχεία του κτηρίου που επιλέγονται και τοποθετούνται με τέτοιον τρόπο, ώστε να συμμετέχουν στη συλλογή, στην αποθήκευση, στη μεταφορά και στη διανομή της θερμικής ενέργειας είναι οι τοίχοι, η οροφή και τα παράθυρα.

Τόσο τα στοιχεία του κτηρίου, που είναι τα κατασκευαστικά του υλικά όπως πέτρες, τούβλα, τσιμέντο, νερό, μόνωση κ.α. όσο και οι διάφορες θερμικές διεργασίες όπως η θερμική ακτινοβολία, η φυσική και η εξαναγκασμένη συναγωγή, η αγωγή, η εξάτμιση κ.α. συνδυάζονται με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τις ιδιαίτερες ανάγκες του κάθε κτηρίου, οι οποίες εξαρτώνται και πάλι από το κλίμα της περιοχής.

Ονομάζουμε παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης τα δομικά στοιχεία του κτηρίου, τα οποία αξιοποιώντας τις αρχές της φυσικής (τους νόμους μεταφοράς θερμότητας) συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν υπό μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα στα κτήρια αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση των χώρων το χειμώνα, καθώς και για παροχή φυσικού φωτισμού. Κατά την διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα

αποθηκεύεται σ' αυτά τα υλικά και αποδίδεται κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν είναι περισσότερο απαραίτητη.

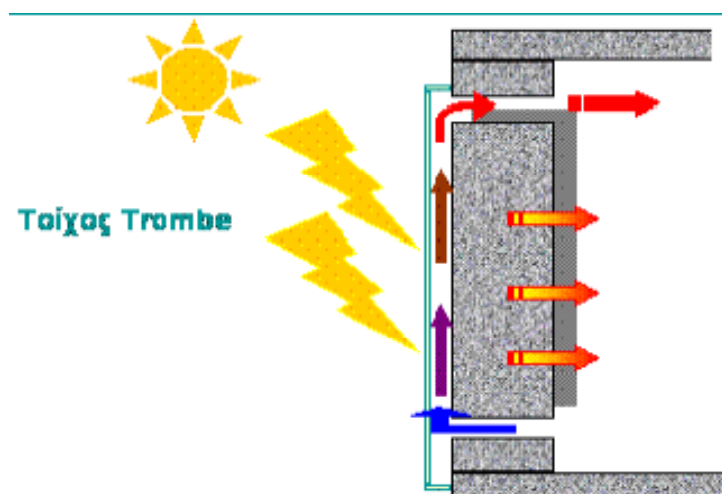
Η συλλογή της ηλιακής ενέργειας βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ειδικότερα στην είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού και τον εγκλωβισμό της προκύπτουσας θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου που καλύπτεται από το γυαλί. Όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα πρέπει να έχουν προσανατολισμό νότιο, ώστε να υπάρχει ηλιακή πρόσπτωση στα ανοίγματα κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας το χειμώνα.

Τα συστήματα αποθήκευσης για παθητικής μορφής θερμότητα περιλαμβάνουν το άμεσο και το έμμεσο κέρδος.

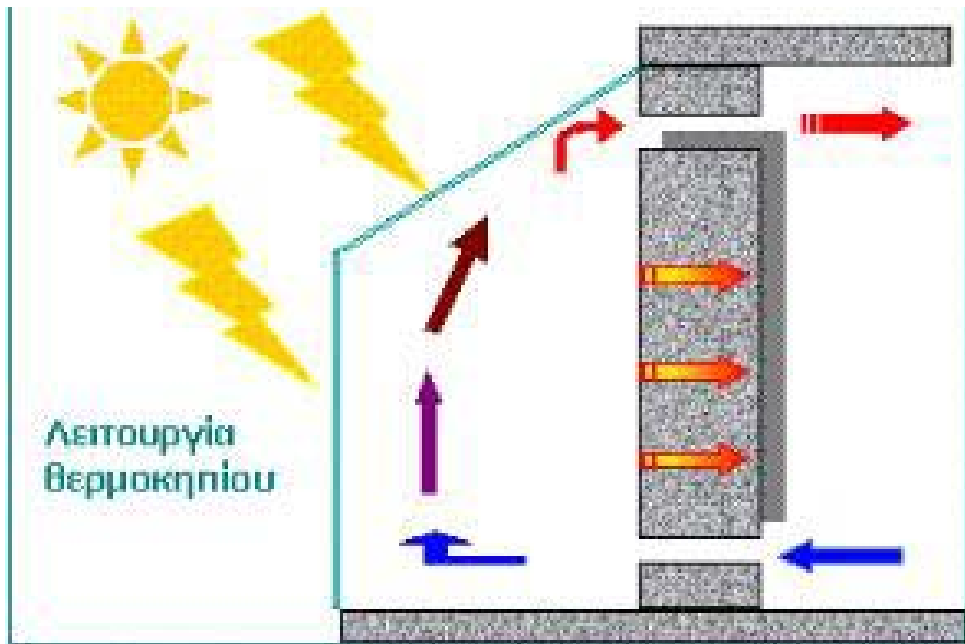
Στο άμεσο κέρδος η θερμότητα λαμβάνεται μέσω ενός παραθύρου, ενός τοίχου ή ενός γυαλιού με νότιο προσανατολισμό, μέσω του πατώματος ή και μέσω αντικειμένων λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα υπόλοιπα παθητικά συστήματα είναι συστήματα έμμεσου κέρδους και ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

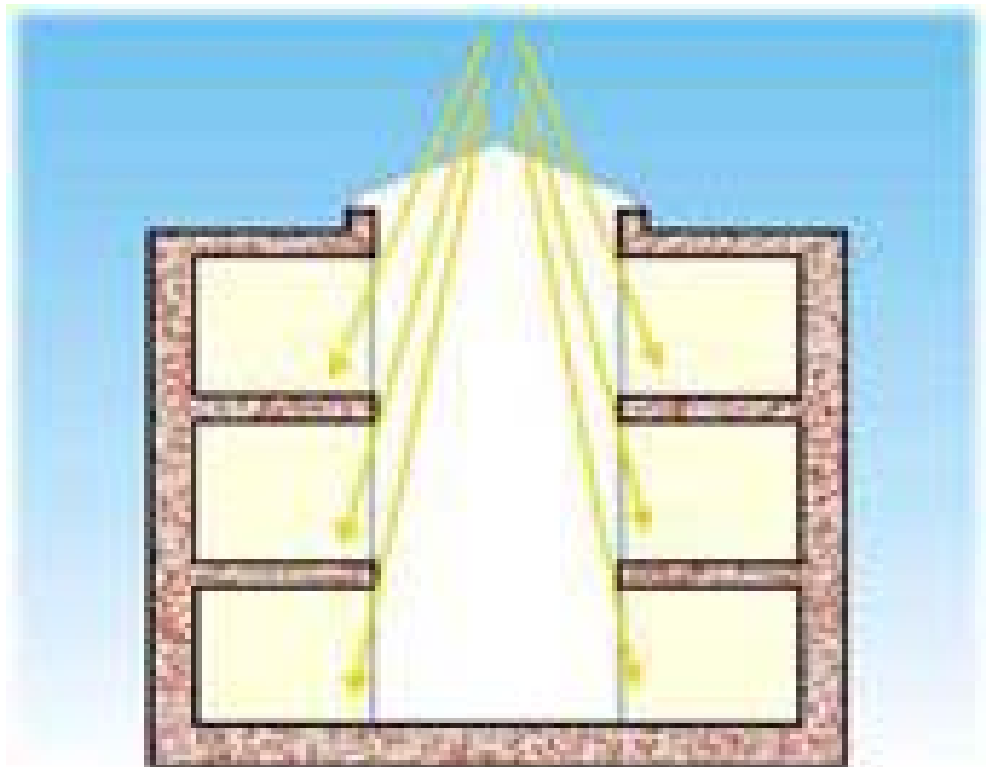
- **Ηλιακοί τοίχοι** : Έχουν στην εξωτερική τους πλευρά σε μικρή απόσταση από την τοιχοποιία τζάμι (υαλοπίνακα) και λειτουργούν ως ηλιακοί συλλέκτες μεταφέροντας τη θερμότητα είτε μέσω του υλικού του τοίχου (τοίχος θερμικής αποθήκευσης), είτε μέσω θυρίδων (θερμοσιφωνικό πάνελ) στον εσωτερικό χώρο. Συνδυασμός των δύο λειτουργιών είναι ο τοίχος μάζας με θυρίδες τοίχος Trombe – Michel.
- **Θερμοκήπια (ηλιακοί χώροι)** : Είναι κλειστοί χώροι που ενσωματώνονται σε νότια τμήματα του κτηριακού κελύφους και περιβάλλονται από υαλοστάσια. Η ηλιακή θερμότητα από το θερμοκήπιο μεταφέρεται στους κυρίως χώρους του κτηρίου μέσω ανοιγμάτων ή και διαπερνά τον τοίχο.
- **Ηλιακά αίθρια**: Είναι εσωτερικοί χώροι του κτηρίου, οι οποίοι έχουν στην οροφή τους τζάμι και λειτουργούν όπως τα θερμοκήπια.



Σχήμα 5.4. Ηλιακός τοίχος



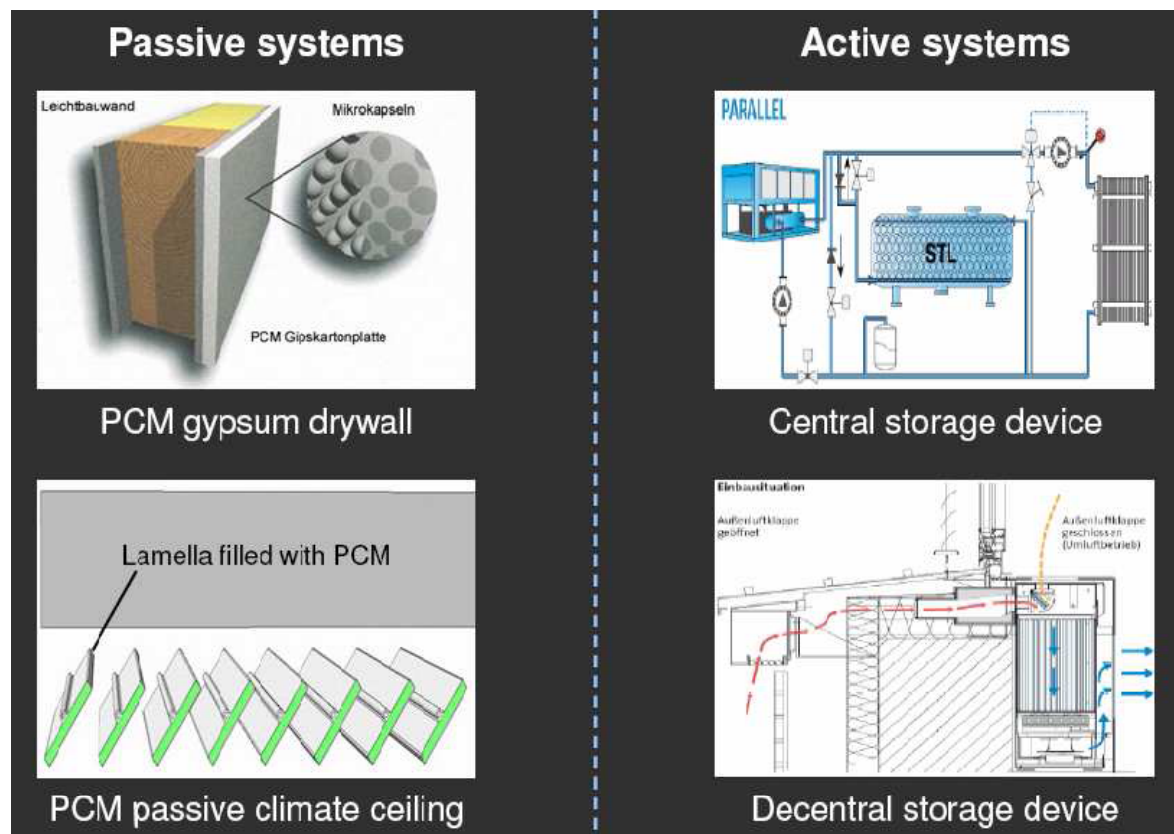
Σχήμα 5.5. Θερμοκήπιο



Σχήμα 5.6. Ηλιακό αίθριο

Όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα πρέπει να συνδυάζονται με την απαιτούμενη θερμική προστασία (θερμομόνωση) και την απαιτούμενη θερμική μάζα του κτηρίου, η οποία αποθηκεύει και αποδίδει τη θερμότητα στο χώρο με χρονική υστέρηση, ομαλοποιώντας έτσι την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο εικοσιτετράωρο. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θα πρέπει το καλοκαίρι να συνδυάζονται με ηλιοπροστασία (π.χ. χρήση φυλλοβόλων δέντρων, οριζόντια σκίαση, τέντες, περσίδες) και συχνά με δυνατότητα αερισμού.

Ένα κτήριο που περιλαμβάνει παθητικά συστήματα θέρμανσης, δροσισμού ή ακόμη και φυσικού φωτισμού, κατασκευασμένο εξ αρχής ή τροποποιημένο, ονομάζεται "βιοκλιματικό κτήριο" και είναι δυνατό να καλύψει μεγάλο μέρος των ενεργειακών του αναγκών από την άμεση ή έμμεση αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.



Σχήμα 5.7. Παραδείγματα ενεργητικών - παθητικών συστημάτων

Γενικότερα, η εφαρμογή των P.C.M. σε παθητικά συστήματα υπερέχει των συστημάτων που χρησιμοποιούν αισθητή θερμότητα, κυρίως λόγω της μικρότερης μάζας και όγκου του απαιτούμενου συστήματος, της ποσότητας ενέργειας που αποθηκεύεται σε μια σχετικά σταθερή θερμοκρασία και των μικρότερων απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον συγκριτικά με τα συνηθισμένα συστήματα.

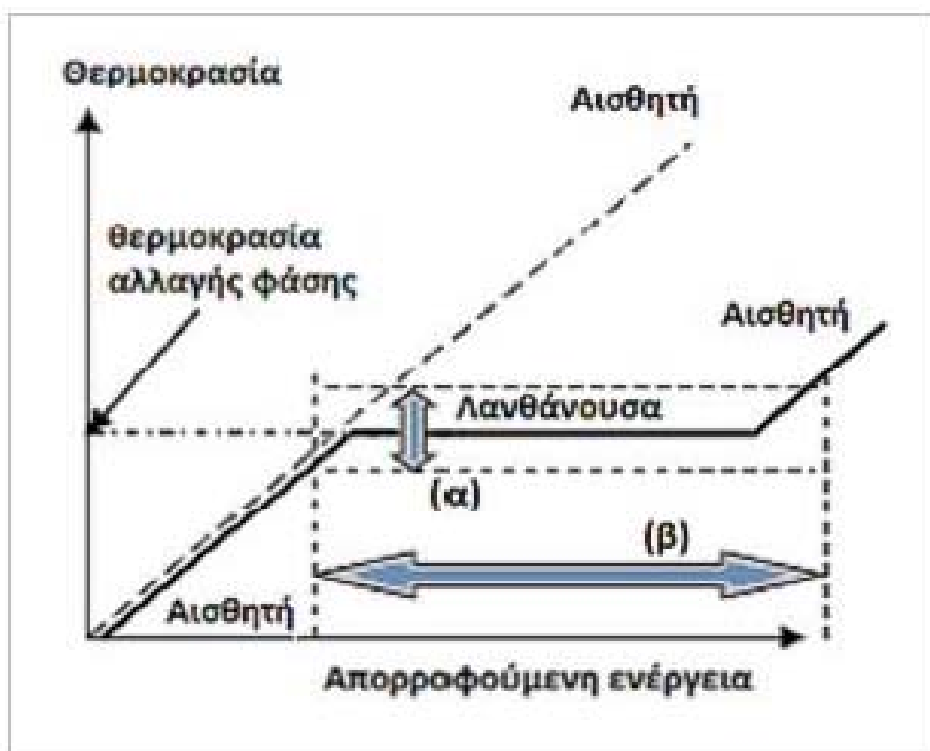
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης σε πρακτικές εφαρμογές στοχεύει στον έλεγχο της θερμοκρασίας και στην αποθήκευση θερμότητας.

Η αποθήκευση θερμότητας είναι ένα πολύ σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας, βελτιώνοντας την αξιοποίηση της ήδη υπάρχουσας ενέργειας. Μικρής διάρκειας αποθήκευση είναι απαραίτητη σχεδόν σ' όλες τις εφαρμογές, ενώ μελετώνται εγκαταστάσεις μεγάλης αποθήκευσης ενέργειας (εποχιακή αποθήκευση).

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε λανθάνουσα μορφή είναι αρκετά εκτεταμένες. Τα πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας με μικρότερη διακύμανση κατά την ανάκτησή της με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά από την πηγή θερμότητας (μέχρι και ισοθερμοκρασιακά). Οι πρακτικές δυσκολίες που προκύπτουν οφείλονται στη χαμηλή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, στη μεταβολή της πυκνότητας, στην αναξιοπιστία σταθεροποίησης των ιδιοτήτων σε μακρόχρονη χρήση, καθώς και στο διαχωρισμό των φάσεων με ενδεχόμενη αλλαγή χημικής σύστασης των υλικών και εμφάνιση φαινομένου υπέρψυξης.

Στο παρακάτω σχήμα που παριστάνει τη μεταβολή θερμοκρασίας ενός υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσει της απορροφούμενης ή αποδιδόμενης θερμικής ενέργειας, σημειώνονται οι δύο αυτές επιλογές.



Σχήμα 6.1. Εφαρμογές των P.C.M.

(α) έλεγχος της θερμοκρασίας και (β) αποθήκευση θερμότητας ή ψύχους

Τα υλικά αλλαγής φάσης εμφανίζονται σε πολλές εφαρμογές. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται:

- Στη μεταφορά και αποθήκευση αγαθών όπως τρόφιμα, φάρμακα κ.λπ.
- Στη μεταφορά αίματος για μετάγγιση, καθώς και μεταφορά οργάνων για μεταμόσχευση, τα οποία είναι ευαίσθητα σε μεταβολές θερμοκρασίας
- Ρύθμιση θερμοκρασίας σώματος (θερμική ένδυση)
- Έλεγχος θερμοκρασίας εξώθερμων χημικών αντιδράσεων
- Θερμική προστασία ηλεκτρικών μηχανών, ηλεκτρονικών διατάξεων, υπολογιστών.
- Εφαρμογές σε κτήρια
- Εφαρμογές σε συστήματα κλιματισμού
- Σε ηλιακές εφαρμογές
- Εφαρμογές σε τηλεπικοινωνίες
- Εφαρμογές σε οχήματα

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την περιοδικότητα των ενεργειακών φαινομένων στη φύση, οι εφαρμογές που συνδυάζουν ηλιακά συστήματα θα πρέπει να προβλέπουν επαρκή ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης για την περίσσεια της ενέργειας και την διάθεσή της, τις ώρες μη διάθεσης από την πηγή. Το ίδιο σκεπτικό επικρατεί και στα συστήματα ανάκτησης θερμότητας όπου οι περίοδοι διαθεσιμότητας περισσευούμενης ταυτίζονται ή ταυτίζονται εν μέρει. Η ίδια παρατήρηση γίνεται και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του 24ώρου, ιδιαίτερα σε χώρες με ακραίες κλιματολογικές συνθήκες.

6.1 ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ

Τα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κατοικιών αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή αισθητής θερμότητας. Αυτό όμως είναι ένα μειονέκτημα, καθώς παρουσιάζουν συγκεκριμένα προβλήματα, όπως για παράδειγμα, την υπερβολική ποσότητα υλικού που απαιτείται, καθώς επίσης και τις μεγάλες διακυμάνσεις στο θερμοκρασιακό εύρος, στο οποίο κυμαίνεται η θερμοκρασία του υλικού αποθήκευσης.

Ιδιότητα	Πέτρα	Νερό	Οργανικό P.C.M.	Ανόργανο P.C.M.
Πυκνότητα (kg/m ³)	2240	1000	800	1600
Ειδική Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg)	1.0	4.2	2.0	2.0
Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/kg)	---	333	190	230
Λανθάνουσα Θερμότητα (kJ/m ³)	---	33	152	368
Μάζα υλικού για 1MJ (kg)	67000	16000	5300	4350
Όγκος υλικού για 1MJ (m ³)	30	16	6.6	2.7
Σχετική μάζα υλικού	15	4	1.25	1.0
Σχετικός όγκος υλικού	11	6	2.5	1.0

Σχήμα 6.2. Ιδιότητες δομικών υλικών για πέτρα, νερό και τυπικά P.C.M.

Τα δομικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα στα κτίρια παραμένουν στη στερεή κατάσταση σ' ολόκληρο το εύρος θερμοκρασιών χρήσης τους. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι εφαρμογές που στοχεύουν στην αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας του κελύφους. Η θερμική μάζα ή θερμοχωρητικότητα του κελύφους των κτιρίων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στον έλεγχο της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους. Σ' ένα κτίριο με κελύφος από υλικά μικρής θερμοχωρητικότητας, οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος γίνονται άμεσα αισθητές στο εσωτερικό του. Σε αντίθεση, σ' ένα κτίριο με δομικά υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας, ένα μέρος της θερμότητας κατά τη διάρκεια των υψηλών θερμοκρασιών της ημέρας αποθηκεύεται στα στοιχεία του κελύφους και αυξάνει τη θερμοκρασία τους.

Για χρήση στις κατασκευές κατοικιών, τα υλικά αλλαγής φάσης πρέπει να έχουν σημείο τήξης λίγο μεγαλύτερο της θερμοκρασίας δωματίου, ώστε σε συνήθεις συνθήκες δωματίου να είναι στερεό. Κάθε αλλαγή θερμοκρασίας προκαλεί τήξη του υλικού, οπότε και απορρόφηση θερμότητας από το περιβάλλον. Αν υπάρξει πτώση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, η θερμότητα που έχει αποθηκευτεί στα δομικά υλικά αποδίδεται στο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, η διακύμανση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου είναι πιο ομαλή σε σύγκριση με την αντίστοιχη στο περιβάλλον.

Έρευνες και εφαρμογές που έχουν γίνει και γίνονται αποδεικνύουν ότι δομικά υλικά τα οποία έχουν εμπλουτιστεί με υλικά αλλαγής φάσης, καθώς και εγκαταστάσεις που περικλείουν υλικά αλλαγής φάσης, μπορούν να αποθηκεύσουν 5-14 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου από τα συμβατικά δομικά υλικά.

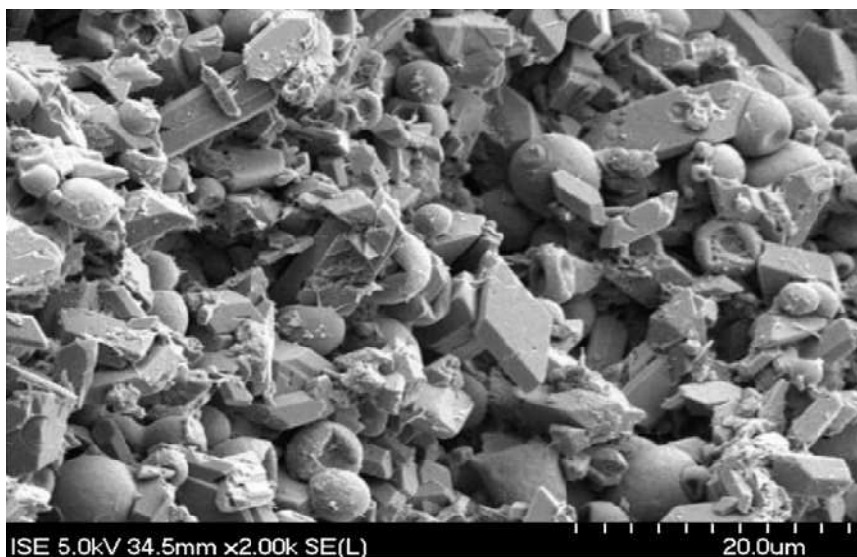


Σχήμα 6.3. Αριστερά απλό τσιμέντο. Δεξιά ενισχυμένο με P.C.M.

Μεγάλο ενδιαφέρον έχει προκαλέσει τα τελευταία χρόνια η ενσωμάτωση των υλικών αλλαγής φάσης στην τοιχοποιία. Οι τρόποι ενσωμάτωσης είναι πολλοί, αλλά οι σημαντικότεροι είναι οι εξής:

- ❖ Η άμεση ενσωμάτωση: Η μέθοδος της άμεσης ενσωμάτωσης είναι η οικονομικότερη απ' όλες τις μεθόδους ενσωμάτωσης, αφού απαιτεί ελάχιστο επιπρόσθετο εξοπλισμό για να υλοποιηθεί. Κατά τη διαδικασία παραγωγής δομικών υλικών, όπως ο γύψος και το τσιμέντο, το υλικό αλλαγής φάσης, είτε ως υγρό είτε σε σκόνη, προστίθεται σ' αυτά και στη συνέχεια αναμιγνύεται μαζί τους. Έτσι μ' αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιείται η ενσωμάτωση του υλικού αλλαγής φάσης στα οικοδομικά υλικά.

- ❖ Η απορρόφηση: Στη διαδικασία της απορρόφησης αρχικά το υλικό αλλαγής φάσης θερμαίνεται και λιώνει. Στη συνέχεια, τα πορώδη δομικά υλικά, όπως η γυψοσανίδα, το τούβλο και ο τσιμεντόλιθος εμβαπτίζονται στο λιωμένο υλικό αλλαγής φάσης, με αποτέλεσμα το P.C.M., λόγω των τριχοειδών φαινομένων που αναπτύσσονται να απορροφάται από τους πόρους. Κατόπιν, τα δομικά υλικά απομακρύνονται από το υγρό P.C.M. και αφήνονται να κρυώσουν, διατηρώντας όμως πλέον το P.C.M. στους πόρους τους. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έναντι των υπολοίπων είναι ότι έχει τη δυνατότητα μετατροπής της απλής γυψοσανίδας σε γυψοσανίδα με P.C.M. όποτε χρειαστεί, καθώς η ενσωμάτωση αυτού του είδους μπορεί να πραγματοποιηθεί οπουδήποτε και οποιαδήποτε στιγμή. Παρ' όλα αυτά, ένα σημαντικό πρόβλημα που παραμένει είναι ότι με το πέρασμα των χρόνων, υπάρχει κίνδυνος διαρροής του υλικού αλλαγής φάσης από το πορώδες αυτό υλικό.
- ❖ Η συσκευασία: Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένας τρόπος αντιμετώπισης των προβλημάτων που δημιουργούνται από τη συνεργασία των P.C.M. με άλλα υλικά, είναι η συσκευασία τους. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και με την ενσωμάτωση των P.C.M. στα δομικά υλικά. Τα είδη συσκευασίας είναι η μακρο-συσκευασία και η μικρο-συσκευασία. Κατά τη μακρο-συσκευασία το P.C.M. συσκευάζεται σε σωλήνες ή σακούλες ή ακόμα και σε άλλα δοχεία, τα οποία τοποθετούνται και αυτά στα δομικά υλικά. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι χρειάζονται προστασία τα δοχεία που περιέχουν το P.C.M. από τυχόν καταστροφές. Η μικρο-συσκευασία είναι η διαδικασία, όπου μικρά σωματίδια του P.C.M. εγκλείονται σε λεπτή, υψηλού μοριακού βάρους, πολυμερική μεμβράνη, η οποία είναι συμβατή τόσο με το υλικό αλλαγής φάσης, όσο και με οικοδομικά υλικά. Στα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου καταγράφονται η ευκολία εφαρμογής της, η καλή μετάδοση θερμότητας λόγω της αυξημένης επιφάνειας συναλλαγής και πως δε χρειάζεται προστασία από καταστροφές όπως η μακρο-συσκευασία. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να επηρεάσει τη μηχανική αντοχή της κατασκευής.



Σχήμα 6.4. Υλικό αλλαγής φάσης μικρο-συσκευασμένο σε γύψο

Επιπλέον, τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη μορφή απλής πολυστρωματικής σανίδας και σε συνδυασμό με άλλα δομικά υλικά. Όταν ενσωματώνονται σε πολυστρωματικές οικοδομικές σανίδες, τότε χρησιμοποιούνται ως στοιχεία ενταγμένα στο κτηριακό κέλυφος. Ένα παράδειγμα είναι όταν χρησιμοποιούνται στην εσωτερική επένδυση του τοίχου. Ύστερα από πολλά πειράματα, έχουμε καταλήξει ότι χρησιμοποιώντας αυτές τις πολυστρωματικές οικοδομικές σανίδες στα παρακάτω θετικά συμπεράσματα:

- ✓ Η διάρκεια θερμικής επαναφοράς του συγκεκριμένου συστήματος μειώθηκε περίπου 17% σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα.
- ✓ Η θερμική ροή στο σύστημα αυξήθηκε κατά 20 – 50% συγκριτικά με τα υπόλοιπα.
- ✓ Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας του συστήματος ήταν αυξημένος κατά 7 – 18% σε σχέση με τα συμβατικά.

Τρεις είναι οι κύριοι τρόποι για χρήση P.C.M. στα κτήρια για θέρμανση-ψύξη:

- Τοποθέτηση των P.C.M. στους τοίχους των κτηρίων.
- Τοποθέτηση των P.C.M. σε άλλα δομικά στοιχεία των κτηρίων εκτός από τους τοίχους
- Τοποθέτηση των P.C.M. σε θερμές και ψυχρές μονάδες αποθήκευσης.

Τα πρώτα δυο αναφέρονται σε παθητικά συστήματα, όπου η θέρμανση και η ψύξη που αποθηκεύονται αποδίδονται αυτόματα, όταν η εσωτερική ή η εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται κάτω από το σημείο τήξης. Το τρίτο είναι ένα ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή ψύξη βρίσκεται μέσα σε δοχείο συγκράτησης θερμικά διαχωρισμένο από το κτίριο με μόνωση. Έτσι, η θερμότητα ή η ψύξη χρησιμοποιείται μόνο όταν αυτό απαιτείται και όχι αυτόματα.

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία των P.C.M. χρειάζεται να τα μελετήσουμε στην τοιχοποιία.

Κατά τη θερινή περίοδο η θερμότητα από το περιβάλλον εισέρχεται στο κέλυφος του κτηρίου διαπερνώντας τα στρώματα των δομικών υλικών και αντιμετωπίζει τη θερμική αντίσταση της μόνωσης. Σε μία κοινή κατασκευή τοιχοποιίας, όση θερμότητα διαπεράσει το στρώμα της μόνωσης, τόση και θα εισέλθει στον εσωτερικό χώρο. Στην περίπτωση όμως τοιχοποιίας με P.C.M., αυτή η θερμότητα δε θα εισέλθει στο χώρο, αλλά θα αποθηκευτεί στο στρώμα του P.C.M..

Κατά τη χειμερινή περίοδο ο αέρας του εσωτερικού χώρου έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το εξωτερικό περιβάλλον. Αντίστοιχα λοιπόν, η στρώση με P.C.M. αποθηκεύει όση θερμότητα έχει διαφύγει από τα στρώματα του τούβλου, του σοβά και της μόνωσης.



Σχήμα 6.5. Συσκευασίες P.C.M. για κτηριακές εφαρμογές

Οι βασικότεροι λόγοι εμπορικής αποτυχίας προϊόντων P.C.M. είναι οι εξής:

- Η κακή επιλογή υλικού, καθώς πολύ συχνά περιλαμβάνονταν χημικά, τα οποία δεν εμφάνιζαν ομοιόμορφη τήξη εξ ορισμού, οπότε εμφανιζόταν μεγάλη απώλεια αποθηκευτικής ικανότητας ύστερα από συγκεκριμένο αριθμό κύκλων λειτουργίας, με αποτέλεσμα την αποσύνθεση του υλικού.
- Η κακή επιλογή μεθόδου ή και υλικού συσκευασίας του P.C.M., με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαβρωτικών φαινομένων και μειωμένων επιπέδων στεγανότητας.
- Ο κακός σχεδιασμός, γεγονός που οδηγούσε στην κατασκευή προϊόντων, τα οποία ήταν ασύμβατα με τα δομικά υλικά ή με το όποιο σύστημα για το οποίο το αρχικό προϊόν προοριζόταν.

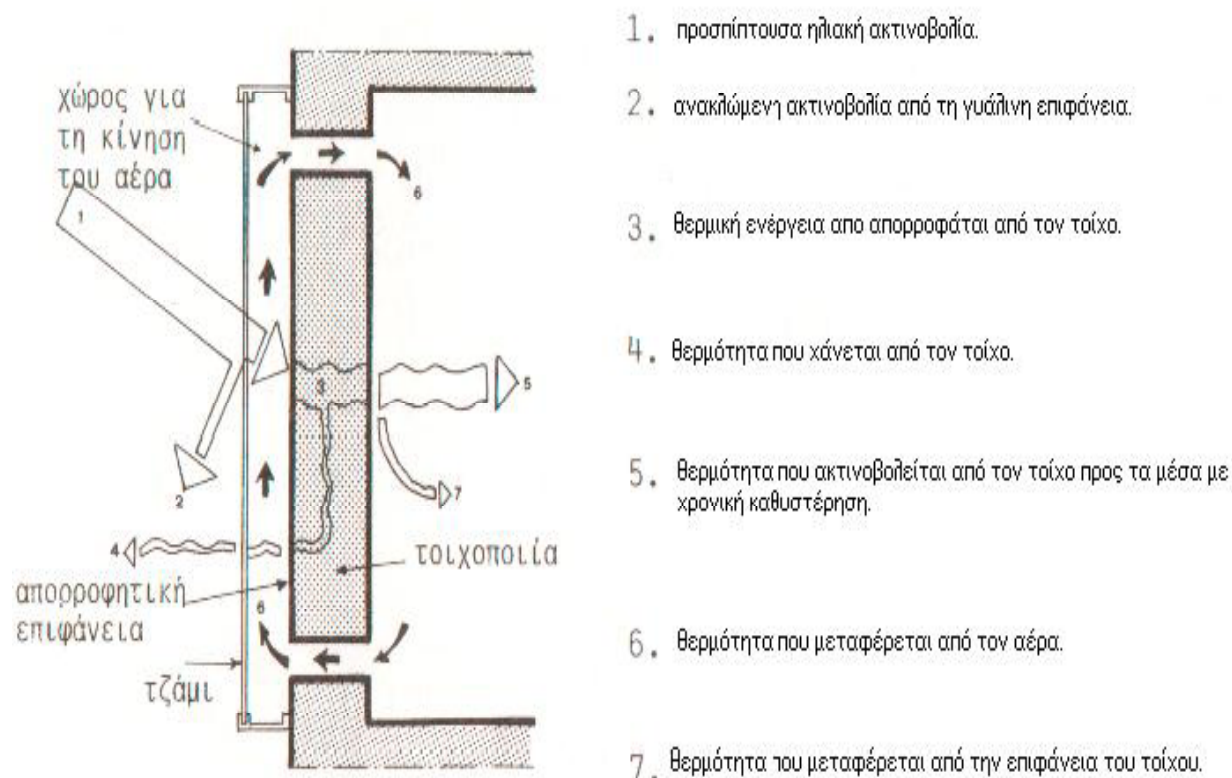
Παρ' όλο που η έρευνα γύρω από τα πλεονεκτήματα κάθε μορφής P.C.M. ακόμα συνεχίζεται, φαίνεται πως τα ένυδρα άλατα έχουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, μαζί με μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Οι παραφίνες είναι επίσης εύφλεκτες, ενώ τα ένυδρα άλατα όχι. Κατά την τοποθέτησή τους σε τοίχους κτηρίων, δεν έχει παρατηρηθεί ότι τα P.C.M. εκλύουν βλαβερά αέρια, αλλά οι παραφίνες είναι τοξικότερες από τα ένυδρα άλατα.

6.2 ΤΟΙΧΟΣ ΤΡΟΜΒΕ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

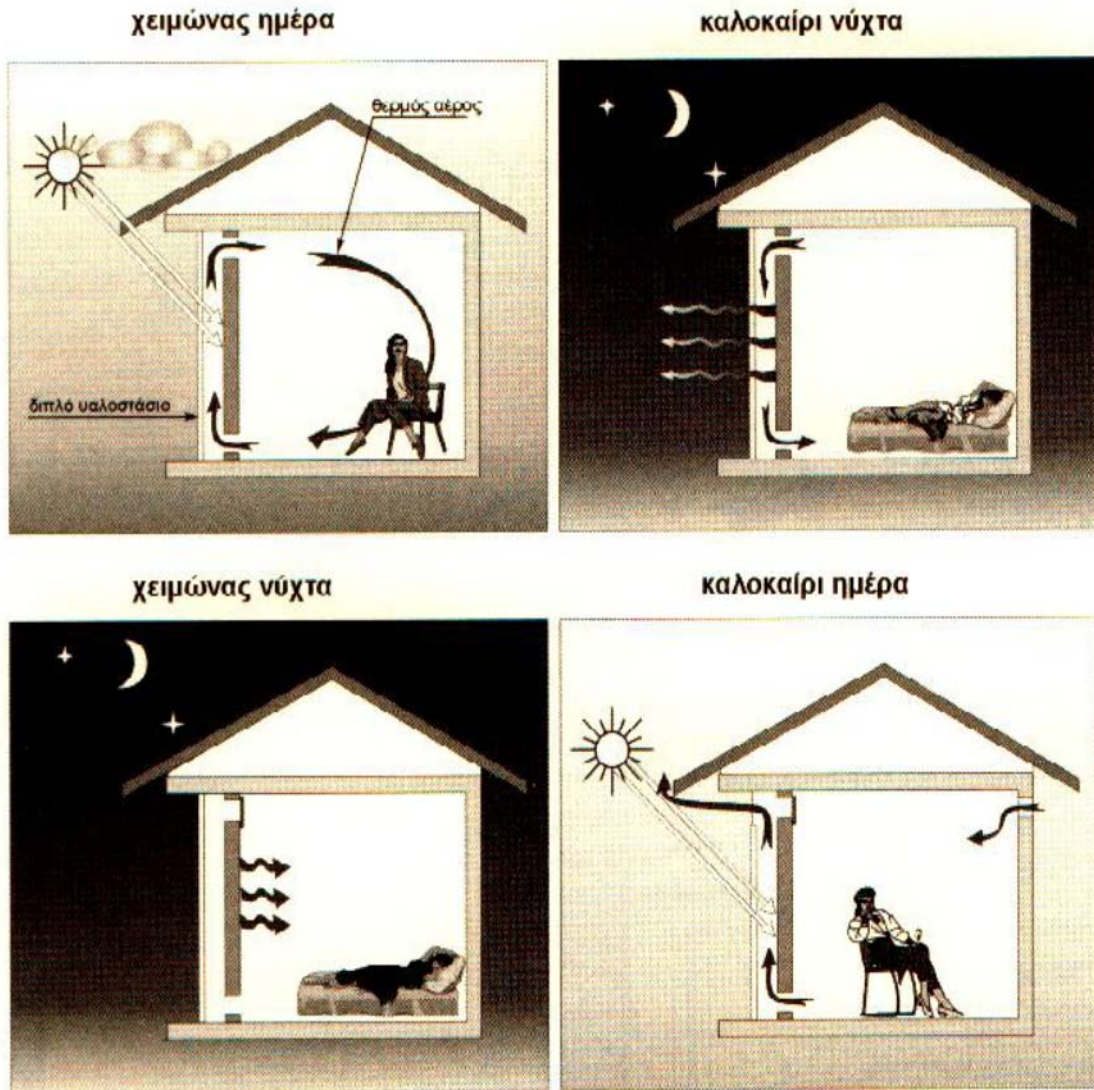
Ένας τοίχος Trombe είναι ένα πρωταρχικό παράδειγμα ενός συστήματος αποθήκευσης έμμεσου κέρδους. Οι παραδοσιακοί τοίχοι Trombe βασίζονται στην αισθητή αποθήκευση ενέργειας, αλλά λόγω της επιθυμητής αυξημένης αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας, ο τοίχος Trombe με P.C.M. είναι μία περίπτωση με αρκετό ενδιαφέρον. Αποτελείται από ένα συνηθισμένο, αλλά παχύ τοίχο στη νότια πλευρά του κτηρίου, μ' ένα γυάλινο ή πλαστικό υαλοπίνακα τοποθετημένο σε απόσταση περίπου τεσσάρων εκατοστών από τον τοίχο. Ένας τοίχος Trombe γεμάτος με P.C.M. κατασκευάζεται πίσω από το παράθυρο της νότιας πλευράς ενός σπιτιού. Ο τοίχος θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, προκαλώντας την τήξη του P.C.M., δηλαδή προκαλεί το λιώσιμό του. Ο θερμός αέρας κινείται προς τα πάνω και μέσα από τη θυρίδα μπαίνει στον εσωτερικό χώρο. Ταυτόχρονα, ψυχρότερος αέρας από τον εσωτερικό χώρο μπαίνει από την κάτω θυρίδα και αντικαθιστά το κενό που δημιουργήθηκε. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η λειτουργία προφανώς αντιστρέφεται. Οι δύο θυρίδες κλείνουν πάνω και κάτω και η θέρμανση του χώρου πετυχαίνεται με την ακτινοβολία της αποθηκευμένης θερμότητας στον τοίχο. Τη νύχτα η αποθηκευμένη θερμότητα απελευθερώνεται, ώστε να θερμανθεί ο χώρος.

Το καλοκαίρι η λειτουργία του τοίχου Trombe αντιστρέφεται. Η επάνω θυρίδα κλείνει, ενώ ταυτόχρονα ανοίγει ένα τμήμα του υαλοστασίου στο επάνω μέρος, έτσι ώστε να απομακρύνεται ο ζεστός αέρας προς τα έξω.

Για μία δοσμένη ποσότητα αποθήκευσης ενέργειας, οι μονάδες με P.C.M. απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους που είναι γεμάτοι με νερό ή από τους τοίχους της αυξημένης θερμικής μάζας, ενώ είναι και πιο ελαφριές σε βάρος.



Σχήμα 6.6. Λειτουργία τοίχου Trombe



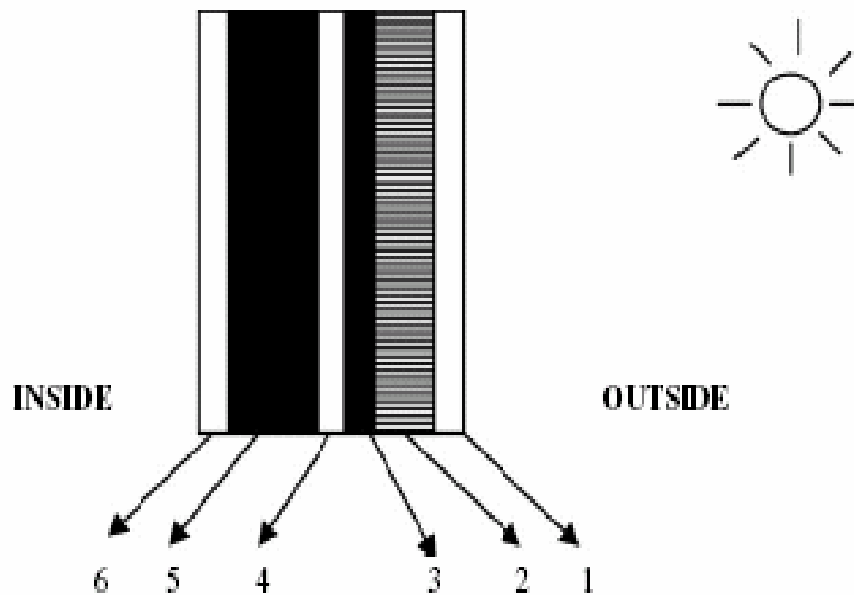
Σχήμα 6.7. Σχηματική παράσταση της λειτουργίας του τοίχου Trombe

6.3 ΗΛΙΑΚΟΣ ΤΟΙΧΟΣ

Ένας τοίχος με ενσωματωμένο P.C.M. έχει τη δυνατότητα να αιχμαλωτίζει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στους τοίχους και την οροφή ενός κτηρίου. Οι τοίχοι αυτοί με τα ενσωματωμένα υλικά αλλαγής φάσης επειδή έχουν μεγάλη θερμική μάζα μπορούν να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτηρίου που εφαρμόζονται. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί όσον αφορά τη μετατόπιση του φορτίου από τις ώρες αιχμής σε περιόδους μικρότερης ζήτησης. Ο ηλιακός τοίχος είναι μία άλλη εφαρμογή για την θερμική αποθήκευση με P.C.M.. Στην περίπτωση του ηλιακού τοίχου με το P.C.M., η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο αποθηκεύεται στο P.C.M., το οποίο είναι "θαμμένο" στον τοίχο.

Οι Stritih και Novak παρουσίασαν έναν πειραματικό ηλιακό τοίχο για τον αερισμό του κτηρίου, ο οποίος απορροφάει την ηλιακή ενέργεια σε μαύρο κερί παραφίνης με σημείο τήξης τους 25-30°C. Η αποτελεσματικότητα της απορρόφησης διαπιστώθηκε ότι έφτανε το 79%. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης έδειξαν ότι το πάνελ καθορίζει την ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται ως αισθητή ή λανθάνουσα θερμότητα και ότι το σημείο τήξης του P.C.M. έχει μία επίδραση στη θερμοκρασία του αέρα που εξέρχεται και αερίζει τον εσωτερικό χώρο.

Ο ηλιακός τοίχος αποτελείται από έξι βασικά μέρη, όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.8. Στοιχεία ενός ηλιακού τοίχου με P.C.M.

Η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος διέρχεται από το γυαλί με το διαφανές μονωτικό υλικό (στρώματα 1 και 2), το οποίο εμποδίζει τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και με θερμική ακτινοβολία. Το P.C.M., το οποίο είναι μέσα σε μία διάφανη πλαστική θήκη (στρώμα 3), απορροφάει και αποθηκεύει ενέργεια κυρίως ως λανθάνουσα θερμότητα. Ο αέρας για τον αερισμό του σπιτιού θερμαίνεται στο κανάλι (στρώμα 4) και οδηγείται στο δωμάτιο. Η μόνωση και ο γύψος (στρώμα 5 και στρώμα 6 αντίστοιχα) είναι βασικά συστατικά κάθε τέτοιου τοίχου.

6.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΑ ΠΑΡΑΘΥΡΑ

Η μετατροπή ενός απλού παραθύρου σε ενεργειακά αποδοτικό μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους. Ένας απ' αυτούς είναι η χρήση παραθυρόφυλλων, τα οποία περιέχουν υλικό αλλαγής φάσης. Το παραθυρόφυλλο που περιέχει P.C.M. τοποθετείται έξω από επιφάνειες παραθύρων.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι γρίλιες παραμένουν ανοιχτές, έτσι ώστε η εξωτερική τους πλευρά να είναι εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία. Κατόπιν, το P.C.M. απορροφά την ακτινοβολία, την αποθηκεύει ως λανθάνουσα θερμότητα και στη συνέχεια λιώνει.

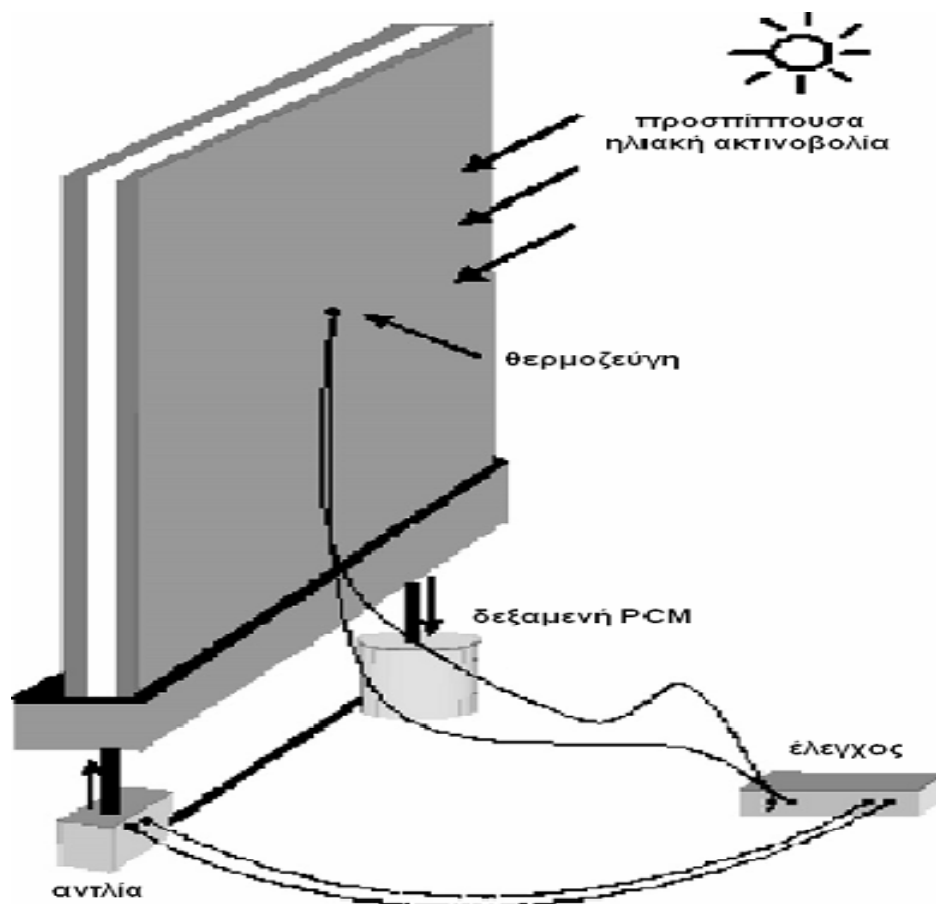
Κατά τη διάρκεια της νύχτας, κλείνουμε το παραθυρόφυλλο, ανοίγουμε το παράθυρο και αποθηκευμένη θερμότητα μεταδίδεται στο χώρο.

Αυτό το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εφαρμόστηκε και καταλήξαμε στο συμπέρασμα, ότι η χρήση παντζουριών με P.C.M. στα παράθυρα, μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία του δωματίου έως και 2°C.



Σχήμα 6.9. Κάθετες και οριζόντιες εσωτερικές γρίλιες παραθύρων με P.C.M.

Μία πρωτότυπη ιδέα που προτάθηκε είναι τα θερμικά ενεργά παράθυρα με κινούμενες κουρτίνες με P.C.M. Το σύστημα αποτελείται από ένα παράθυρο και μία κουρτίνα P.C.M., η οποία μπορεί να κινείται. Το παράθυρο περιέχει διπλά τζάμια, ανάμεσα στα οποία υπάρχει ένα κενό, ενώ στην πάνω άκρη βρίσκεται ένας εξαεριστήρας. Οι πλευρές και το κάτω μέρος είναι σφραγισμένα, εκτός από δύο τρύπες στο κάτω μέρος, οι οποίες επικοινωνούν μέσω πλαστικού σωλήνα με μία αντλία και μία δεξαμενή γεμάτη με P.C.M.. Η αντλία με τη σειρά της επικοινωνεί με τη δεξαμενή του P.C.M., το οποίο είναι σε υγρή μορφή. Η λειτουργία της αντλίας ελέγχεται από έναν αισθητήρα διαφοράς θερμοκρασίας. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας φτάσει σε μία προκαθορισμένη τιμή, τότε η αντλία ξεκινά να λειτουργεί και το P.C.M. αντλείται ώστε να γεμίσει το κενό μεταξύ των φύλλων του παραθύρου. Εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας, το P.C.M. ξεκινά να παγώνει σχηματίζοντας ένα στερεό στρώμα, το οποίο αυξάνεται σε πάχος με το χρόνο, αποτρέποντας έτσι τη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου όλη η ποσότητα του P.C.M. να αλλάξει φάση και να πάει στη στερεή κατάσταση. Αν η σχεδίαση του παραπάνω συστήματος είναι σωστή, τότε έχει προβλεφθεί ότι η εκ νέου αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας θα ξεκινήσει πριν να ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του P.C.M..

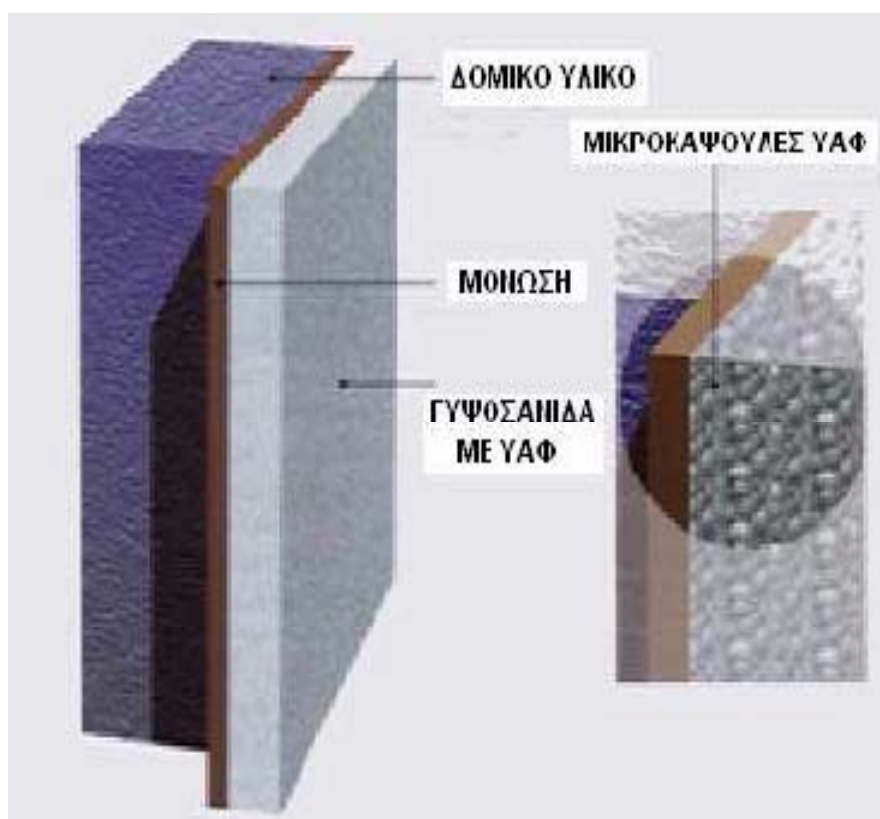


Σχήμα 6.10. Διάταξη ενεργειακά αποδοτικού παραθύρου με P.C.M.

6.5 ΓΥΨΟΣΑΝΙΔΕΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Διάφορα υλικά αλλαγής φάσης, συνήθως κάποια παραφίνη, μπορούν να προστεθούν σε γυψοσανίδα ή σοβά ή σε κάποιο άλλο επενδυτικό υλικό τοιχοποιίας, δημιουργώντας ένα είδος δομικού υλικού που λειτουργεί σαν αποθηκευτικό υλικό. Το P.C.M. στερεοποιείται ελευθερώνοντας θερμότητα όταν είναι διαθέσιμες ψυκτικές πηγές και υγροποιείται απορροφώντας θερμότητα όταν απαιτείται ψύξη. Τα P.C.M. προσφέρουν σημαντική αλλαγή στη θερμοχωρητικότητα μιας εγκατάστασης και για καθαρές ουσίες ελευθερώνουν την αποθηκευμένη θερμότητα με σχεδόν μηδενική αλλαγή στη θερμοκρασία τους.

Οι γυψοσανίδες αυτές θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις παραδοσιακές γυψοσανίδες κατά τη διάρκεια της κατασκευής ή και της ανακαίνισης ενός κτηρίου. Με τον τρόπο αυτό, θα παρέχουν στο κτίριο την αποθήκευση θερμότητας, η οποία θα διανέμεται σ' όλη του την έκταση, ενισχύοντας το παθητικό σύστημα και περιορίζοντας τα απαιτούμενα μέγιστα ηλεκτρικά φορτία για θέρμανση - ψύξη.



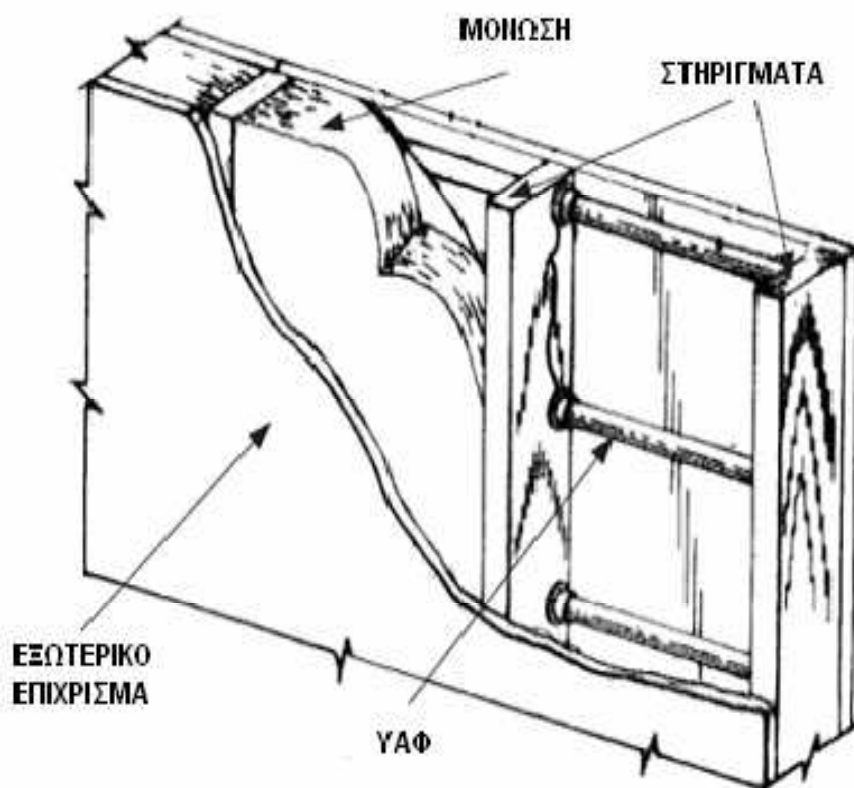
Σχήμα 6.11. Εφαρμογή ενισχυμένης γυψοσανίδας σε τοίχο

Η αυξημένη αποθηκευτική ικανότητα της ενισχυμένης γυψοσανίδας μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία δωματίου κοντά στο ανώτατο όριο ανθρώπινης θερμικής άνεσης χωρίς μηχανικό σύστημα κλιματισμού. Σε περιοχές όπου λόγω κλίματος κατά τη διάρκεια της ημέρας έχουμε μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα εξαερισμού κατά τη διάρκεια της νύχτας για να απομακρύνει την αποθηκευμένη θερμότητα από τη γυψοσανίδα.

6.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΙΧΟΥ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Οι τοίχοι με μόνωση που περιέχει υλικά αλλαγής φάσης έχουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους και τα αντίστοιχα υλικά μόνωσης στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Επειδή η επιφάνεια που εκτίθεται είναι μεγάλη και το υλικό αλλαγής φάσης απορροφά θερμότητα σ' ένα μικρό μόλις θερμοκρασιακό εύρος, πρέπει το τμήμα που περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης να μην έρχεται σε άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία. Η μόνωση με υλικό αλλαγής φάσης έχει πολύ μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά είδη μόνωσης και προσφέρει εξαιρετική μετάδοση θερμότητας. Δεν έχει ιδιαιτερότητες ως προς την εγκατάστασή του, οπότε και το όποιο επιπλέον κόστος εγκατάστασης είναι πολύ μικρό.

Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα, όπως η ιδιαιτερότητα σχεδιασμού για κάθε ξεχωριστό κλίμα. Ένα σημείο τήξης μπορεί να εξυπηρετεί άριστα ένα κλίμα, αλλά το πιθανότερο είναι ότι δεν εξυπηρετεί καθόλου όλα τα άλλα. Όπως είναι εύκολα κατανοητό, η εύρεση της κατάλληλης θερμοκρασίας είναι διπλά δύσκολο πρόβλημα, όταν μιλάμε για κλίματα με ανάγκη και για ψυκτικές και για θερμαντικές συσκευές.

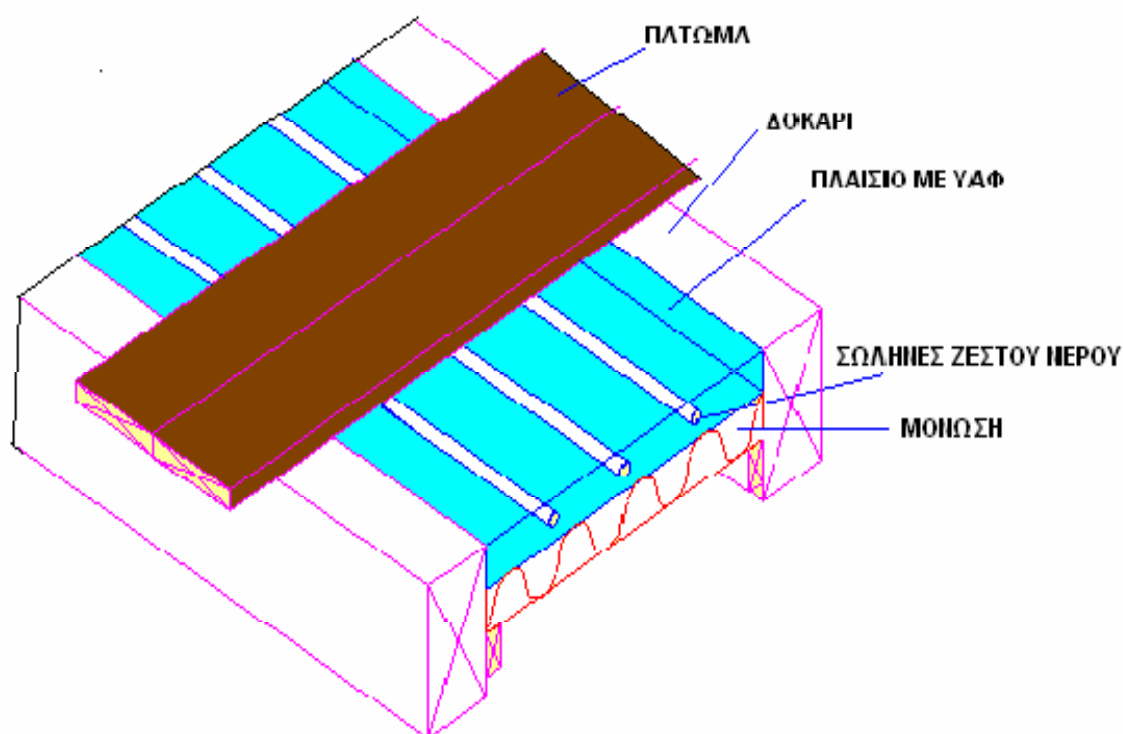


Σχήμα 6.12. Σχεδιάγραμμα τοίχου με ενισχυμένη με P.C.M. μόνωση

6.7 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΔΟΔΑΠΕΔΙΑΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Η ενδοδαπέδια θέρμανση έχει το μεγάλο πλεονέκτημα της ομοιόμορφης θερμικής άνεσης σ' ολόκληρο το χώρο που θερμαίνεται, για θερμοκρασίες περίπου 25-28°C. Το περιβάλλον που διαμορφώνει η ενδοδαπέδια θέρμανση είναι πολύ φιλικό προς τον άνθρωπο, το ίδιο το σύστημα δεν παρουσιάζει προβλήματα ή κινδύνους για τους χρήστες και επίσης δεν παρεμβαίνει στην αισθητική του χώρου, κάτι που καθιστά την εφαρμογή κατάλληλη για οποιοδήποτε είδος εσωτερικού χώρου.

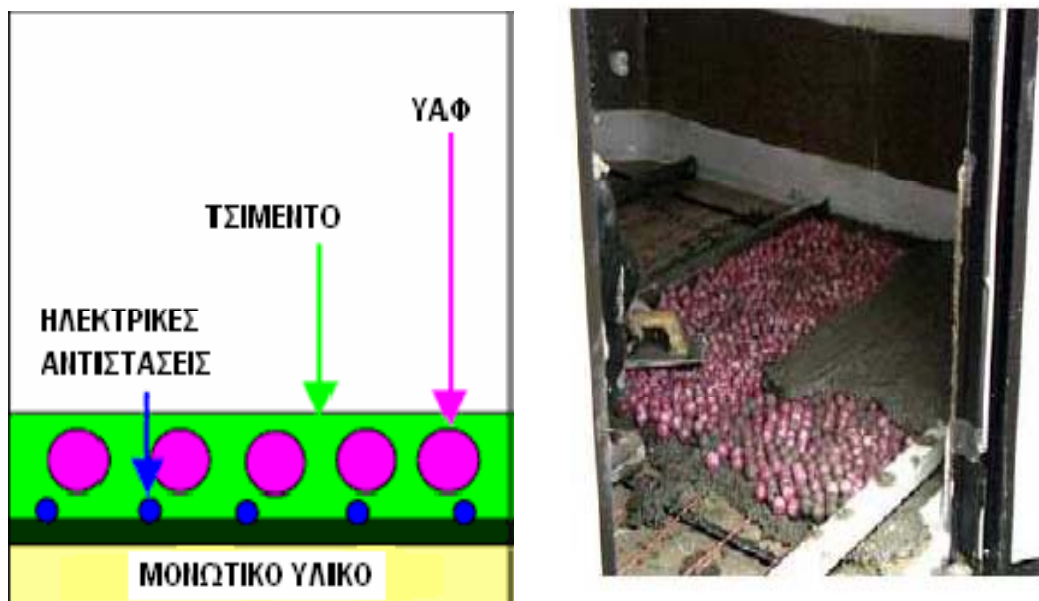
Η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορεί να εφαρμοστεί με τα συστήματα ύδατος (θερμά-υγρά) και με τα ηλεκτρικά συστήματα (ξηρά). Στα συστήματα ύδατος, το νερό θερμαίνεται κυρίως με την καύση πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Συνεπώς, η εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης δεν προσφέρει κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα αν έχουμε σαν πρώτη ύλη συμβατικά καύσιμα. Αυτό δεν συμβαίνει και στην περίπτωση που η ενδοδαπέδια θέρμανση χρησιμοποιείται για να συνδυαστεί με κάποιο σύστημα που θα εκμεταλλεύεται κάποια διαφορετική πηγή ενέργειας, όπως η ηλιακή.



Σχήμα 6.13. Διάταξη υγρού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης

Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του νερού. Αν για τη χρονική στιγμή που θερμαίνεται δεν υπάρχουν απαιτήσεις θέρμανσης του χώρου, τότε η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να γίνει στο υλικό αλλαγής φάσης που βρίσκεται στο δάπεδο, αφού προορίζεται για τη θέρμανση του χώρου. Η φόρτιση του υλικού αλλαγής φάσης εξασφαλίζει θερμότητα για μετέπειτα χρήση.

Από την άλλη πλευρά, τα ηλεκτρικά συστήματα, μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα υλικά αλλαγής φάσης, εκμεταλλευόμενα το χαμηλό κόστος του ηλεκτρισμού στις ώρες μη αιχμής. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως σφαιρίδια υλικών αλλαγής φάσης που καλύπτουν τις ηλεκτρικές αντιστάσεις.



Σχήμα 6.14. Διάταξη ξηρού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης

Επίσης, έχει μελετηθεί κατά πόσο επηρεάζει η χρήση χαλιών, καθώς επίσης και περιοχές με ξύλινη επένδυση πατώματος πάνω από τσιμέντο ή μίγματος γύψου-τσιμέντου. Υλικά, όπως το τσιμέντο και μίγματα αυτού, αποτελούν τη θερμική μάζα του δαπέδου και είναι τα μέσα αποθήκευσης της ενέργειας.

Γενικότερα, η θέρμανση μέσω ακτινοβολίας εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη θέρμανση μέσω συναγωγής. Ένα πλεονέκτημα είναι ότι εξοικονομείται ζωτικός χώρος, καθώς η ακτινοβολία απορροφάται άμεσα από το δάπεδο στα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Η θερμική μάζα του δαπέδου αποθηκεύει την ακτινοβολία, κάνοντας δυνατή την καλύτερη κατανομή των ενεργειακών φορτίων κατά της διάρκειας της ημέρας. Ωστόσο, όσο πυκνότερη είναι η θερμική μάζα του δαπέδου, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. Ένα υλικό που έχει μεγάλη πυκνότητα είναι το τσιμέντο, το οποίο αποτελεί τη θερμική μάζα του δαπέδου, όπως έχουμε ήδη αναφέρει.

Η χρήση υλικών αλλαγής φάσης αντί άλλων υλικών, εγγυάται μεγάλη αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας μέσα στο μικρό εύρος θερμοκρασιών που συναντώνται τυπικά στα κτήρια.

Σήμερα στην ενδοδαπέδια θέρμανση χρησιμοποιείται ένα στρώμα από θερμομπετόν, το οποίο καλύπτει τις ηλεκτρικές αντιστάσεις του συστήματος. Η καινοτομία στον τομέα των κατασκευών, έχει να κάνει με την αντικατάσταση του θερμομπετόν από το στρώμα κόκκων του υλικού αλλαγής φάσης. Το κόστος των υλικών αλλαγής φάσης για την ενδοδαπέδια θέρμανση δεν είναι σημαντικό, καθώς τοποθετούνται παραφίνες, οι οποίες έχουν χαμηλό κόστος, χωρίς συσκευασία για να επιβαρύνει το κόστος.

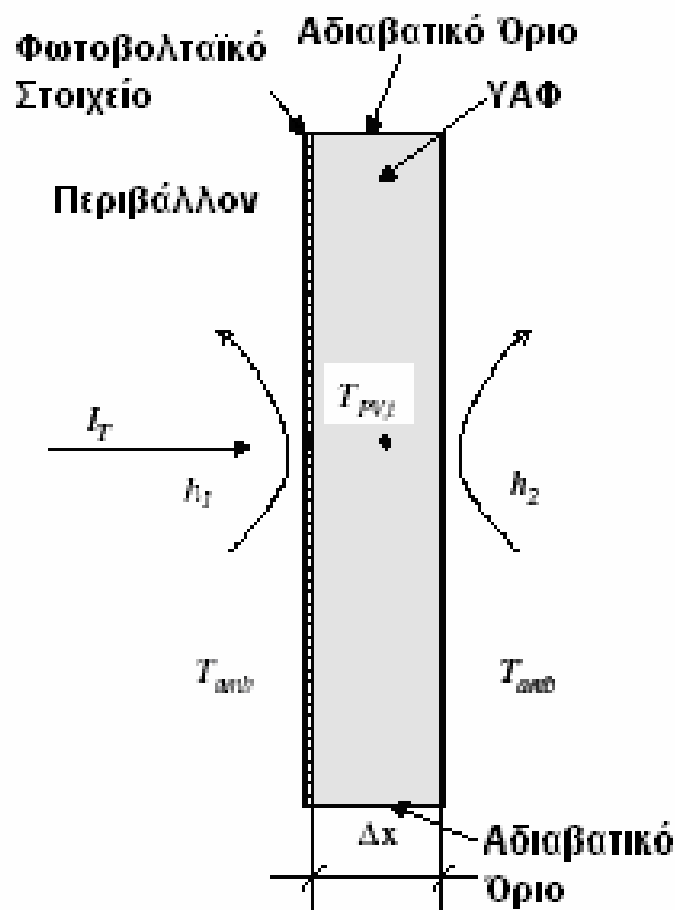


Σχήμα 6.15. Κόκκοι και διάταξη υλικών αλλαγής φάσης για αντικατάσταση θερμομπετόν σε εγκατάσταση ενδοδαπέδιας θέρμανσης

Τα αποτελέσματα από τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης κρίνονται ιδιαίτερα θετικά και η χρήση των καινοτομικών συστημάτων που περιλαμβάνουν τα υλικά αλλαγής φάσης φαίνεται να κερδίζει έδαφος στον κτηριακό τομέα, κυρίως έπειτα από την επιτυχημένη εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης στην τοιχοποιία.

6.8 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική στα κτήρια γίνεται με αρκετές απώλειες όταν γίνεται με τη χρήση φωτοβολταϊκών, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στα κτήρια. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να εργάζεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μια χαρακτηριστική τιμή θερμοκρασίας είναι οι 25°C. Όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στοιχείου ξεπεράσει αυτή την τιμή, η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μειώνεται κατά 0.5%K⁻¹. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης σε φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το υλικό αλλαγής φάσης τοποθετημένο σε αδιαβατικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, απορροφά την εξέχουσα θερμότητα, διατηρώντας το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε σταθερή θερμοκρασία, έτσι ώστε να εξασφαλίσει την αποδοτική λειτουργία του.



Σχήμα 6.16. Ενισχυμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο

6.9 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ιδιαίτερος ευαίσθητα στη υπερθέρμανση, επηρεάζοντας αρνητικά τόσο τη διάρκεια ζωής, όσο και την αξιοπιστία του εξαρτήματος. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που συναντά το ρεύμα καθώς διαπερνά τα καλώδια, τα επίπεδα πυριτίου, τα transistor των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αυξάνουν τη θερμοκρασία τους με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος φθοράς ή και καταστροφής. Σκοπός είναι να διατηρηθεί η θερμοκρασία των εξαρτημάτων αυτών εντός ορίων ασφαλούς λειτουργίας της εκάστοτε συσκευής, χωρίς να χρειαστεί να αυξηθεί το συνολικό της μέγεθος.

Σήμερα, μεταλλικά πτερύγια χρησιμοποιούνται για την απαγωγή θερμότητας από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ενισχύοντας τα συστήματα ψύξης αυτά με ανεμιστήρες καταλλήλου μεγέθους. Η χρησιμοποίηση υλικών αλλαγής φάσης σ' αυτά τα συστήματα, για την απομάκρυνση των σημείων αιχμής που παρουσιάζει η χρονική κατανομή της θερμοκρασίας του εξαρτήματος, είναι απολύτως αξιόπιστη, καθώς το υλικό αλλαγής φάσης ανανεώνεται από μόνο του και επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση.

Όπως είναι γνωστό τα υλικά αλλαγής φάσης δρουν σε τρεις φάσεις. Κατά την πρώτη φάση η θερμοκρασία του στερεού υλικού αλλαγής φάσης αυξάνεται μέχρι το σημείο τήξης του, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντός του. Κατά τη δεύτερη φάση, η θερμοκρασία του υλικού αλλαγής φάσης παραμένει σταθερή, καθώς το υλικό αλλαγής φάσης λιώνει. Κατά την τρίτη φάση η θερμοκρασία του υγρού υλικού αλλαγής φάσης συνεχίζει να αυξάνεται.

Για να εισαχθούν τα υλικά αλλαγής φάσης επιτυχώς στις ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει θεωρητικά να μη βρεθούν στην τρίτη φάση, αλλά να παραμείνουν στη δεύτερη, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση.



Σχήμα 6.17. Προϊόντα με υλικά αλλαγής φάσης για ηλεκτρονικά εξαρτήματα

6.10 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ

Οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στην ψύξη των επεξεργαστών των ηλεκτρονικών υπολογιστών, περιλαμβάνουν τα ίδια προϊόντα όπως των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αν και πλέον έχουν αναπτυχθεί προϊόντα, τα οποία αντικαθιστούν πλήρως τα μεταλλικά πτερύγια ψύξης του επεξεργαστή. Αν και το κόστος τους είναι αρκετά αυξημένο, λόγω κυρίως του μικρού μεγέθους τους, η λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και συμφέρουσα από οικονομικής άποψης, ιδιαίτερα όσο αυξάνεται ο αριθμός των επεξεργαστών και η αντίστοιχη επεξεργαστική ισχύς, οπότε και η αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα.



Σχήμα 6.18. Προϊόντα για ψύξη επεξεργαστών ηλεκτρονικών πλακετών

Στο σύνολό τους αυτά τα προϊόντα είναι αποτελεσματικά και συντελούν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά τους:

- Αύξηση του χρονικού διαστήματος πρώτης εκκίνησης του ανεμιστήρα από τα 20 λεπτά στις τέσσερις ώρες, οπότε επιτυγχάνονται καλύτερες συνθήκες εργασίας στον υπολογιστή (π.χ. αθόρυβη λειτουργία)
- Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του υπολογιστή κατά 25 %
- Αύξηση της ζωής του επεξεργαστή
- Αύξηση των επιδόσεων του επεξεργαστή, λόγω της ελάττωσης της μέσης θερμοκρασία λειτουργίας του

6.11 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Τα συστήματα των τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, περιέχουν μηχανήματα και ηλεκτρονικά εξαρτήματα τα οποία είναι υπεύθυνα για την εύρυθμη λειτουργία του αντίστοιχου δικτύου. Τέτοια εξαρτήματα περιέχουν ηλεκτρονικά κυκλώματα, ιδιαίτερα ακριβά και καταναλωτικά από άποψης ενέργειας, όπως επίσης και πολύ ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες. Το καλύτερο δυνατό σημείο τοποθέτησης των κουβουκλίων που περιέχουν τέτοια μηχανήματα είναι σε ανοιχτούς χώρους (κοιλιάδες) και κατά το δυνατόν υψηλότερα (υψώματα, βουνά). Ως εκ τούτου, είναι συνήθως τοποθετημένα σε πρόσβασιμες μεν περιοχές, αλλά μακριά από κατοικημένους χώρους, οπότε είναι δύσκολη η συνεχής επιτήρηση της θερμοκρασιακής κατάστασής τους. Τα υλικά αλλαγής φάσης έχουν βρει εφαρμογή και σ' αυτά τα συστήματα.

Τα τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια είναι μονωμένα και κλιματιζόμενα φυλάκια, τα οποία προστατεύουν την καρδιά της κινητής τηλεφωνίας, τον πομποδέκτη βάσης. Είναι το κομμάτι εκείνο, ενός κλασικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας, το οποίο διαχειρίζεται την κίνηση και το σήμα του δικτύου. Εκτελεί μάλιστα διάφορες εργασίες σχετικά κυρίως με το δίκτυο, όπως την αποκωδικοποίηση της συνομιλίας, το διαχωρισμό των καναλιών του δικτύου από άλλα δίκτυα (ραδιοφωνικά, αεροπορικά, τηλεοπτικά, κλπ), καθώς και τη διαχείριση του σήματος για την εξυπηρέτηση όλης της περιοχής κάλυψης. Ο πομποδέκτης βάσης, καθώς επίσης και η αντίστοιχη μπαταρία, είναι ιδιαίτερος ευαίσθητα στη θερμοκρασία και ο περιβάλλον χώρος τους πρέπει να διατηρείται διαρκώς κάτω από τους 35°C.

Τα υλικά αλλαγής φάσης που εγκαθίστανται σ' αυτά τα κουβούκλια απορροφούν θερμότητα από το εσωτερικό, θερμότητα η οποία παράγεται από τη λειτουργία του πομποδέκτη βάσης, ελαχιστοποιώντας ή ακόμα και εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης της γεννήτριας για κλιματισμό, επομένως έχουμε οικονομικό όφελος, λόγω της μικρότερης ποσότητας καυσίμου που καταναλώνει η γεννήτρια. Το υλικό αλλαγής φάσης θα επαναφορτιστεί όποτε είναι διαθέσιμη η πηγή ενέργειας, οπότε θα δουλεύει το κανονικό σύστημα κλιματισμού, άρα και θα αποβάλλει την αποθηκευμένη θερμότητα.



Σχήμα 6.19. Συσκευασίες υλικών αλλαγής φάσης που χρησιμοποιούνται σε τηλεπικοινωνιακά κουβούκλια

6.12 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΟΧΗΜΑΤΑ

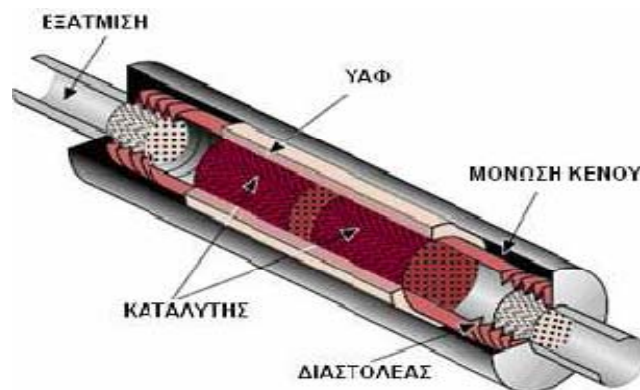
Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα σε μία μπαταρία λανθάνουσας θερμότητας, την οποία προσφέρει η BMW σαν προαιρετικό εξοπλισμό σε κάποιο από τα μοντέλα της.

Η αρχή λειτουργίας είναι αρκετά απλή. Το υλικό αποθήκευσης ενέργειας είναι συνδεδεμένο με το ψυγείο του αυτοκινήτου και αποθηκεύει την πλεονάζουσα θερμότητα όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά όρια σχεδίασης. Αυτή η θερμότητα είναι μετά διαθέσιμη στο επόμενο ξεκίνημα του οχήματος με κρύο κινητήρα, ώστε να θερμανθεί ο κινητήρας γρηγορότερα, οπότε βελτιώνει το συνολικό συντελεστή κατανάλωσης καυσίμου (km/lit καυσίμου), όπως επίσης και για τη θέρμανση της καμπίνας του οχήματος. Χάρη στην εξαιρετική μόνωση της μπαταρίας λανθάνουσας θερμότητας, μπορεί να διατηρήσει την αποθηκευμένη ενέργεια με το όχημα σταματημένο σε περιβάλλον ακόμα και στους -20°C για τουλάχιστον δύο εικοσιτετράωρα.

Μία ακόμη εφαρμογή των υλικών αλλαγής φάσης είναι στο σύστημα εξαγωγής του οχήματος. Με χρήση υλικών αλλαγής φάσης διατηρείται ο καταλύτης στη θερμοκρασία σχεδιασμού, ελαττώνοντας τις αυξημένες εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων κατά το ξεκίνημα του κρύου κινητήρα.

Ο καταλύτης που πλέον είναι αναφαίρετο εξάρτημα όλων των σύγχρονων αυτοκινήτων, μετατρέπει μέσω οξείδωσης στα ευγενή μέταλλα που περιέχει (Ρόδιο, Παλλάδιο, Λευκόχρυσος) τα μονοξειδία αζώτου και άνθρακα από την καύση του καυσίμου στον κύλινδρο, σε λιγότερο βλαβερά και σίγουρα όχι δηλητηριώδη διοξειδία. Ωστόσο για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει η θερμοκρασία του καταλύτη να είναι πολύ υψηλή, καθώς για την εν λόγω χημική διαδικασία η μεγάλη θερμοκρασία είναι απαραίτητος παράγοντας. Αυτή όμως η θερμοκρασία δεν αναπτύσσεται άμεσα κατά την εκκίνηση του αυτοκινήτου, αλλά μετά από λίγα λεπτά. Έχει παρατηρηθεί ότι κατά την περίοδο της «κρύας εκκίνησης» εκλύεται το 60%-80% των τοξικών καυσαερίων.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος σχεδιάστηκε ένας τριοδικός καταλύτης ενισχυμένος με υλικά αλλαγής φάσης, με σκοπό να αποθηκεύουν θερμότητα κατά την κίνηση του αυτοκινήτου και να την απελευθερώνουν στην επόμενη εκκίνησή του. Σε οχήματα που εφαρμόστηκε το εν λόγω σύστημα τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά. Οι κινητήρες τέθηκαν σε λειτουργία μετά από 24 ώρες από την προηγούμενη εκκίνησή τους και μετρήθηκαν οι εκπομπές των καυσαερίων τους. Διαπιστώθηκε ότι οι εκπομπές υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα ήταν μειωμένες κατά 84% και 91% αντίστοιχα, συγκρινόμενες με τις εκπομπές κινητήρων με συμβατικό καταλύτη.



Σχήμα 6.20. Υλικά αλλαγής φάσης σε καταλύτη αυτοκινήτου

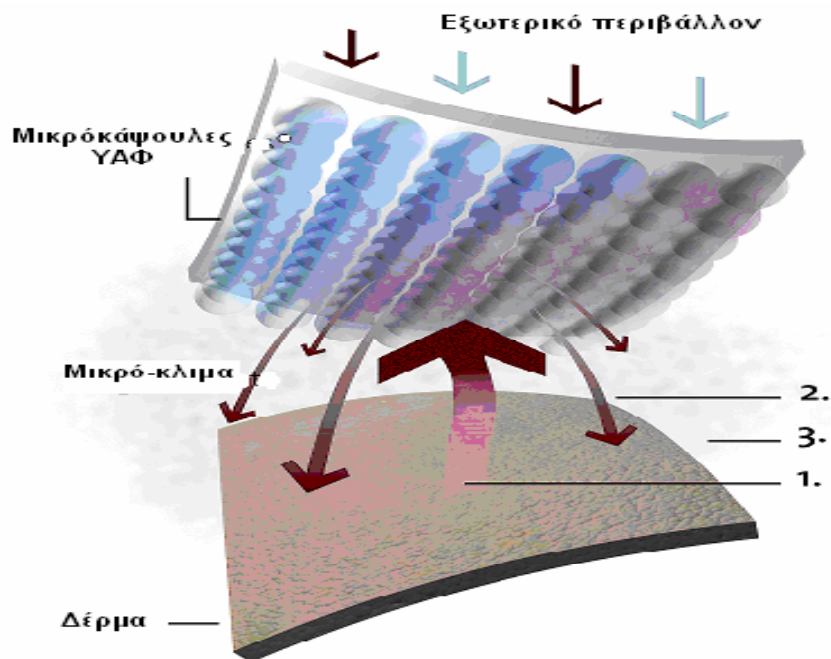
6.13 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΕ ΡΟΥΧΑ

Η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα έχει ως στόχο να παρέχουν θερμική άνεση, ομοιόμορφα κατανεμημένη θερμοκρασία και λιγότερο ιδρώτα. Η εισαγωγή των υλικών αλλαγής φάσης σε ρούχα ξεκίνησε από διαστημικές εφαρμογές, στις στολές των αστροναυτών, για τη προστασία τους από τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σήμερα οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα και γενικότερα στα υφάσματα έχουν επεκταθεί. Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα σε πυροσβεστικές, ορειβατικές ακόμα και σε αγωνιστικές στολές. Η χρήση τους όμως έχει επεκταθεί και σε καθημερινά ρούχα και άλλα υφάσματα, όπως κουβέρτες, κάλτσες, παπούτσια, γάντια, κλπ.

Στα ενδύματα χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά υλικά αλλαγής φάσης σε μικροκάψουλες για να μην εμφανίζονται διαρροές κατά τη μετάβασή τους στην υγρή φάση. Τα υλικά αλλαγής φάσης αυτά όταν προστίθενται στις υφασμάτινες ίνες ή ανάμεσα στα στρώματα των ενδυμάτων, μπορούν να ελαττώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μπορούν να αυξήσουν τη θερμοχωρητικότητα του ενδύματος περίπου 10 φορές.

Επειδή τα υλικά αλλαγής φάσης παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα από τα συνήθη υλικά των ενδυμάτων, αλλά και λόγω του υψηλού κόστους των υλικών αλλαγής φάσης, χρησιμοποιούνται υλικά αλλαγής φάσης κατά 20-35% επί του ολικού βάρους του ενδύματος. Οι παραφίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως ως υλικά αλλαγής φάσης εμφανίζουν το φαινόμενο της τήξης στους 28 - 30°C.

- 1) Το ΥΑΦ απορροφά την πλεονάζουσα θερμότητα
- 2) Η αποθηκευμένη θερμότητα ελευθερώνεται προς το ανθρώπινο σώμα όποτε κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό
- 3) Το αποτέλεσμα είναι ένα μικρόκλιμα σταθερής θερμοκρασίας



Σχήμα 6.21. Αρχή λειτουργίας των ενισχυμένων με P.C.M. ενδυμάτων



Σχήμα 6.22. Εμπορικά ενδύματα και εσώρουχα ενισχυμένα με P.C.M.



Σχήμα 6.23. Ενδύματα ενισχυμένα με P.C.M.

6.14 ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ

Η τεχνολογία των υλικών αλλαγής φάσης χρησιμοποιείται στον ιατρικό εξοπλισμό κυρίως στις εφαρμογές εκείνες που απαιτούν μια παθητική διαχείριση της θερμοκρασίας στο ανθρώπινο σώμα. Χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της θερμικής άνεσης σε εφαρμογές στις οποίες δεν είναι εφικτή η συχνή κίνηση για την ανακούφιση των ασθενών. Επίσης, πολύ χρήσιμη εφαρμογή είναι τα καλύμματα για την πλάτη και το κάθισμα αναπηρικών αμαξιδίων, τα οποία απορροφούν τη θερμότητα από το σώμα του ασθενούς, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία, αποφεύγοντας έτσι το αίσθημα δυσφορίας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της εφίδρωσης.

Επίσης, τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται σαν παθητικά συστήματα ψύξης για τη συντήρηση ανθρώπινων οργάνων κατά τη μεταφορά τους από ένα ασθενοφόρο. Η διατήρηση μιας χαμηλής θερμοκρασίας είναι ζωτικής σημασίας κατά τη μεταφορά των ευπαθών σε θερμοκρασίες ανθρώπινων οργάνων ή του ανθρώπινου αίματος. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των υλικών αλλαγής φάσης στις εφαρμογές αυτές είναι η μεγάλη αξιοπιστία τους, καθώς στις εφαρμογές αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μην εμφανίζεται διακύμανση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 6.24. Υλικά αλλαγής φάσης για μεταφορά αίματος

7. COMSOL

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ COMSOL MULTIPHYSICS

Το λογισμικό COMSOL MULTIPHYSICS προσφέρει στο μηχανικό τη δυνατότητα επίλυσης σύνθετων και αλληλεπιδραστικών φυσικών φαινομένων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αποτελεί δε την ιδανική πλατφόρμα μοντελοποίησης και σχεδιασμού σε πληθώρα εφαρμογών, όπως αισθητήρες και μικροηλεκτρομηχανολογικές συσκευές (MEMS), προβλήματα ανάλυσης κατασκευών και γεωτεχνικών εφαρμογών, σχεδιασμό RF συστημάτων, σχεδιασμό ηχείων, μικροφώνων και γενικά ακουστικών συσκευών, μοντελοποίηση και ανάλυση εναλλακτών θερμότητας, συσκευών ανάμειξης και αντιδραστήρων και γενικότερα οποιουδήποτε προβλήματος σχεδιασμού και μοντελοποίησης συζευγμένων φυσικών φαινομένων.

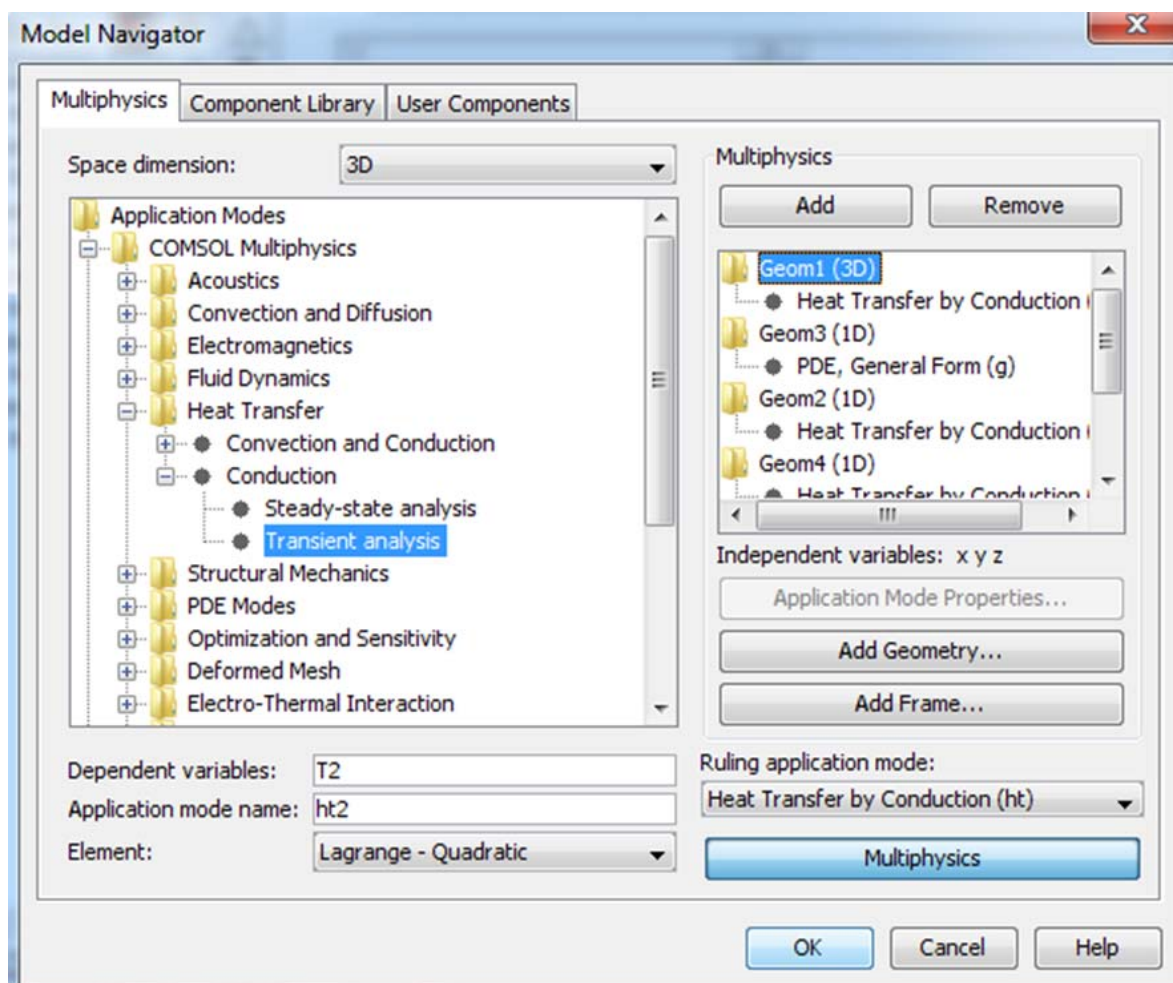
Η πλατφόρμα του COMSOL MULTIPHYSICS εμπλουτίζεται συνεχώς μ' ένα σύνολο από εξειδικευμένα εργαλεία για τη μοντελοποίηση συγκεκριμένων εφαρμογών, όπως:

- **Batteries & Fuel Cells Module.** Μοντελοποίηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια και τους ηλεκτρολύτες μπαταριών και κυψελών καυσίμου.
- **Geomechanics Module.** Προσομοίωση γεωτεχνικών εφαρμογών, όπως τούνελ, εκσκαφτικά έργα, ανάλυση ευστάθειας πρανών και μελέτη αντιστηρίξεων.
- **Microfluidics Module.** Σχεδιασμός συσκευών τύπου “lab-on-a-chip”, ψηφιακές μικροροές, ηλεκτρο-κινητικές και μαγνητο-κινητικές συσκευές, συστήματα ψεκασμού και συστήματα κενού.
- **Plasma Module.** Μοντελοποίηση των συνηθέστερων αντιδραστήρων πλάσματος (ICP, DC discharges, microwave plasmas, CCP).
- **Subsurface Flow Module.** Μοντελοποίηση υπόγειων ροών, εξάπλωσης ρύπανσης στο έδαφος, ροής πετρελαίου και αερίων σε πορώδη μέσα.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με βάση το μοντέλο που παρουσιάζεται στη δημοσίευση: C.Tzivanidis, ; K. A. Antonopoulos, E.Δ. Kravvaritis, “Transient Three-Dimensional Numerical Solution of Night Ceiling Cooling Using PCM-Embedded Piping”, J. Energy Eng.

7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ COMSOL

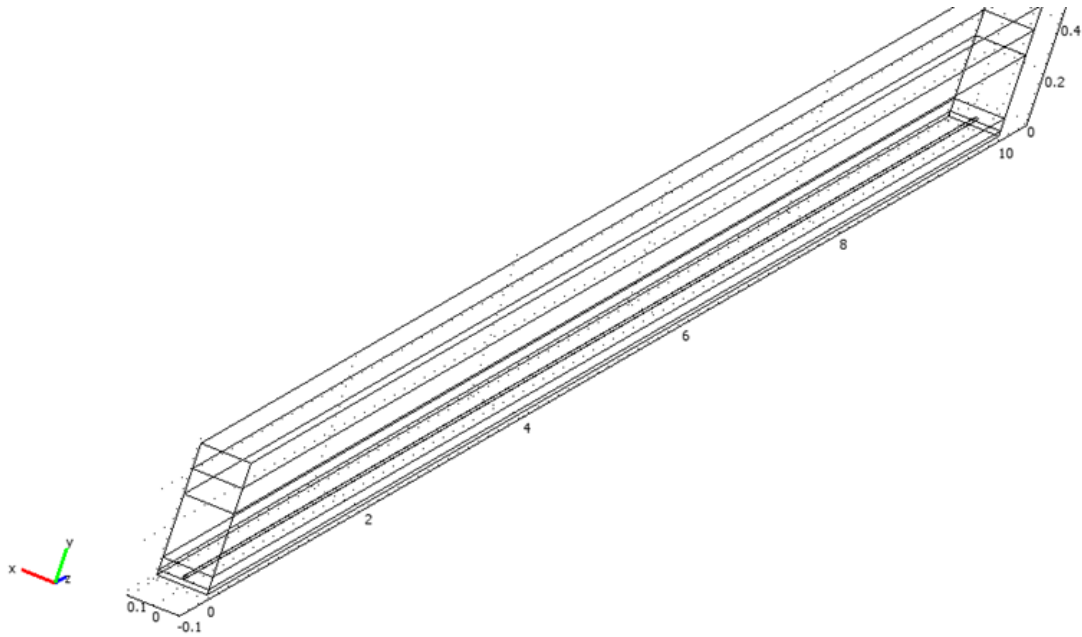
Στο αρχικό παράθυρο του COMSOL επιλέγουμε τη διάσταση του προβλήματος και το φαινόμενο που θα επιλύσουμε, δηλ για τη Geom 1 η γεωμετρία είναι τρισδιάστατη (3D) και μελετάμε πρόβλημα μετάδοσης θερμότητας με αγωγή (μεταβατικό φαινόμενο) χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη (χωρική) μερική διαφορική εξίσωση αγωγής θερμότητας (heat transfer – transient analysis), η οποία είναι εξαρτώμενη από το χρόνο.



Σχήμα 7.1. Επιλογή γεωμετρίας και φαινομένου επίλυσης

Στη συνέχεια σχεδιάζουμε το χωρίο επίλυσης που αντιστοιχεί σ' ένα στοιχείο της οροφής και όχι σ' όλη την οροφή λόγω συμμετρίας. Το στοιχείο οροφής αποτελείται από πέντε επίπεδα. Αυτά είναι τα εξής:

- Σοβάς (πάχος 0,02m)
- Ρ.Σ.Μ. με τη σωλήνα (πάχος 0,05m)
- Τσιμέντο (πάχος 0,25m)
- Μόνωση (πάχος 0,10m)
- Εξωτερικό δάπεδο (πάχος 0,10m)



Σχήμα 7.2. Γεωμετρία του προς επίλυση μοντέλου (Geom 1)

Στη συνέχεια εισάγουμε τις απαραίτητες συνοριακές συνθήκες πάνω στη Geom 1. Η εξίσωση που περιγράφει τη μη μόνιμη μεταφορά θερμότητας με αγωγή στις τρεις διαστάσεις είναι η παρακάτω [1] :

$$\rho_j C_j \partial T_j / \partial t = \partial (k_j \partial T_j / \partial x) / \partial x + \partial (k_j \partial T_j / \partial y) / \partial y + \partial (k_j \partial T_j / \partial z) / \partial z \quad (1)$$

Οι συνοριακές συνθήκες που θα εισαχθούν στη Geom 1 αφορούν:

- ✓ την πάνω πλευρά
- ✓ την αριστερή πλευρά
- ✓ τη δεξιά πλευρά
- ✓ την κάτω πλευρά

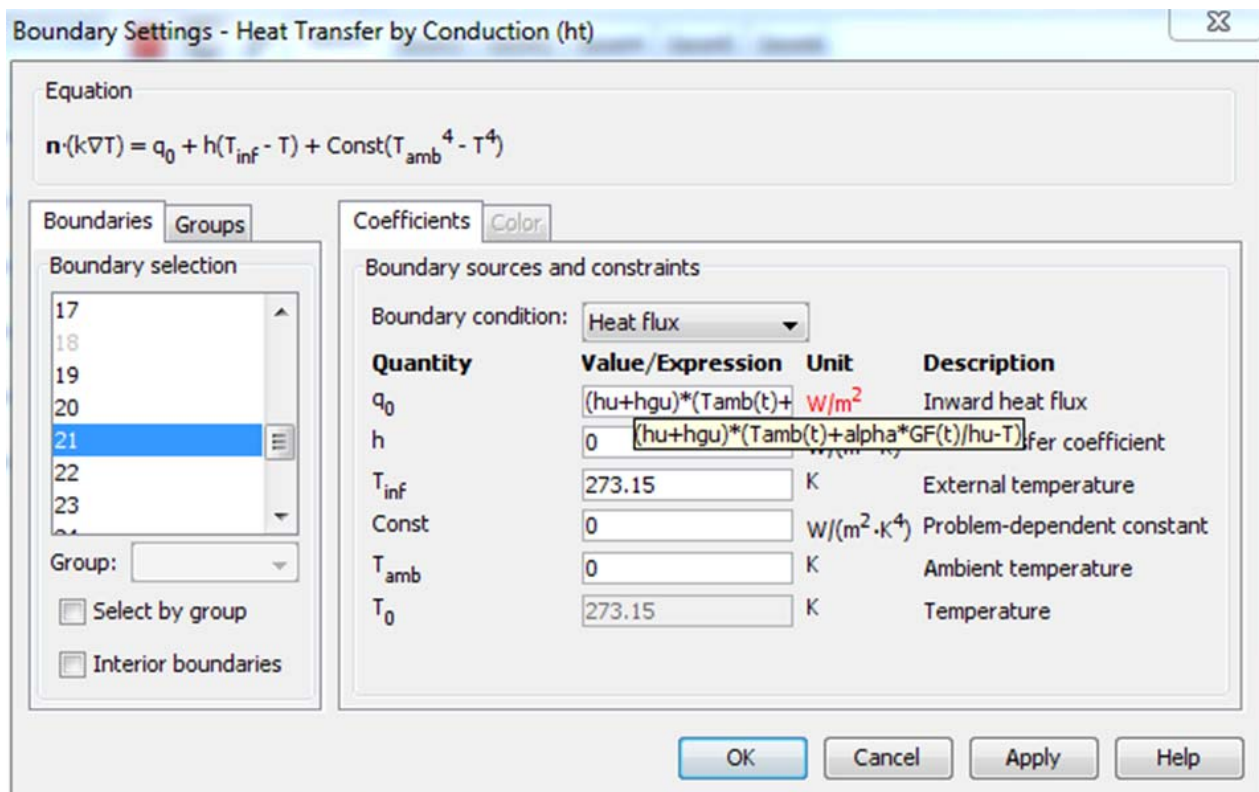
Πάνω πλευρά : (σύνορο 21)

Χρησιμοποιώντας την επιλογή Physics > Boundary Settings, επιλέγουμε ως είδος οριακής συνθήκης Heatflux, λόγω γνωστής μεταφοράς θερμότητας η οποία υπολογίζεται μέσω της σχέσης [1]:

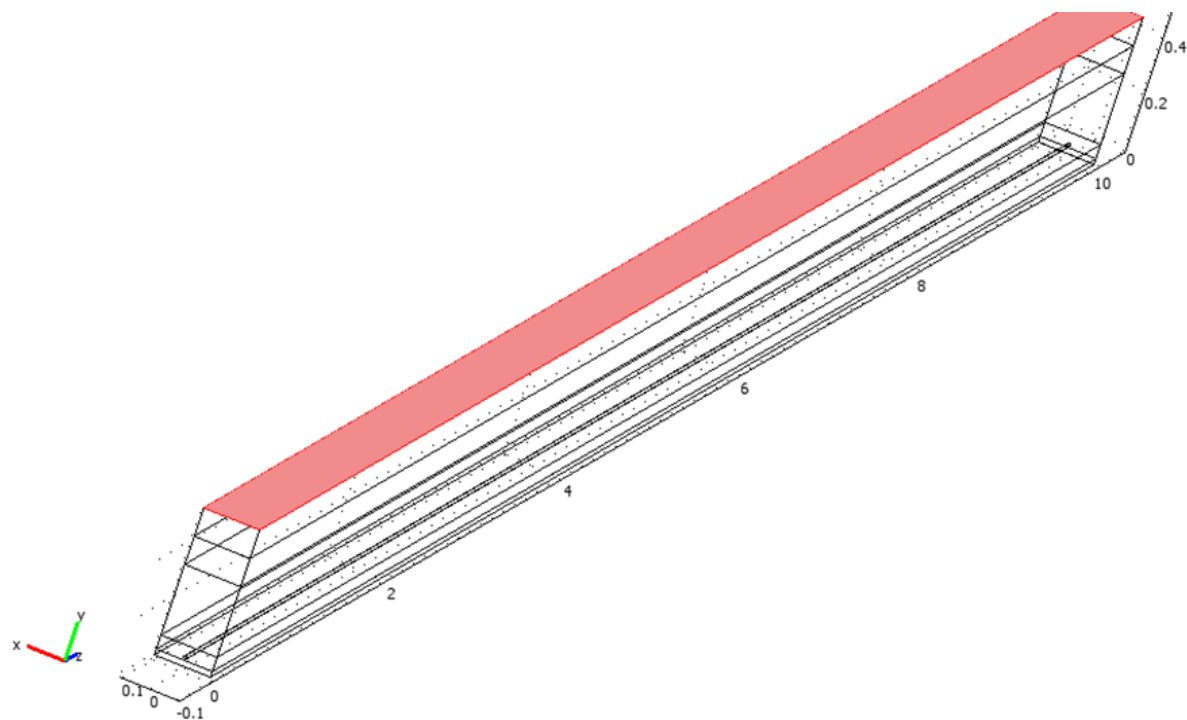
$$q_u(t, x, W, z) = (h_u + h_{g,u}) [T_o(t) - T_j(t, x, W, z)] \quad (2)$$

Στην παραπάνω συνοριακή συνθήκη η εξωτερική θερμοκρασία T_o υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση όπου οι τιμές του $G(t)$ λαμβάνονται από την ASHRAE [1].

$$T_o(t) = T_{amb}(t) + a G(t) / h_u - E \quad (3)$$



Σχήμα 7.3. Συνοριακές συνθήκες στην πάνω πλευρά



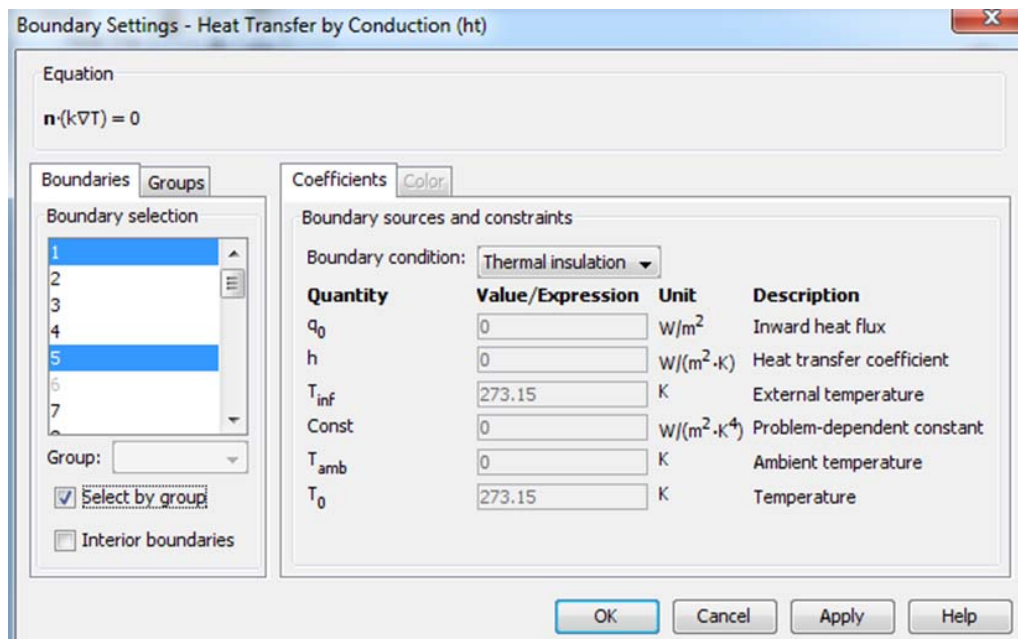
Σχήμα 7.4. Geom 1 σύνορο 21

Αριστερή και Δεξιά πλευρά: (σύνορα 1, 5, 9, 13, 17, 26, 27, 28, 29, 30)

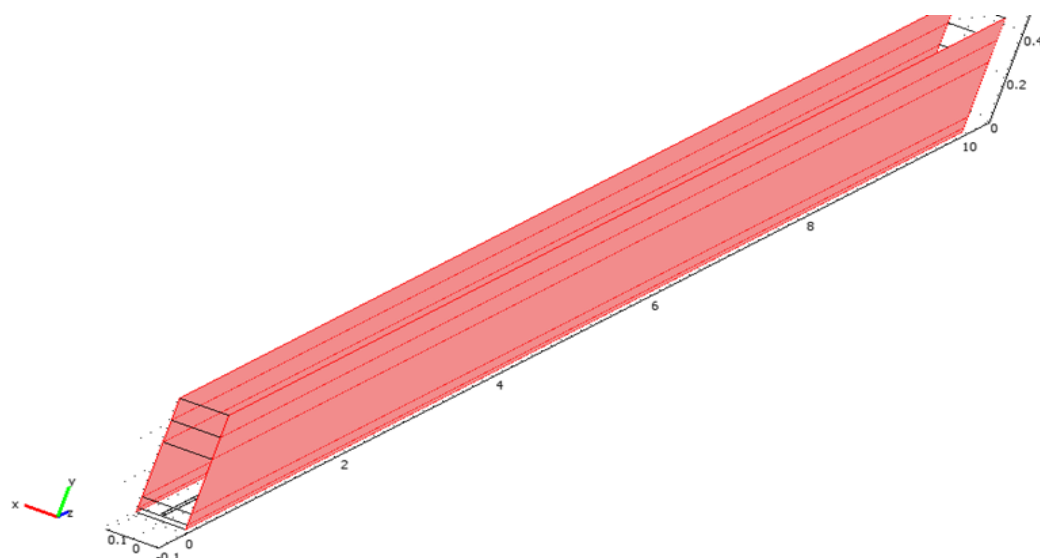
Στις επιφάνειες αυτές θεωρούμε αδιαβατικές συνοριακές συνθήκες. Χρησιμοποιώντας την επιλογή Physics > Boundary Settings, επιλέγουμε ως είδος οριακής συνθήκης Thermal insulation. Η εξίσωση που αντιστοιχεί στην παραπάνω συνθήκη είναι η παρακάτω [1]:

$$[\partial T_j(t, x, y, z) / \partial x]_{x=0} = [\partial T_j(t, x, y, z) / \partial x]_{x=S} = 0 \quad (4)$$

όπου το S είναι η απόσταση που υπάρχει μεταξύ των σωλήνων και είναι 20cm.



Σχήμα 7.5. Συνοριακές συνθήκες στην αριστερή και στη δεξιά πλευρά



Σχήμα 7.6. Geom 1 σύνορα 1, 5, 9, 13, 17, 26, 27, 28, 29, 30

Κάτω πλευρά: (σύνορο 2)

Χρησιμοποιώντας την επιλογή Physics > Boundary Settings, επιλέγουμε ως είδος οριακής συνθήκης Heatflux, λόγω γνωστής μεταφοράς θερμότητας η οποία υπολογίζεται μέσω της σχέσης [1]:

$$q_I(t, x, 0, z) = h_I[T_i(t) - T_I(t, x, 0, z)] + h_{g,I}[T_{V_{\text{indoor walls}}} - T_I(t, x, 0, z)] + h_{g,I}[T_{V_{\text{indoor floor}}} - T_I(t, x, 0, z)] + h_{g,I}[T_{V_{\text{furniture}}} - T_I(t, x, 0, z)] \quad (5)$$

h_I : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για συναγωγή στην κάτω επιφάνεια της οροφής

T_i : εσωτερική θερμοκρασία αέρα η οποία προσδιορίζεται από την εξίσωση [1]:

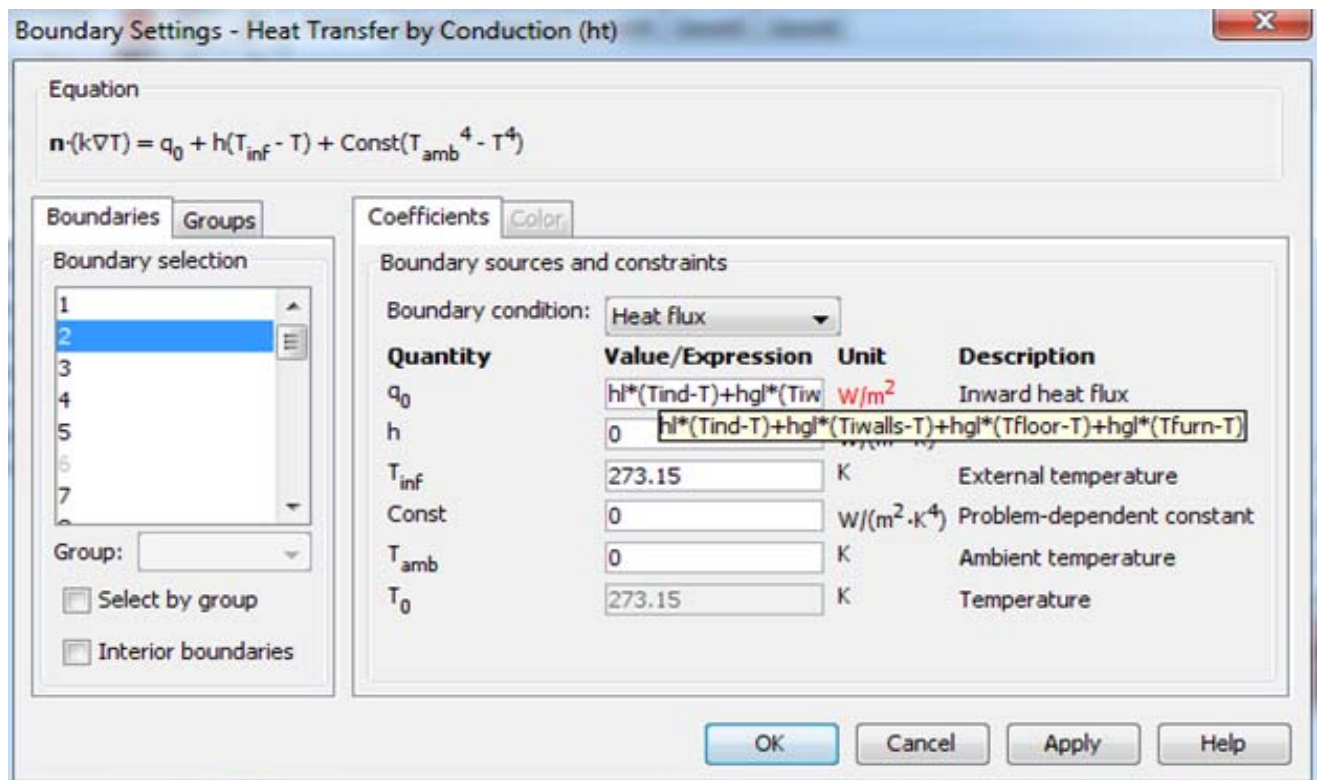
$$\rho_a v_a C_a \partial T_i(t) / \partial t = Q_1(t) + Q_2(t) - Q_I(t) \quad (6)$$

$T_{V_{\text{indoor walls}}}$: μέση τιμή θερμοκρασίας εσωτερικών τοίχων – από επίλυση εξισώσεων για εσωτερικούς τοίχους (T_{walls} : comsol)

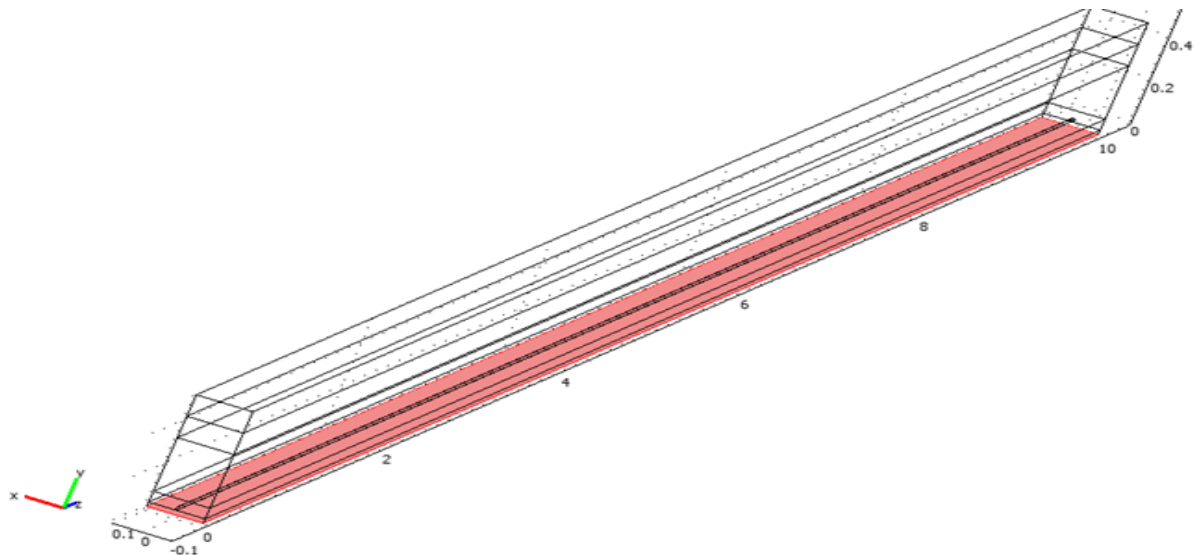
$T_{V_{\text{furniture}}}$: μέση τιμή επίπλωσης – από επίλυση εξισώσεων για έπιπλα (T_{furn} : comsol)

$T_{V_{\text{indoor floor}}}$: μέση θερμοκρασία στην πάνω επιφάνεια της οροφής (T_{floor} : comsol)

$h_{g,I}$: συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για ακτινοβολία στην πάνω επιφάνεια της οροφής

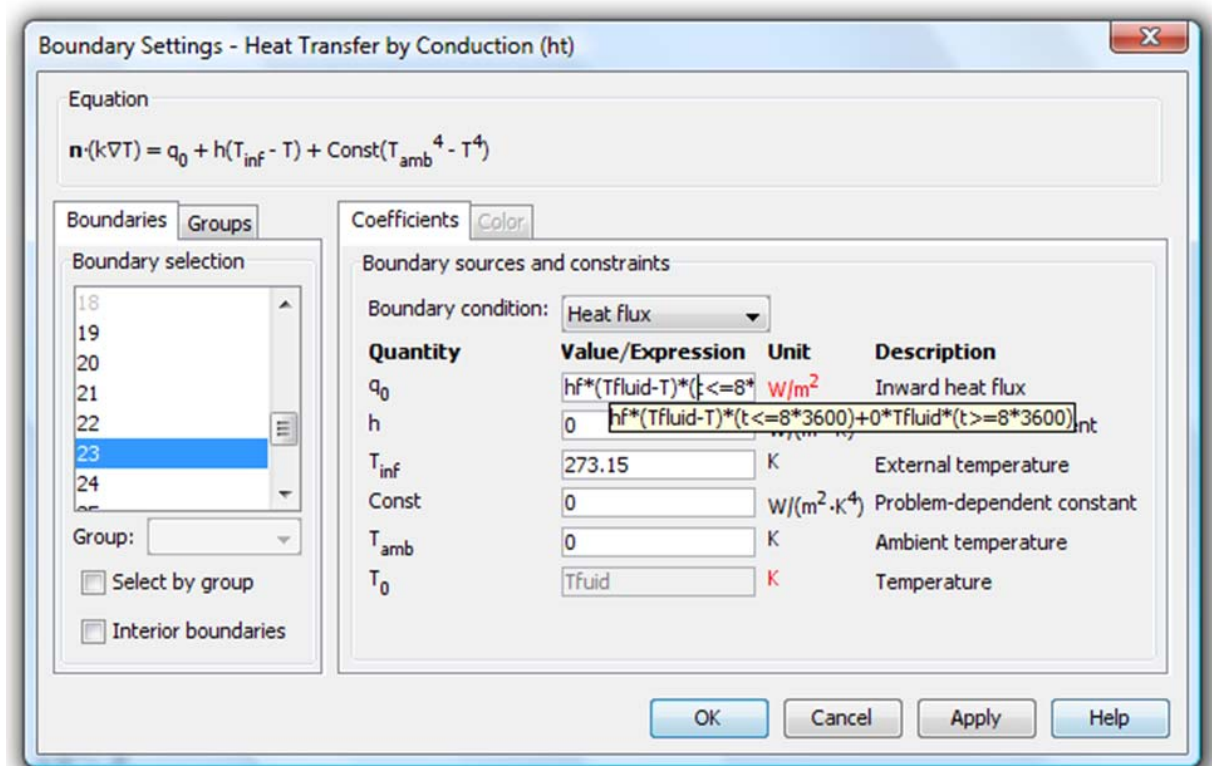


Σχήμα 7.7. Συνοριακές συνθήκες στην κάτω πλευρά



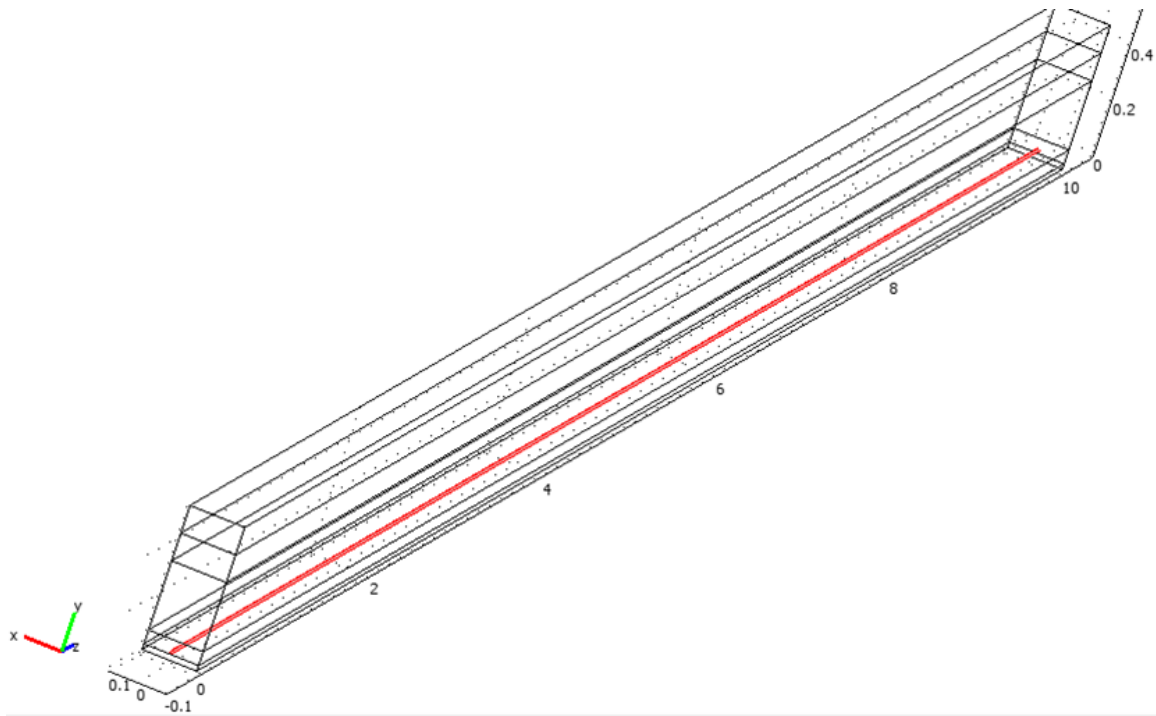
Σχήμα 7.8. Geom 1 σύνορο 2

Όσον αφορά το σωλήνα επιλύουμε το πρόβλημα αγωγής με οριακή συνθήκη συναγωγής στο τοίχωμα του σωλήνα (σύνορα 22, 23, 24, 25). Χρησιμοποιώντας την επιλογή Physics > Boundary Settings, επιλέγουμε Heatflux.



Σχήμα 7.9. Συνοριακές συνθήκες στον σωλήνα

Όπου το 8 είναι οι ώρες που λειτουργεί το σύστημα ψύξης (από τις 00:00 – 08:00).

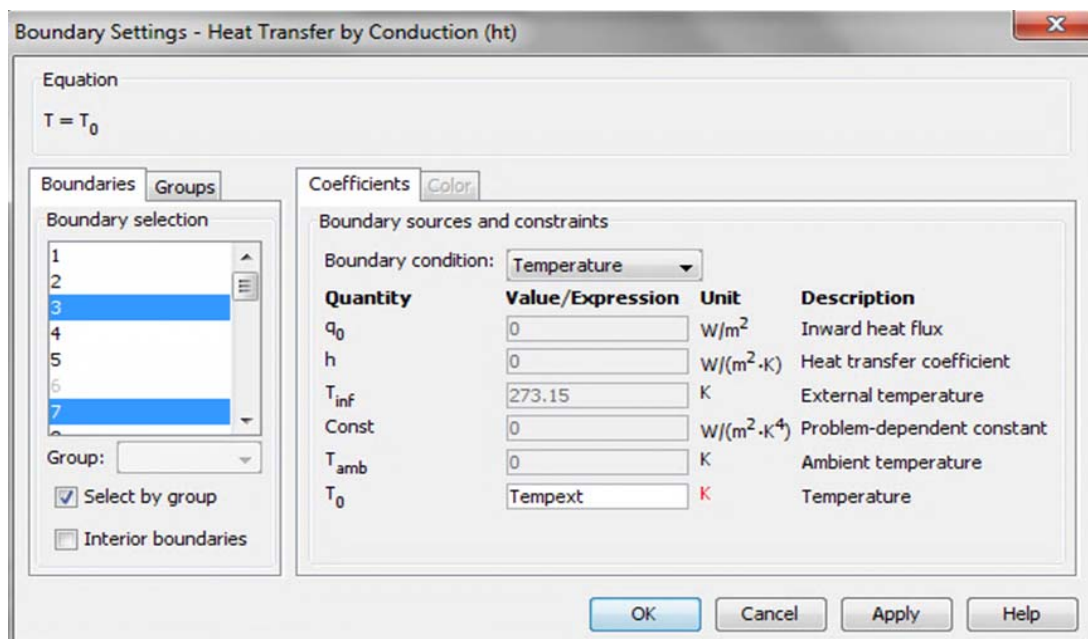


Σχήμα 7.10. Geom 1 σύνορα 22, 23, 24, 25

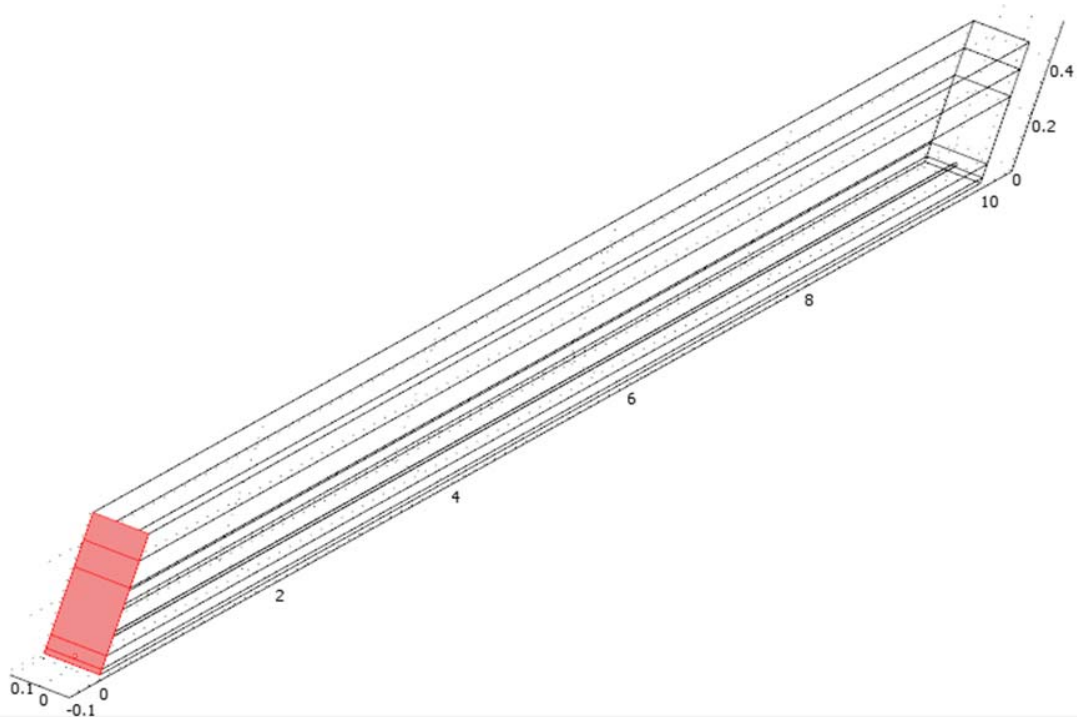
Στη συνέχεια εισάγουμε τις συνοριακές συνθήκες της εμπρόσθιας πλευράς στην Geom 1.

Εμπρόσθια πλευρά: (σύνορα 3, 7, 11, 15, 19)

Θεωρούμε ως οριακή συνθήκη τη γνωστή θερμοκρασία οπότε χρησιμοποιούμε την εντολή Physics > Boundary Settings και επιλέγουμε Temperature με $T_0 = \text{Tempext}$.



Σχήμα 7.11. Συνοριακές συνθήκες στην εμπρόσθια πλευρά

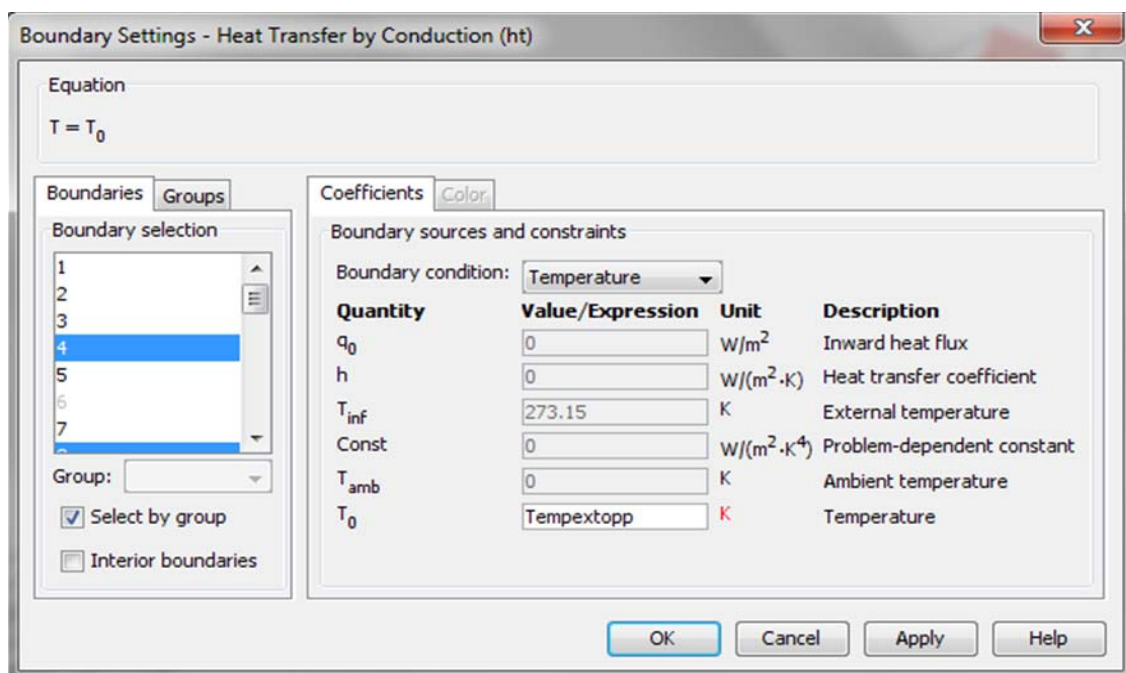


Σχήμα 7.12. Geom 1 σύνορα 3, 7, 11, 15, 19

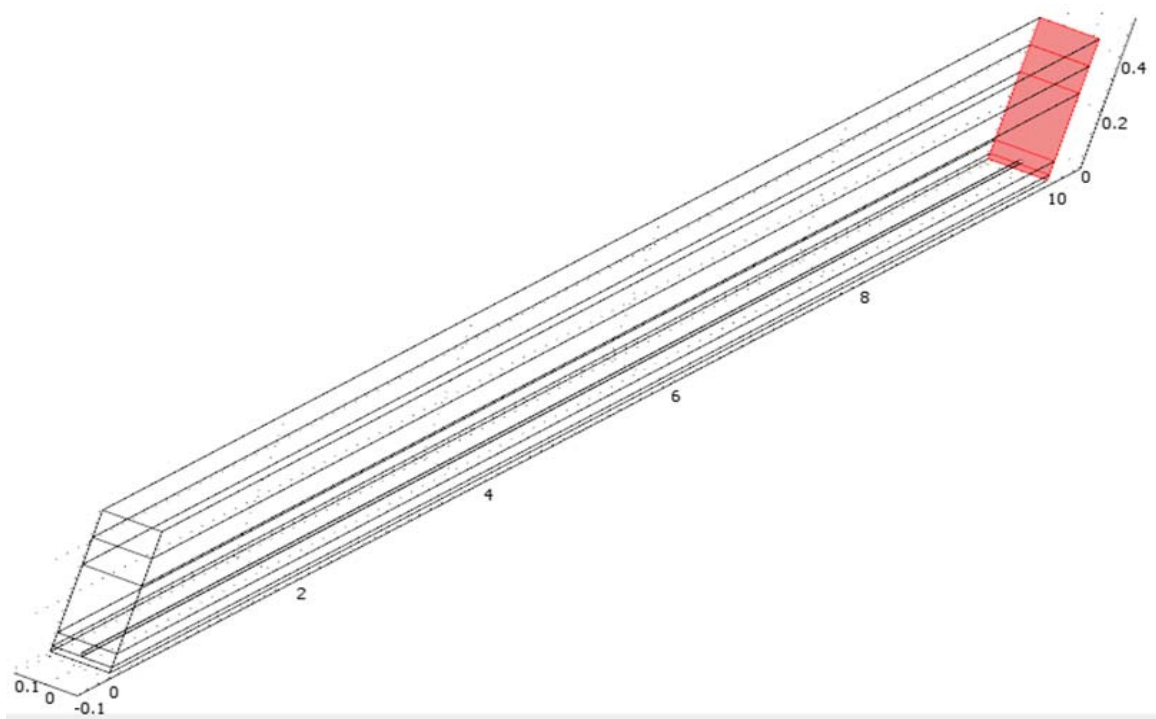
Έπειτα εισάγουμε τις συνοριακές συνθήκες της πίσω πλευράς στην Geom 1.

Πίσω πλευρά: (σύνορα 4, 8, 12, 16, 20)

Θεωρούμε ως οριακή συνθήκη τη γνωστή θερμοκρασία οπότε χρησιμοποιούμε την εντολή Physics > Boundary Settings και επιλέγουμε Temperature με $T_0 = \text{Tempextopp}$.



Σχήμα 7.13. Συνοριακές συνθήκες στην πίσω πλευρά



Σχήμα 7.14. Geom 1 σύνορα 4, 8, 12, 16, 20

Κατόπιν, εισάγουμε όλες τις σταθερές του μοντέλου που ισχύουν για όλες τις γεωμετρίες του μοντέλου χρησιμοποιώντας την εντολή Options > Constants. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις σταθερές στο μοντέλο εμφανίζονται στους παρακάτω πίνακες.

Name	Expression	Value	Description
k_finlayer	1.2 [W/m/K]	1.2[W/	
rho_finlayer	600 [kg/m ³]	600[kg/m	not sure
cp_finlayer	1000 [J/kg/K]	1000[J/	not sure
k_pcm	1 [W/m/K]	1[W/	
rho_pcm	1500 [kg/m ³]	1500[kg/	
k_concr	2.2 [W/m/K]	2.2[W/	
rho_concr	2300 [kg/m ³]	2300[kg/	not sure
cp_concr	1000 [J/kg/K]	1000[J/	not sure
k_ins	0.038 [W/m/K]	0.038	
rho_ins	25 [kg/m ³]	25[kg/m	not sure
cp_ins	1400 [J/kg/K]	1400[J/	not sure
k_floor	1.2 [W/m/K]	1.2[W/	
rho_floor	2000 [kg/m ³]	2000[kg/	not sure
cp_floor	1000 [J/kg/K]	1000[J/	not sure
Ts	22[degC]	295.15[k	

Constants

Name	Expression	Value	Description
rho_brick	1700 [kg/m ³]	1700[kg/	not sure
cp_brick	800 [J/kg/K]	800[J/	not sure
k_infinlayer	k_extfinlayer	1.2[W/	not sure
rho_infinlayer	rho_extfinlayer	600[kg/n	not sure
cp_infinlayer	cp_extfinlayer	1000[J/	not sure
ho	16 [W/m ² /K]	16[W/	
alpha	0.44	0.44	
gww	10 [W/m ² /K]	10[W/	
tau	0.85	0.85	
di	0.15	0.15	
Dpipe	0.015	0.015	
rhof	1000	1000	
cf	4187	4187	
vf	0.5	0.5	
mflow	rhof*vf*pi*Dpipe ² /4	0.088...	

OK Cancel Apply Help

Constants

Name	Expression	Value	Description
mflow	rhof*vf*pi*Dpipe ² /4	0.088...	
Tind1	20 [degC]	293.15[K]	
hf	100[W/m ² /K]	100[W/	
hi	hl	8[W/	
Texternal	20 [degC]	293.15[K]	
k_wood	0.14 [W/m/K]	0.14[W/	
rho_wood	650 [kg/m ³]	650[kg/n	
cp_wood	1200 [J/kg/K]	1200[J/	
rho_air	1.2	1.2	
va	100*3	300	
ca	1012	1012	
Qfenestration	0	0	
Qload	5*100	500	

OK Cancel Apply Help

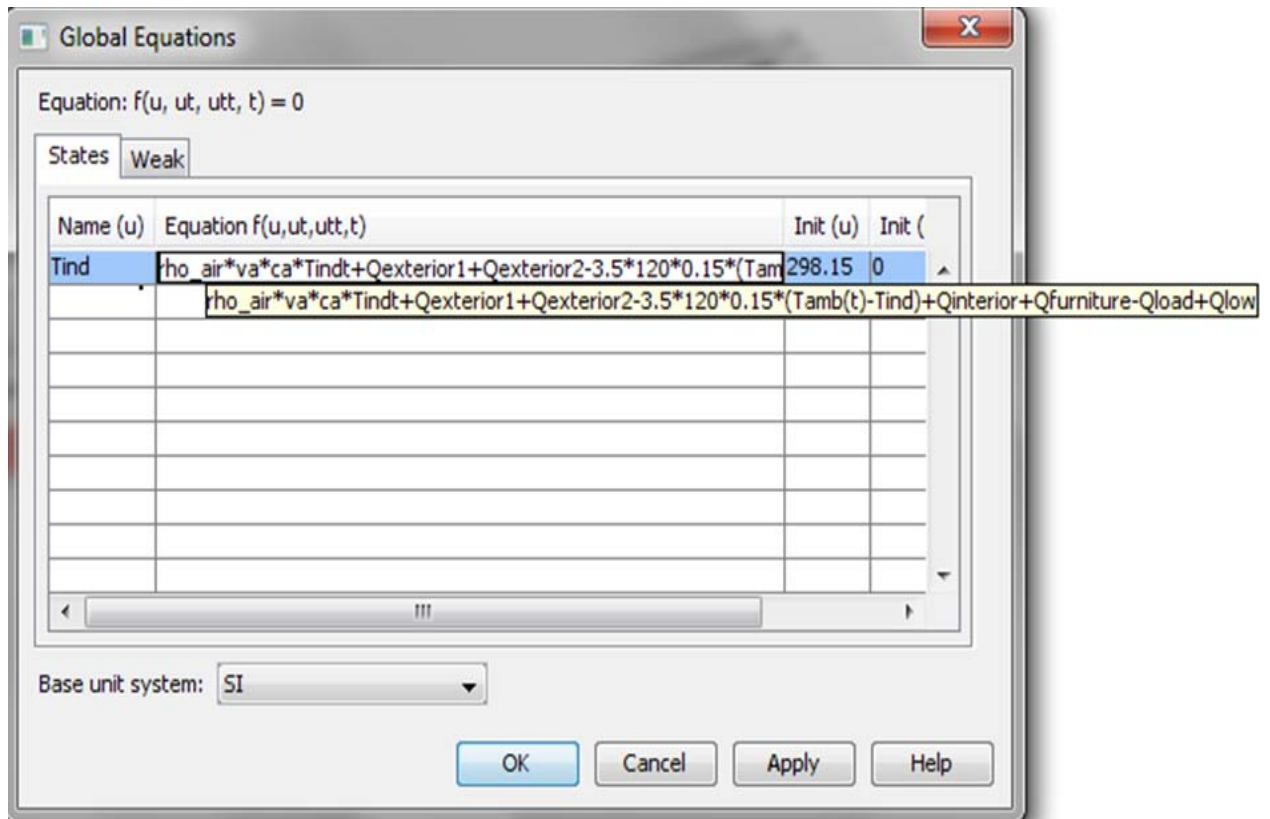
Σχήμα 7.15. Πίνακες σταθερών του μοντέλου

- k: συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- rho: πυκνότητα
- cp: ειδική θερμοχωρητικότητα
- finlayer: σοβάς
- pcm: υλικό αλλαγής φάσης
- concr: τσιμέντο
- ins: μόνωση
- floor: δάπεδο
- Ts: θερμοκρασία συμύκνωσης
- brick: τούβλο
- infinlayer: εσωτερικό φινιρισμένο στρώμα
- ho: συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
- alpha: συντελεστής απορρόφησης για τη στιγμιαία προσπίπτουσα ακτινοβολία
- gmv: παράγοντας μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία
- tau: συντελεστής μετάδοσης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω παραθύρων
- di: μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τον εσωτερικό και οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο
- Dpipe: διάμετρος σωλήνα
- rhof: πυκνότητα ρευστού
- vf: ειδικό όγκος του ρευστού
- mflow: παροχή ρευστού
- Tind: εσωτερική θερμοκρασία
- hf: συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του ρευστού
- Texternal: εξωτερική θερμοκρασία
- wood: ξύλο
- va: όγκος του εσωτερικού αέρα
- Ca: ειδική θερμοχωρητικότητα του εσωτερικού αέρα
- Qfenestration: ροή θερμότητας από τα παράθυρα
- Qload: ροή θερμότητας από ηλεκτρικές συσκευές και λόγω της ανθρώπινης παρουσίας.

Στη συνέχεια εισάγουμε την εξίσωση υπολογισμού της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα χρησιμοποιώντας την εντολή Physics > Global Equations

Η εξίσωση αυτή είναι η ακόλουθη [1]:

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + [Q_1(t + \Delta t) + Q_2(t + \Delta t) - Q_l(t + \Delta t)] / (\rho_a v_a C_a) \quad (7)$$



Σχήμα 7.16. Σχέση υπολογισμού της θερμοκρασίας του αέρα

Παρακάτω φαίνεται η εισαγωγή της σχέσης υπολογισμού της ροής θερμότητας από ηλεκτρικές συσκευές και επίσης λόγω της ανθρώπινης παρουσίας. (Options > Integration Coupling Variables > Boundary Variables). Η σχέση υπολογισμού της ροής θερμότητας είναι η παρακάτω [1]:

$$q_l(t, x, \theta, z) = [h_l (T_{ind} - T) + h_{g,l} (T_{iwalls} - T) + 0 h_{g,l} (T_{floor} - T) + h_{g,l} (T_{furniture} - T)] 50 \quad (8)$$

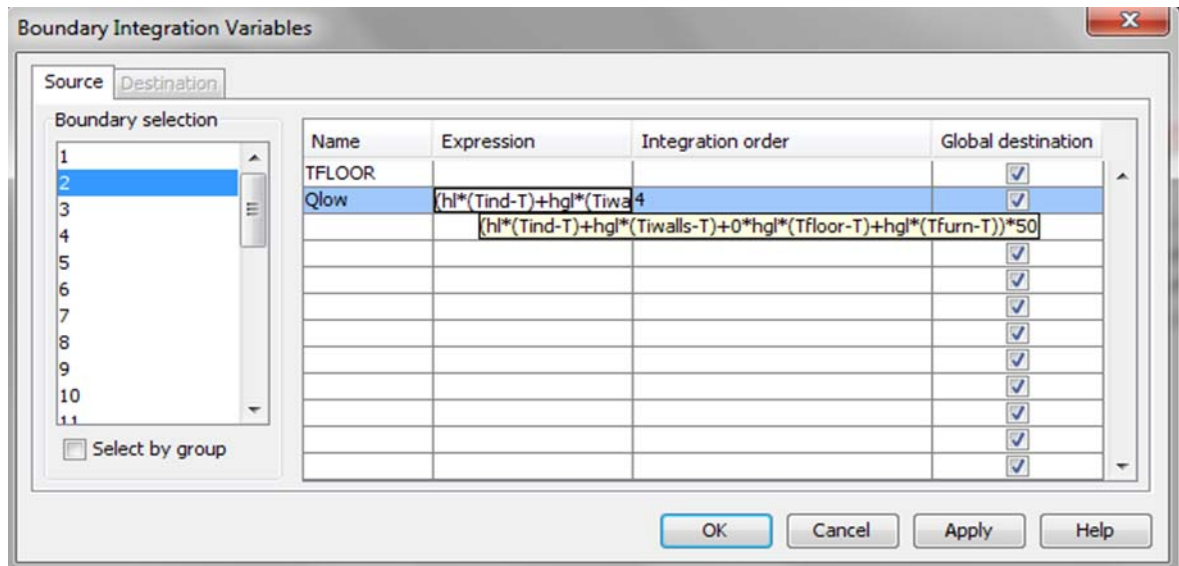
όπου

T_{ind} η θερμοκρασία αέρα

T η θερμοκρασία οροφής (κάτω μέρος του geom 1)

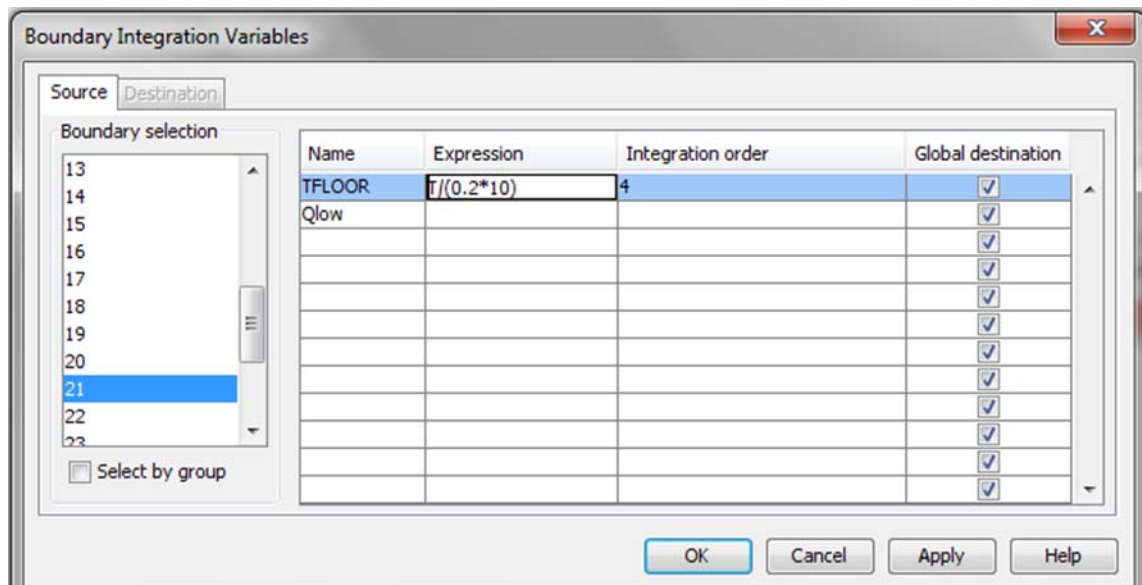
T_{floor} είναι η θερμοκρασία δαπέδου του από πάνω ορόφου

50 είναι ο αριθμός των σωλήνων



Σχήμα 7.17. Σχέση υπολογισμού της ροής θερμότητας Q_{low} στο σύνορο 2

Στη συνέχεια εισάγουμε τη μέση τιμή της θερμοκρασίας στο σύνορο 21 που αντιστοιχεί στην οροφή του δωματίου. (Options > Integration Coupling Variables > Boundary Variables).



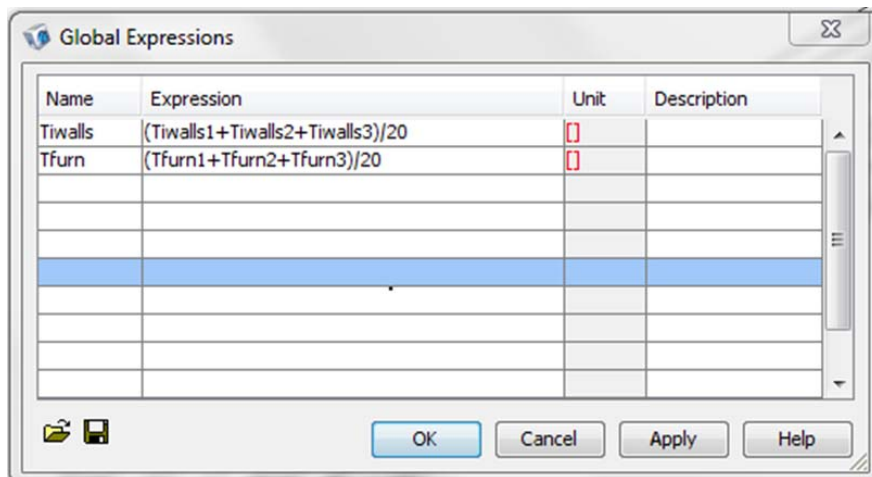
Σχήμα 7.18. T_{FLOOR} είναι η μέση τιμή της θερμοκρασίας στο σύνορο 21 που αντιστοιχεί στην οροφή του δωματίου

Συγκεκριμένα ισχύει:

$$T_{FLOOR} = \int_{21} EXPRESSION dA = \int_{21} \frac{T}{0,2*10} dA = \frac{1}{0,2*10} \int_{21} T dA = \frac{\int_{21} T dA}{\int_{21} dA} \quad (9)$$

όπου είναι και ο ορισμός της μέσης τιμής της θερμοκρασίας στο σύνορο 21.

Παρακάτω εισάγουμε τις σχέσεις υπολογισμού της μέσης τιμής θερμοκρασίας εσωτερικών χώρων και της μέσης τιμής θερμοκρασίας επίπλωσης, χρησιμοποιώντας την εντολή Options > Expressions > Global Expressions.



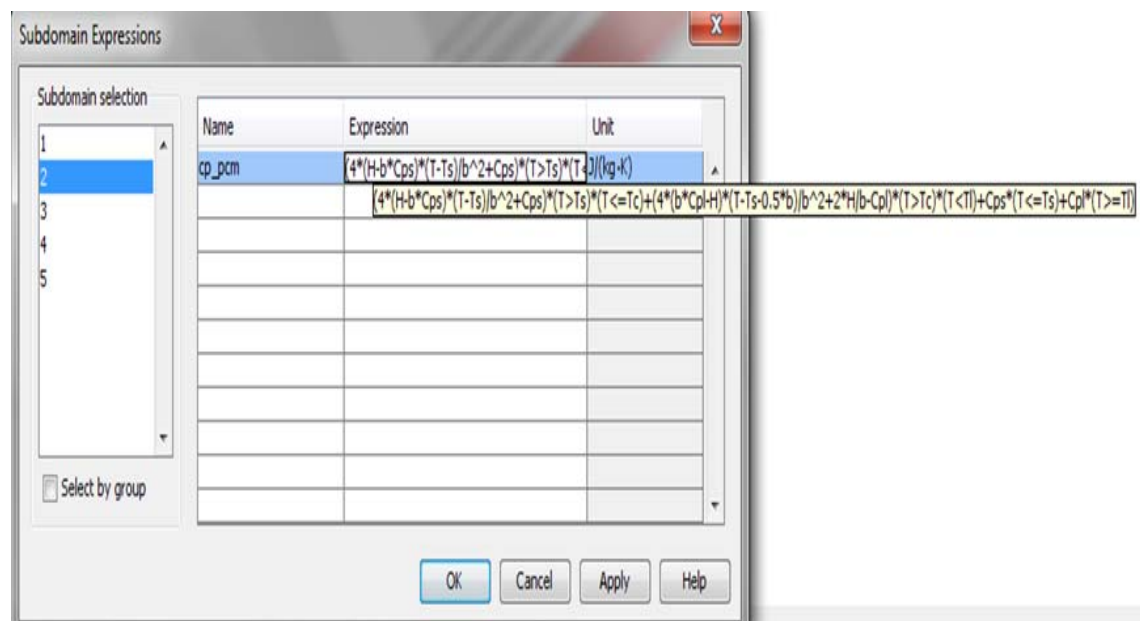
Σχήμα 7.19. Σχέσεις υπολογισμού μέσης τιμής θερμοκρασίας εσωτερικών χώρων και μέσης τιμής θερμοκρασίας επίπλωσης

όπου ο αριθμός 20 είναι το μήκος των εσωτερικών τοίχων και το μήκος της επίπλωσης.

Κατόπιν, εισάγουμε τις σχέσεις υπολογισμού ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση για το υλικό αλλαγής φάσης (Options > Expressions > Subdomain Expressions). Οι σχέσεις αυτές είναι η παρακάτω [1]:

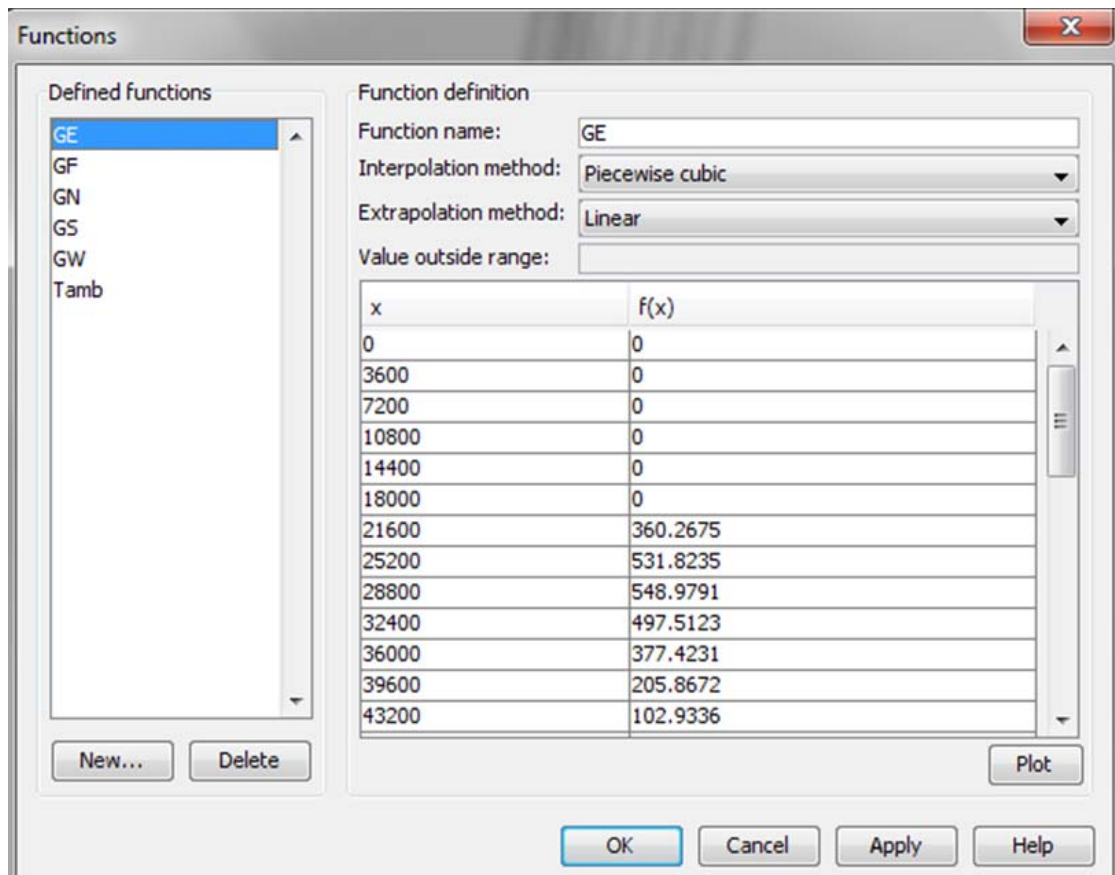
$$C_{p,eff}(T) = 4(H - bC_{ps})(T - T_s) / b^2 + C_{ps} \quad (10)$$

$$C_{p,eff}(T) = 4(bC_{pl} - H)(T - T_s - b/2) / b^2 + 2H/b - C_{pl} \quad (11)$$



Σχήμα 7.20. Σχέση υπολογισμού ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση για το υλικό αλλαγής φάσης

Από τους πίνακες της ASHRAE εισάγουμε τιμές για τις ακτινοβολίες για κάθε προσανατολισμό, καθώς και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, χρησιμοποιώντας την εντολή Options > Functions.



Σχήμα 7.21. Τιμές για τις ακτινοβολίες για κάθε προσανατολισμό, καθώς και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

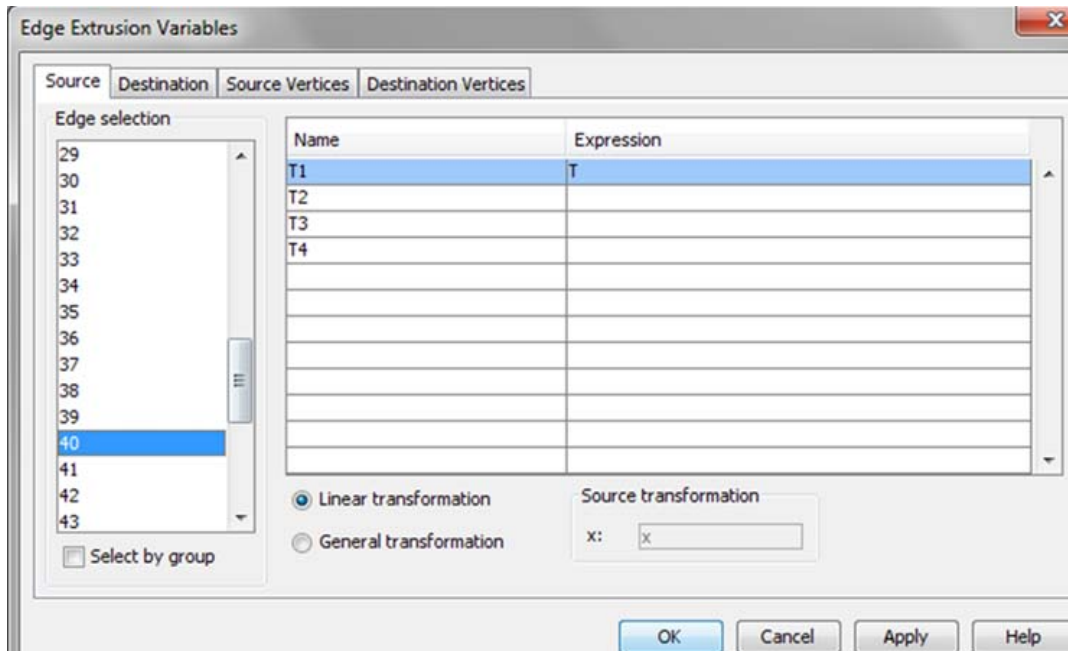
Χρησιμοποιούμε την κυβική παρεμβολή (Piecewise cubic) επειδή έχει μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η γραμμική παρεμβολή (linear) δεν είναι τόσο λεπτομερής και γι' αυτό δεν μας ενδιαφέρει πέρα από το 82800 sec. Το 82800 sec έχει να κάνει με τη χρονική στιγμή της μέρας και πιο συγκεκριμένα με τις ώρες.

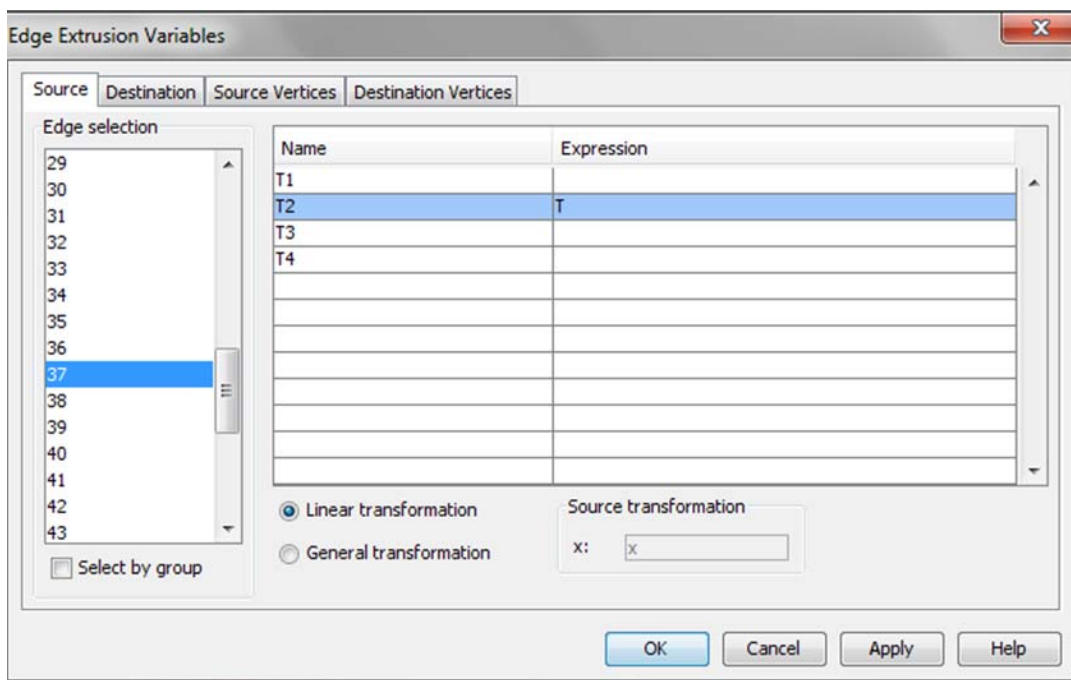
Το $f(x)$ είναι η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Ουσιαστικά βάζουμε το συντελεστή incident solar irradiation για κάθε τοίχο, σε συνάρτηση με τον προσανατολισμό του (GN για North, GS για South κτλ)

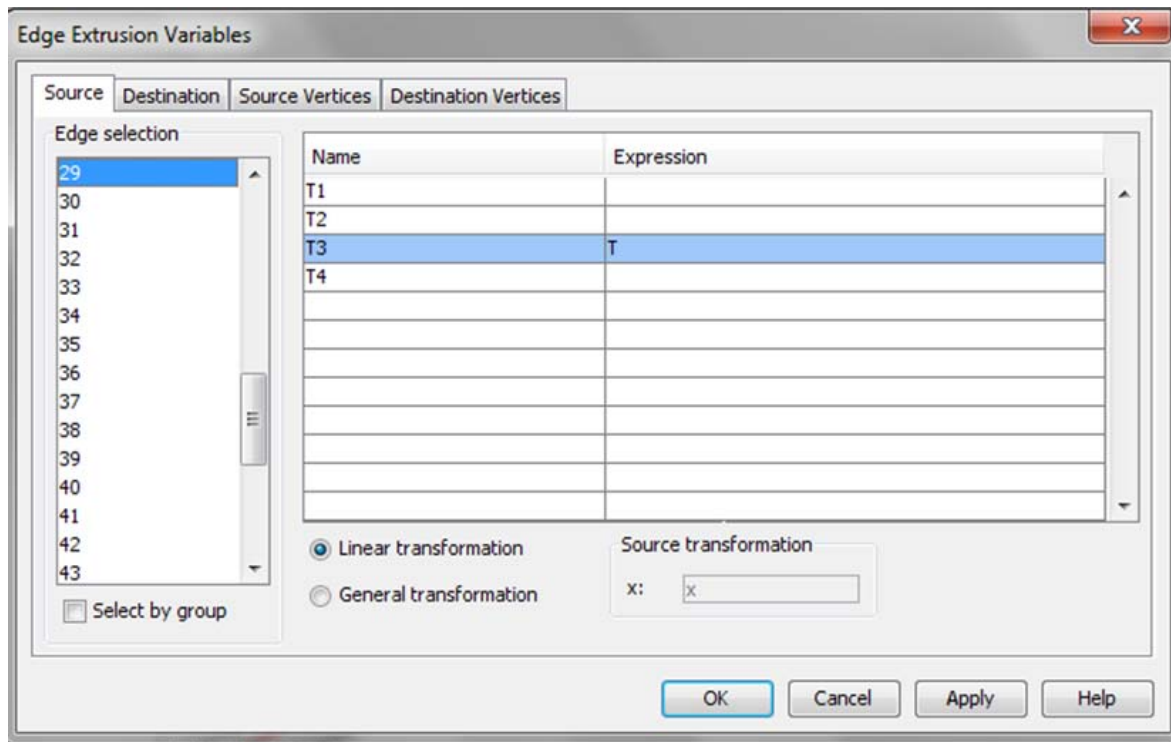
Στη συνέχεια εισάγουμε τιμές θερμοκρασιών σε 4 σημεία του μοντέλου για το υλικό αλλαγής φάσης. Οι ακμές υπάρχουν γιατί προσδιορίζουν το φορτίο της θερμοροής. Οι θερμοκρασίες στις ακμές (T_1 , T_2 , T_3 , T_4) ορίστηκαν έτσι ώστε να πάρουμε τη μέση τιμή τους και να τις χρησιμοποιήσουμε για τη ροή θερμότητας στο νερό. Δηλαδή, η ροή είναι ανάλογη του $h_f \cdot (T_f - (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) / 4)$. (Options > Extrusion Coupling Variables > Edge Variables)



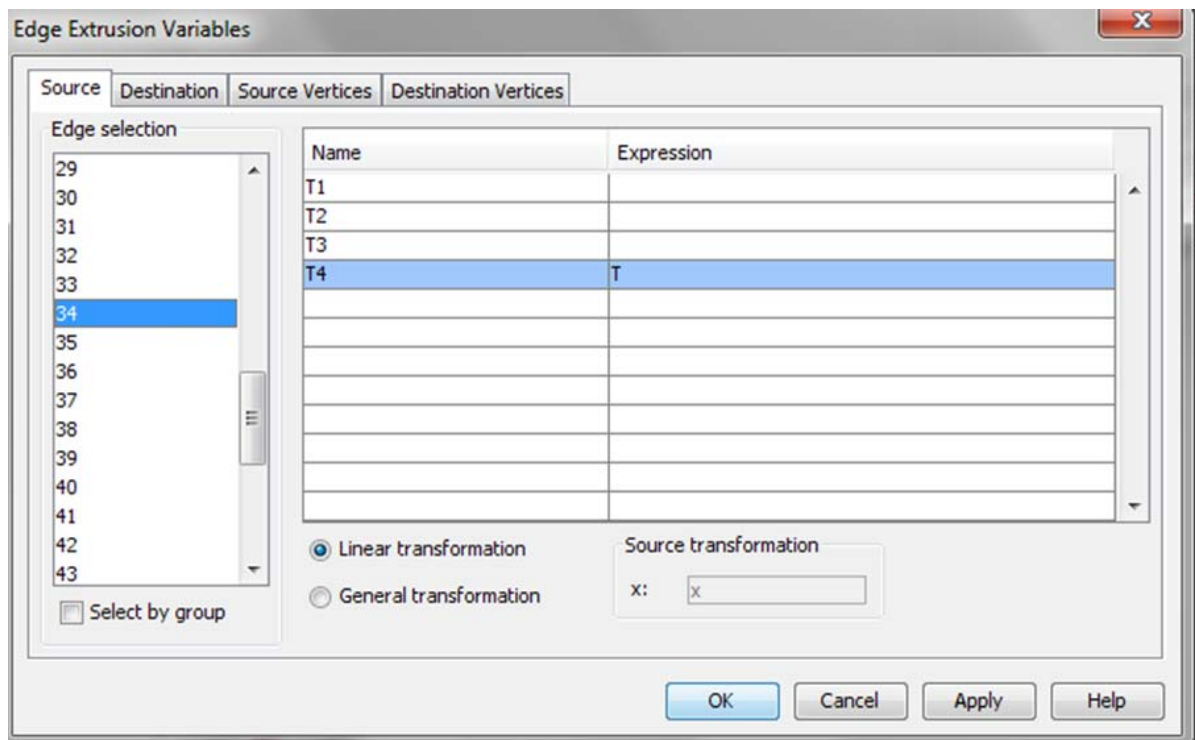
Σχήμα 7.22. Η θερμοκρασία T_1 στην ακμή 40



Σχήμα 7.23. Η θερμοκρασία T_2 στην ακμή 37

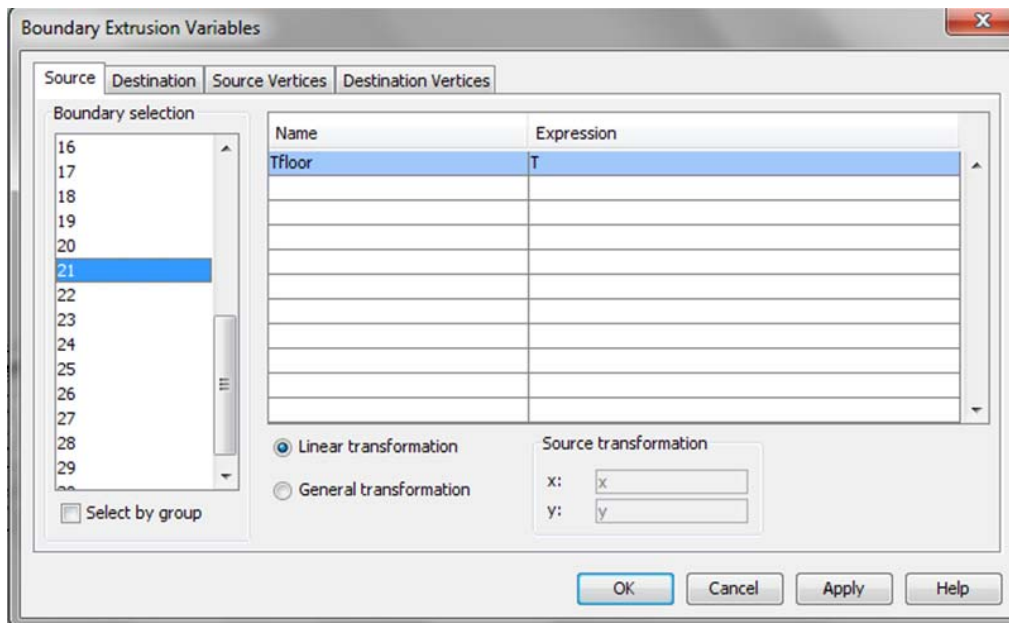


Σχήμα 7.24. Η θερμοκρασία T_3 στην ακμή 29



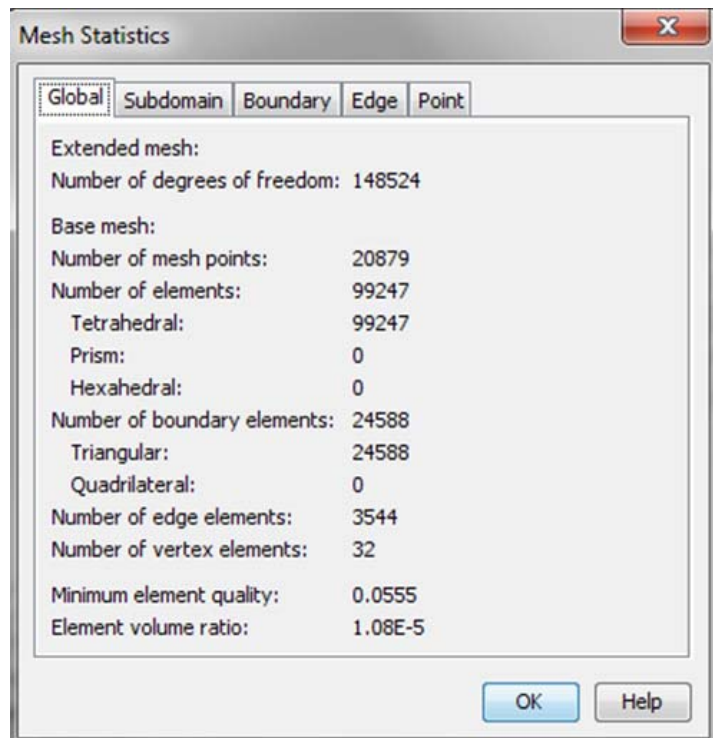
Σχήμα 7.25. Η θερμοκρασία T_4 στην ακμή 34

Μετ' έπειτα, εισάγουμε την T_{floor} , η οποία είναι η θερμοκρασία δαπέδου του από πάνω ορόφου (Options > Extrusion Coupling Variables > Boundary Variables) στο σύνορο 21.



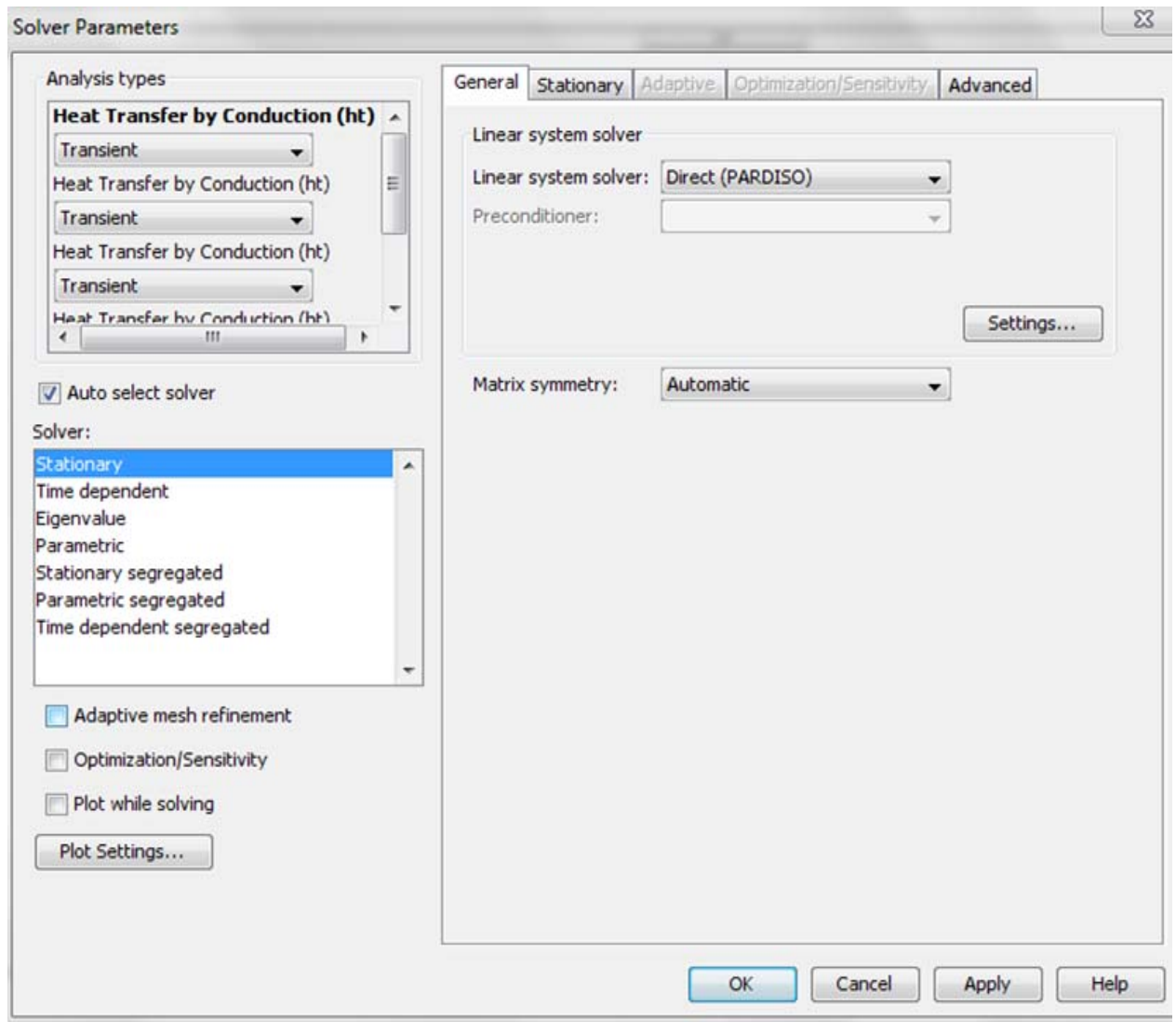
Σχήμα 7.26. Η θερμοκρασία δαπέδου του από πάνω ορόφου T_{floor} στο σύνορο 21

Στο τέλος δημιουργούμε το πλέγμα. Τα χαρακτηριστικά του τελικού πλέγματος της Geom 1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Mesh > Mesh Statistics).



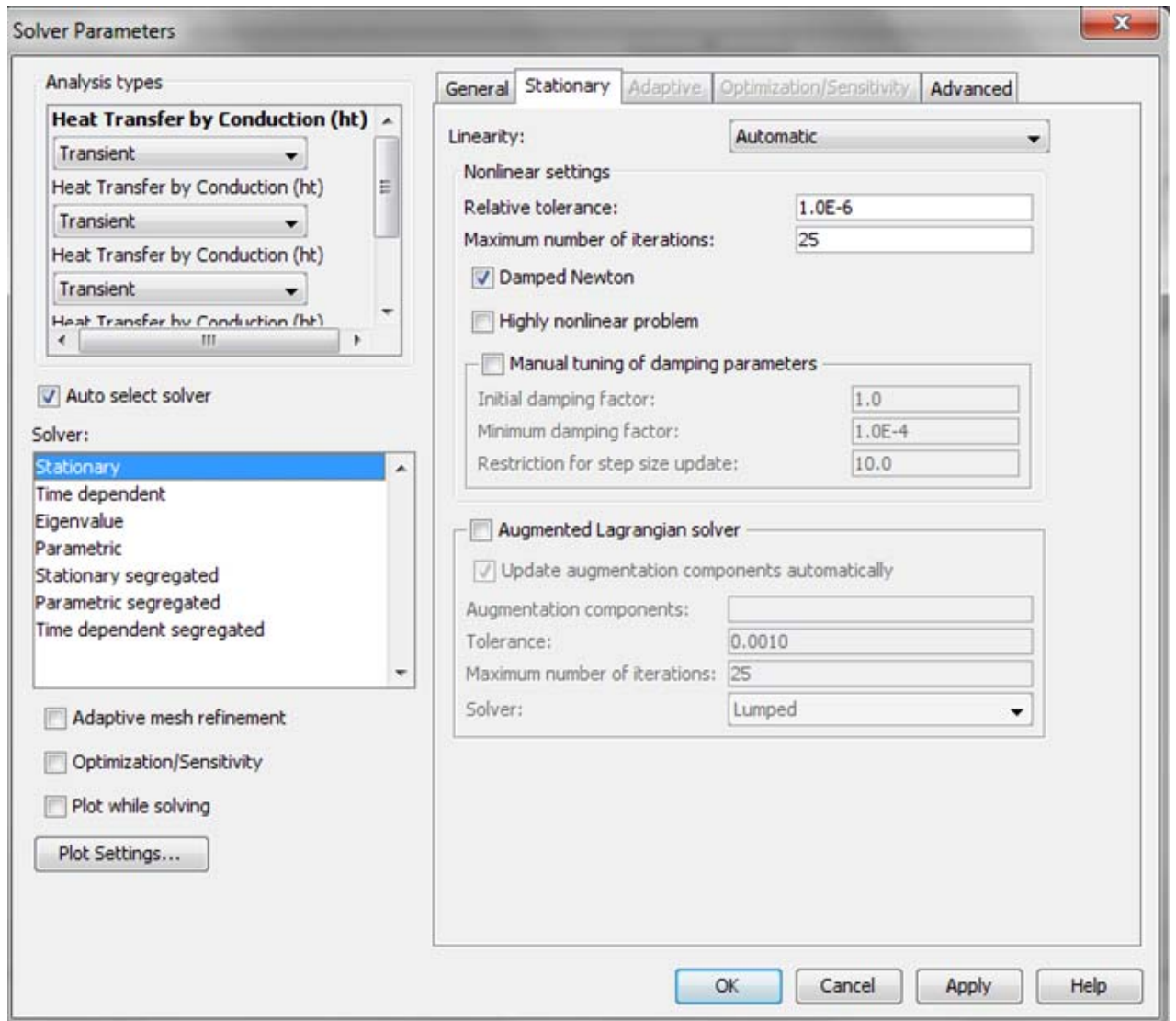
Σχήμα 7.27. Χαρακτηριστικά πλέγματος της Geom1

Παρακάτω φαίνονται τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά για την επίλυση του προβλήματος (Solve > Solver Parameters).



Σχήμα 7.28. Επίλυση προβλήματος

Επιλέγουμε stationary γιατί η θερμοκρασία του νερού δεν είναι χρονικά μεταβαλλόμενη.



Σχήμα 7.29. Χαρακτηριστικά επίλυσης προβλήματος

Όπου το μέγιστο σφάλμα υπολογισμού είναι 10^{-6} και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων είναι 25.

Στο αρχικό παράθυρο του COMSOL επιλέγουμε τη διάσταση του προβλήματος και το φαινόμενο που θα επιλύσουμε, δηλ για τη Geom 2 η γεωμετρία είναι μονοδιάστατη (1D) και το πρόβλημα που μελετάμε είναι η μετάδοση θερμότητας στον εξωτερικό βόρειο τοίχο με αγωγή και η κατανομή των θερμοκρασιών και στις δύο επιφάνειες του τοίχου.

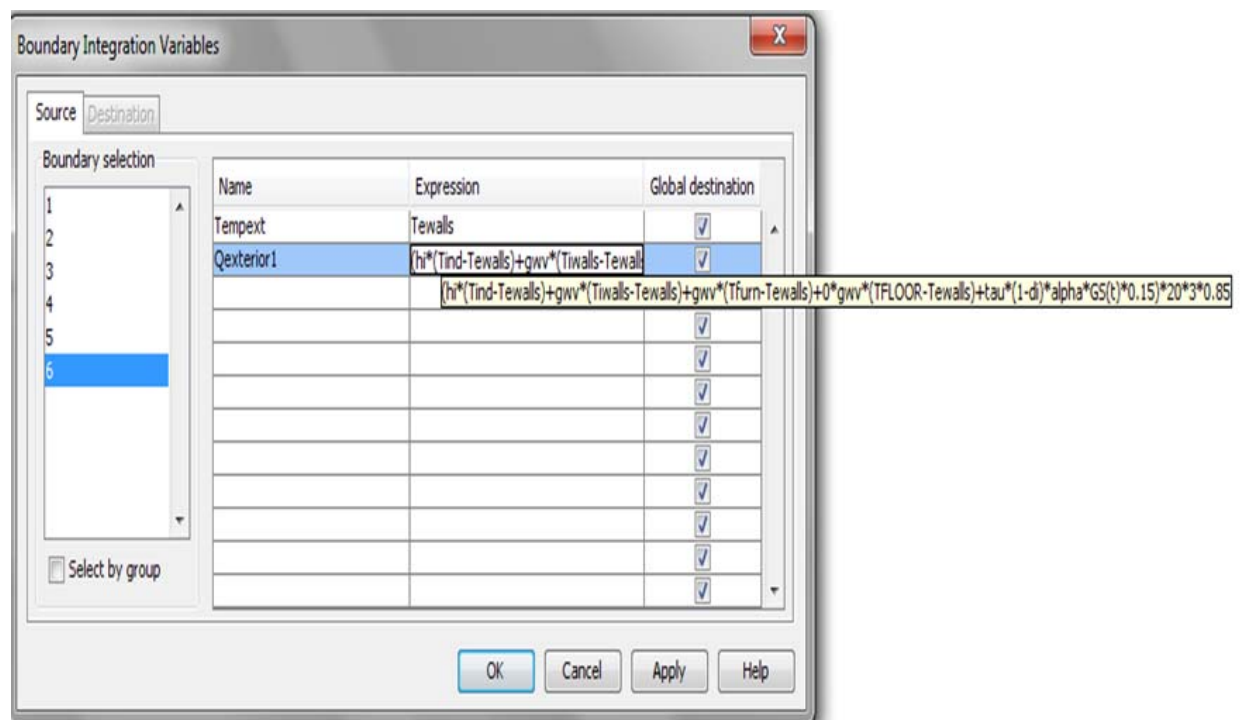
Geom 2 : Εξωτερικοί τοίχοι – Βόρειος τοίχος

Σχήμα 7.30. Γεωμετρία των εξωτερικών τοίχων – Βόρειου τοίχου

Αρχικά εισάγουμε τις σχέσεις για τη ροή θερμότητας της εξωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου T_{empext} και $Q_{exterior1}$ στο σύνορο 6 (Options > Integration Coupling Variables > Boundary Variables). Οι σχέσεις αυτές είναι οι παρακάτω[1]:

$$q_{i,w}(t) = h_i [T_{wJ}(t, x) - T_i(t)] + \sum_{v} g_{w,v} [T_{wJ}(t, x) - T_v(t)] + R(t) \quad (12)$$

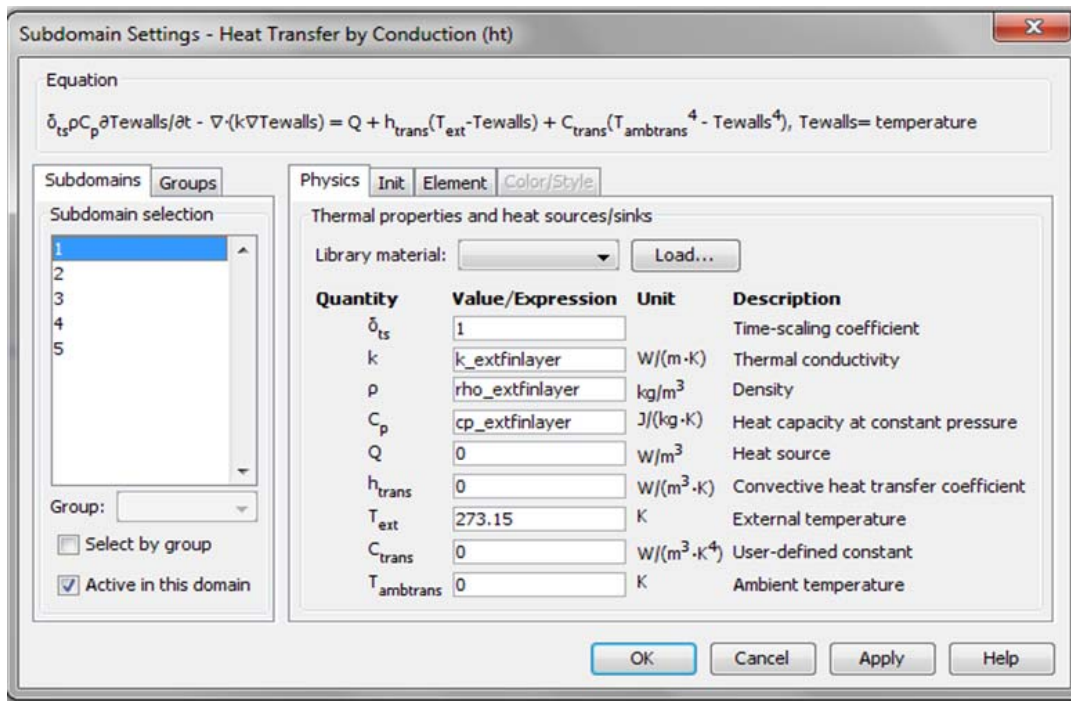
$$R(t) = \tau (1 - d)\alpha G_T(t) F_f / F_w \quad (13)$$



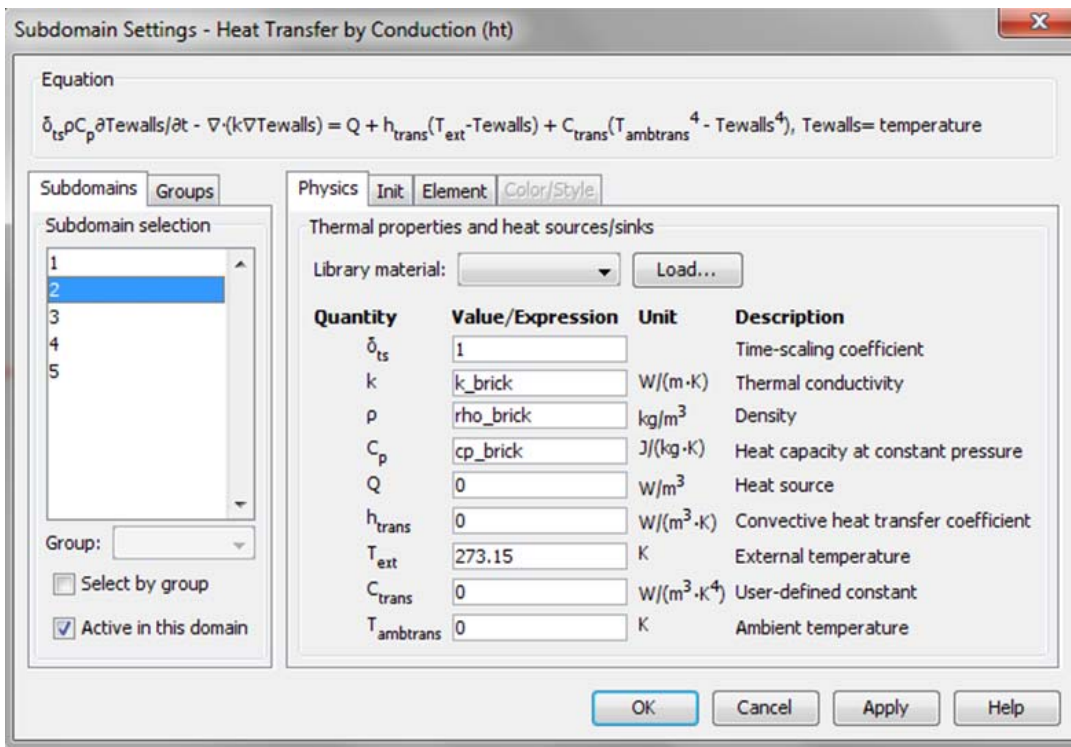
Σχήμα 7.31. Η ροή θερμότητας της εξωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου

Όπου το μήκος των εσωτερικών τοίχων είναι 20 m, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τον εσωτερικό τοίχο και οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο (d_i) είναι 0,15, το ύψος είναι 3 m και ο συντελεστής μετάδοσης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω παραθύρων (τ) είναι 0,85.

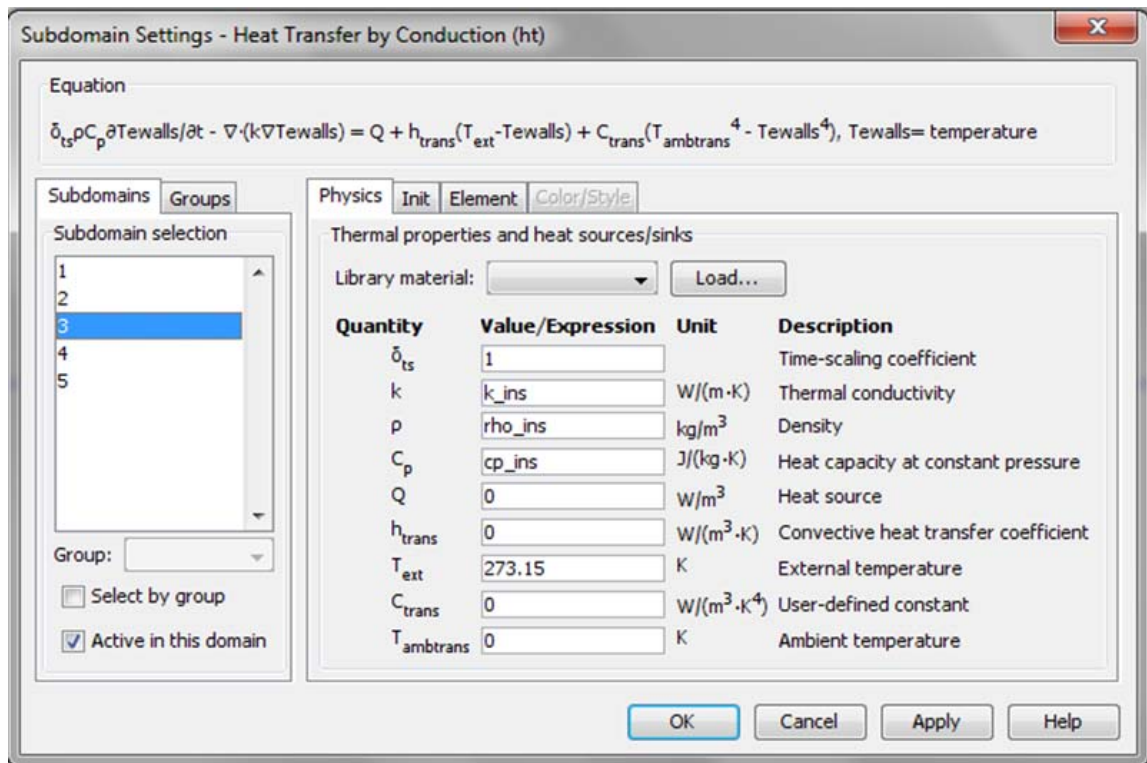
Στη συνέχεια εισάγουμε τη θερμική αγωγιμότητα k , την πυκνότητα ρ και την ειδική θερμοχωρητικότητα C_p του κάθε στρώματος. Το στρώμα 1 είναι το εξωτερικό στρώμα του εξωτερικού τοίχου, το στρώμα 2 και το στρώμα 4 είναι από τούβλο, το στρώμα 3 είναι η μόνωση του τοίχου, ενώ το στρώμα 5 είναι το εσωτερικό στρώμα του εξωτερικού τοίχου. (Physics > Subdomain Settings).



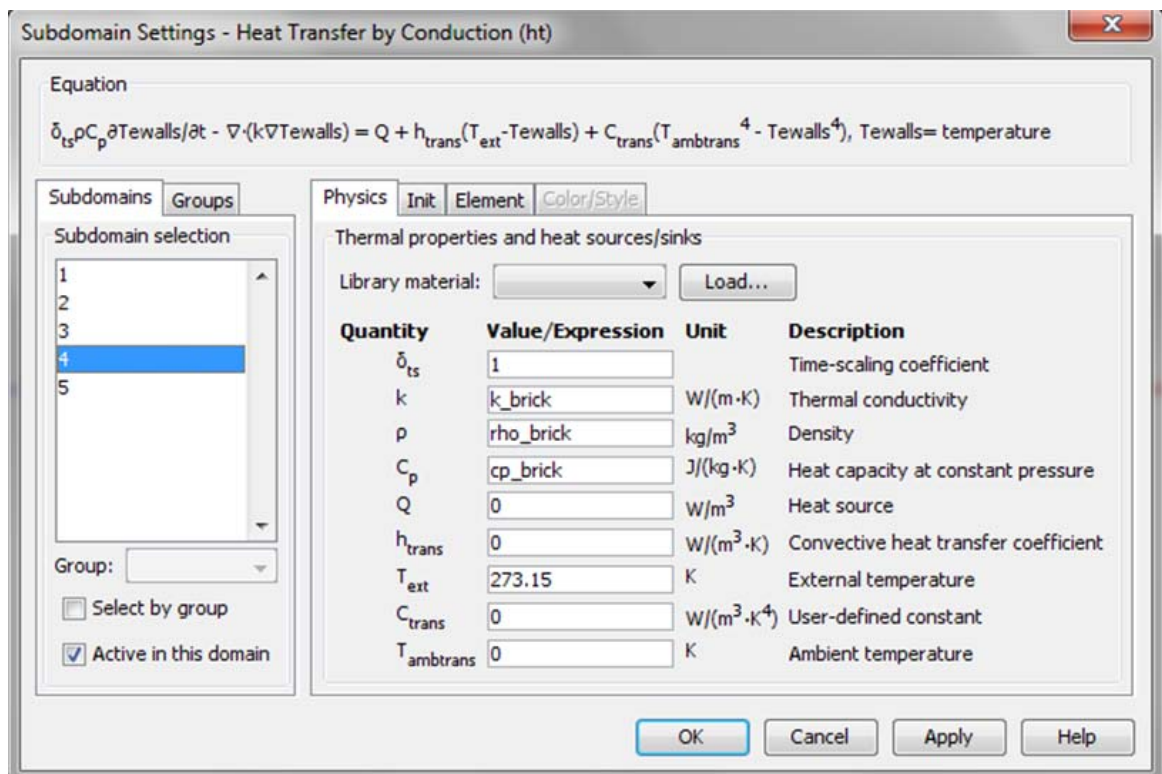
Σχήμα 7.32. Οι ιδιότητες (k , ρ , C_p) του στρώματος 1



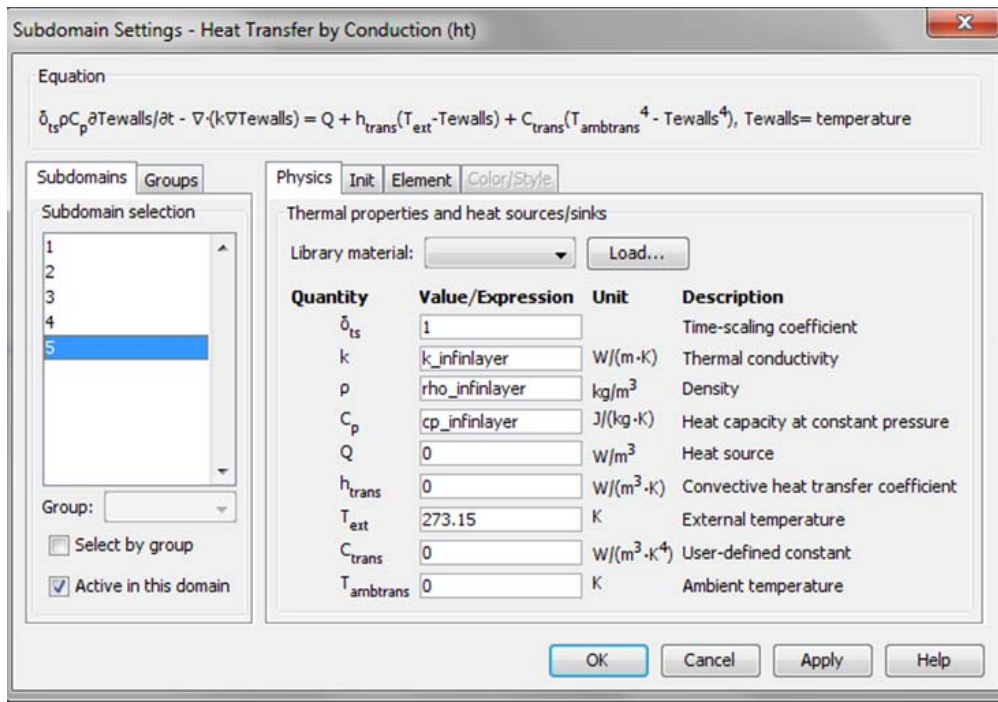
Σχήμα 7.33. Οι ιδιότητες (k , ρ , C_p) του στρώματος 2



Σχήμα 7.34. Οι ιδιότητες (k , ρ , C_p) του στρώματος 3



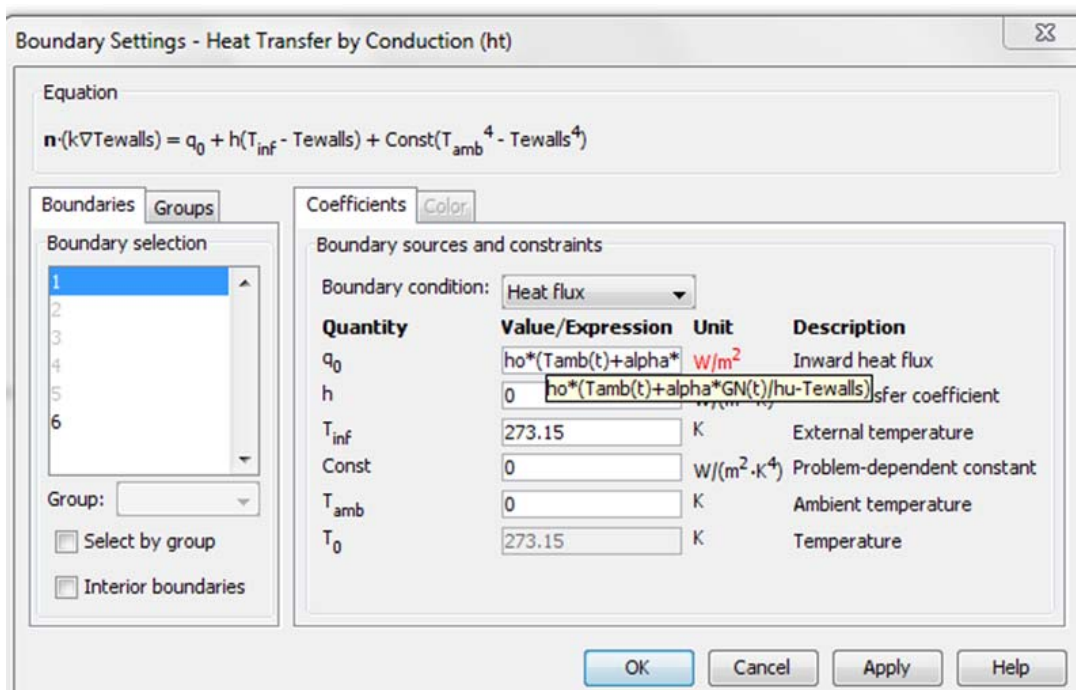
Σχήμα 7.35. Οι ιδιότητες (k , ρ , C_p) του στρώματος 4



Σχήμα 7.36. Οι ιδιότητες (k , ρ , C_p) του στρώματος 5

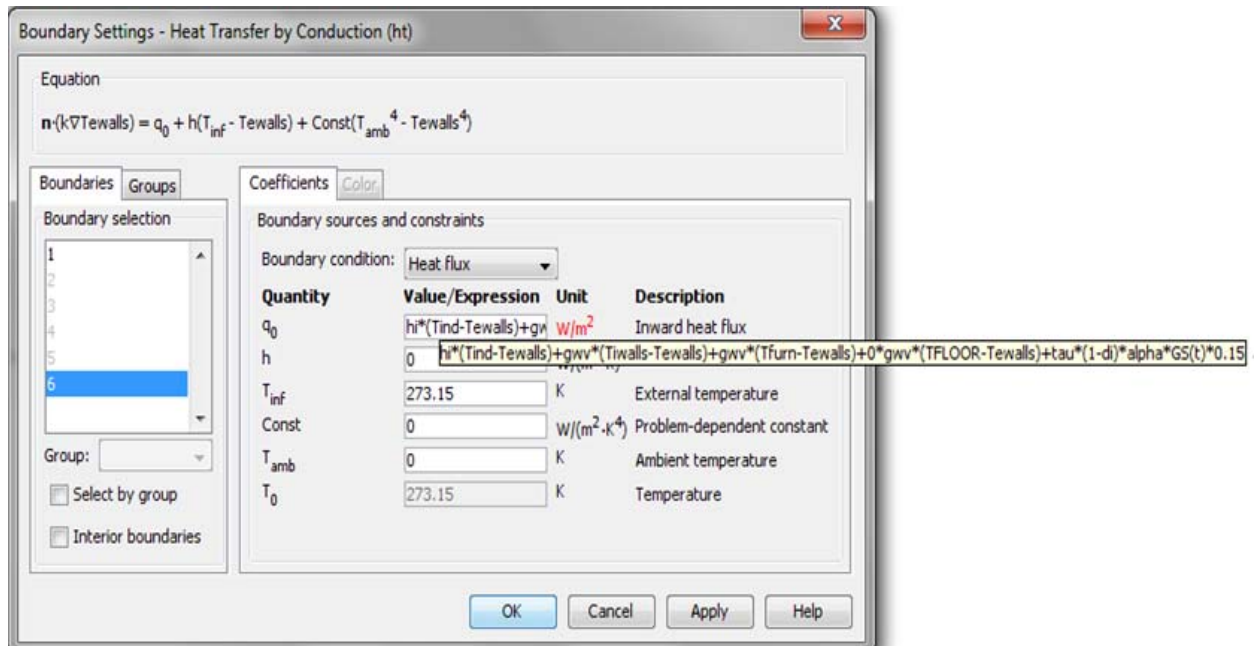
Έπειτα, εισάγουμε την ισοδύναμη εξωτερική θερμοκρασία στο σύνορο 1 χρησιμοποιώντας την εντολή Physics > Boundary Settings. Η σχέση για τον υπολογισμό της είναι η σχέση (3), η οποία είναι η παρακάτω:

$$T_o(t) = T_{amb}(t) + \alpha G(t) / h_u - E$$



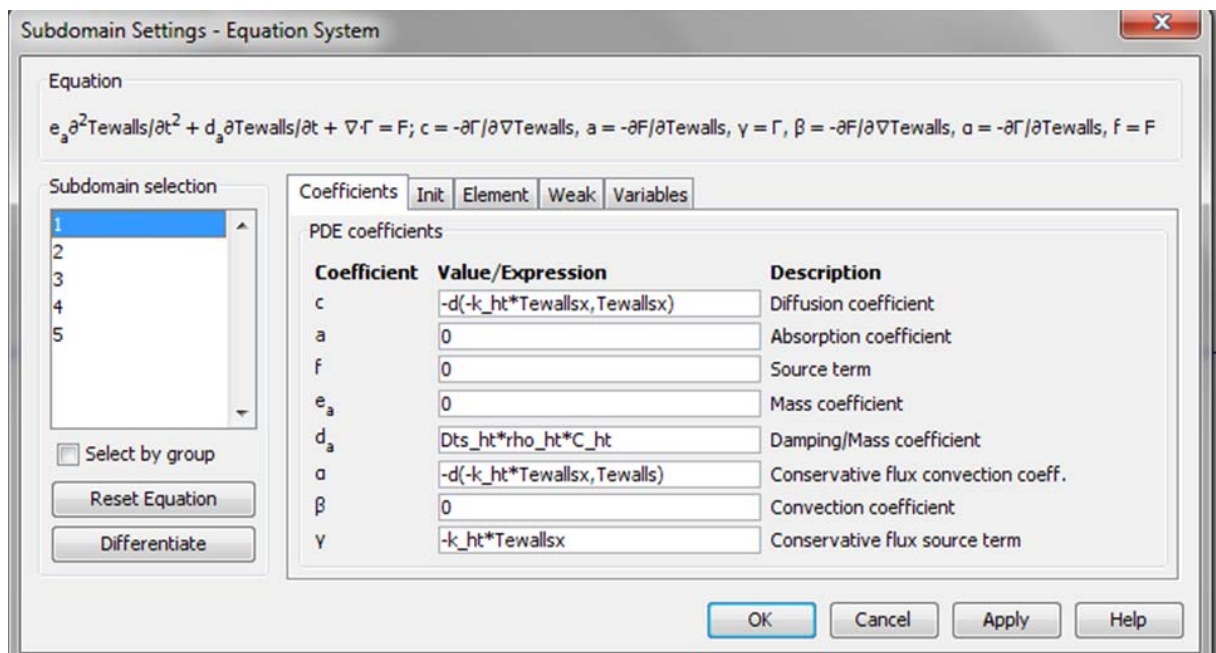
Σχήμα 7.37. Ισοδύναμη εξωτερική θερμοκρασία

Κατόπιν, εισάγουμε τις σχέσεις για τη ροή θερμότητας της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου στο σύνορο 6 που όπως ισχύει και για τη ροή θερμότητας της εξωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου είναι οι σχέσεις (12) και (13).



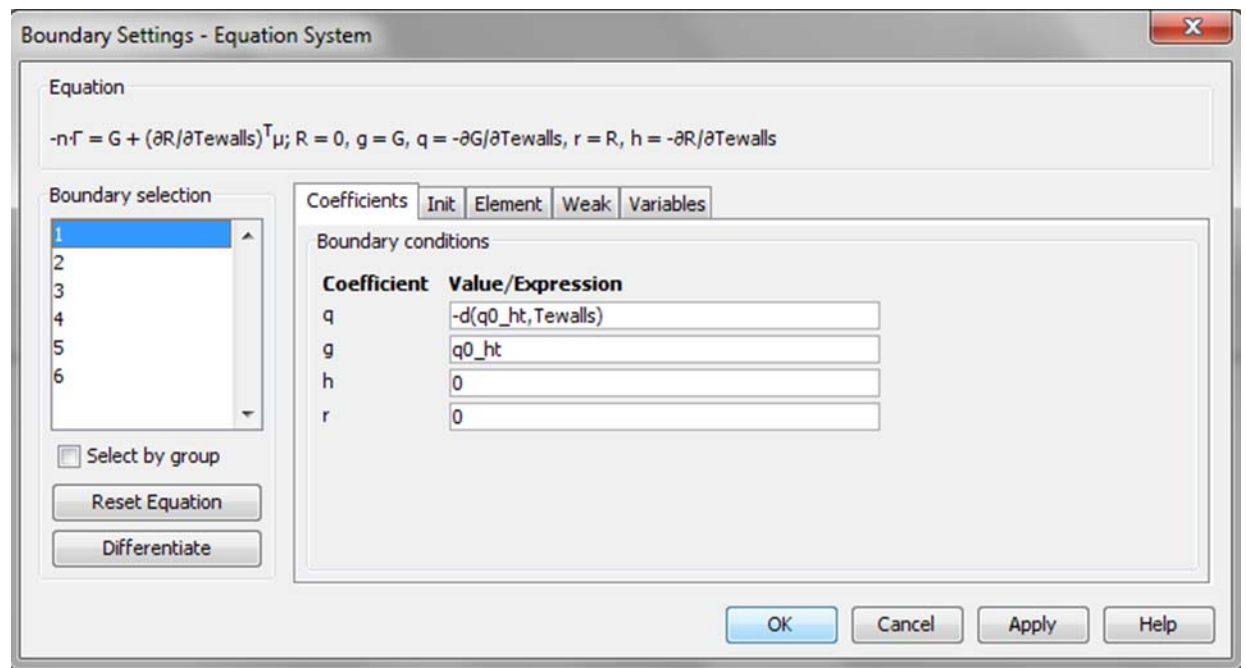
Σχήμα 7.38. Η ροή θερμότητας της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου

Εν συνεχεία εισάγουμε τις αντίστοιχες εκφράσεις για όλους τους συντελεστές που εμφανίζονται στην εξίσωση που θα επιλυθεί στα σημεία 1,2,3,4,5 (Physics > Equation System > Subdomain Settings).



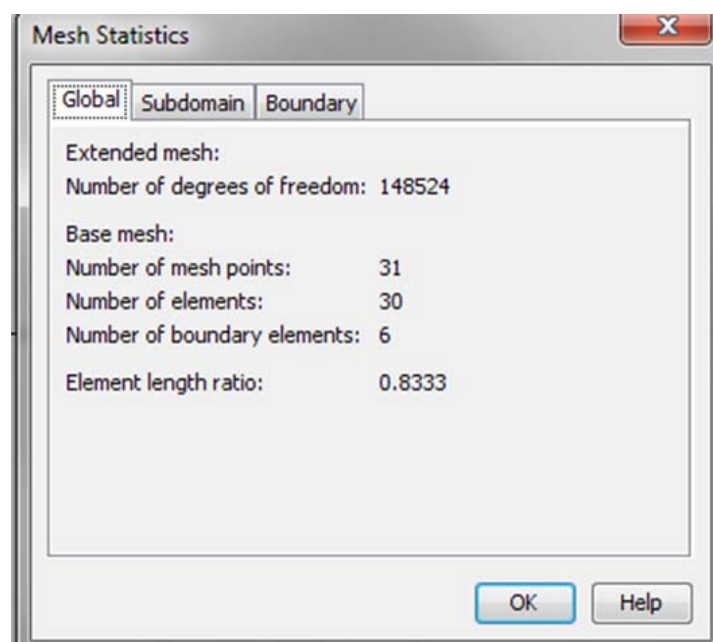
Σχήμα 7.39. Εκφράσεις των συντελεστών της εξίσωσης

Στη συνέχεια εισάγουμε τις συνοριακές συνθήκες για τα σύνορα 1 και 6, όπου το σύνορο 1 είναι η εξωτερική επιφάνεια και το σύνορο 6 είναι η εσωτερική επιφάνεια, ενώ σ' όλα τα άλλα είναι μηδέν (Physics > Equation System > Boundary Settings).



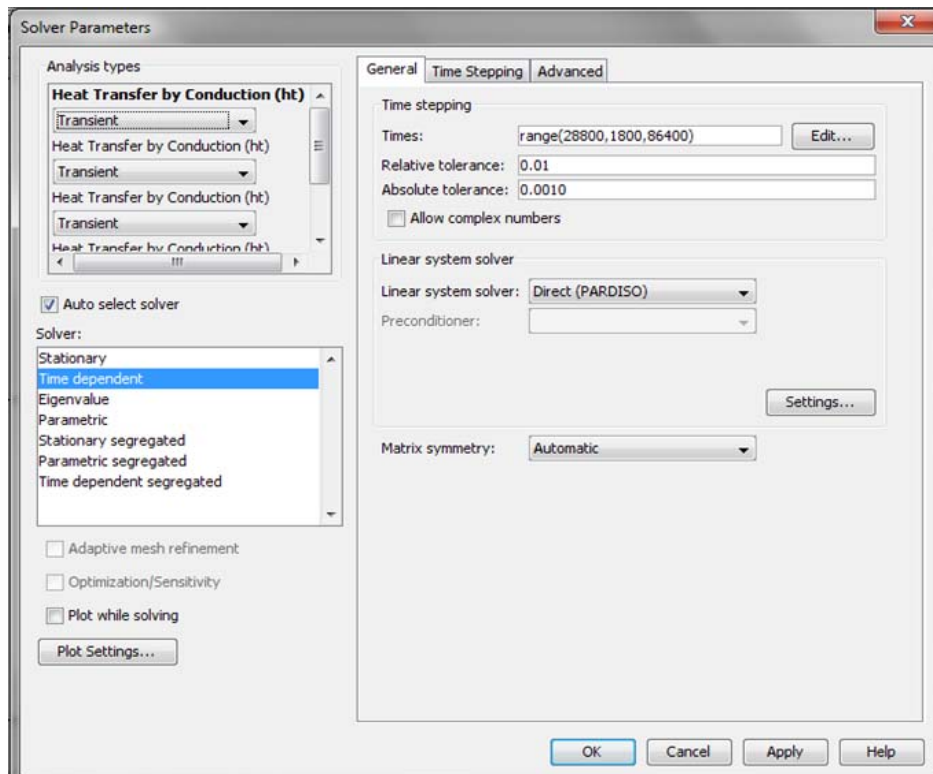
Σχήμα 7.40. Συνοριακές συνθήκες για τα σύνορα 1 και 6

Τελικά δημιουργούμε το πλέγμα. Τα χαρακτηριστικά του τελικού πλέγματος της Geom 2 δίνονται στο παρακάτω πίνακα (Mesh > Mesh Statistics).

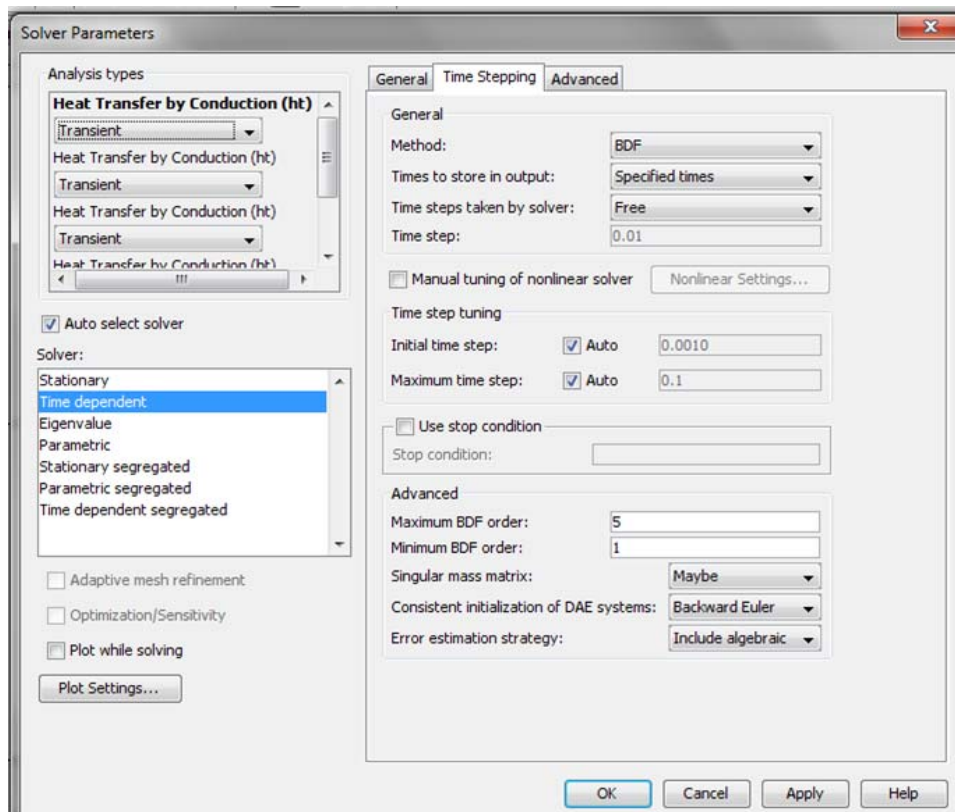


Σχήμα 7.41. Χαρακτηριστικά πλέγματος της Geom 2

Παρακάτω φαίνονται τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά για την επίλυση του προβλήματος, το οποίο εξαρτάται από το χρόνο (Solve > Solver Parameters).



Σχήμα 7.42. Χαρακτηριστικά επίλυσης του προβλήματος



Σχήμα 7.43. Παράμετροι επίλυσης του προβλήματος

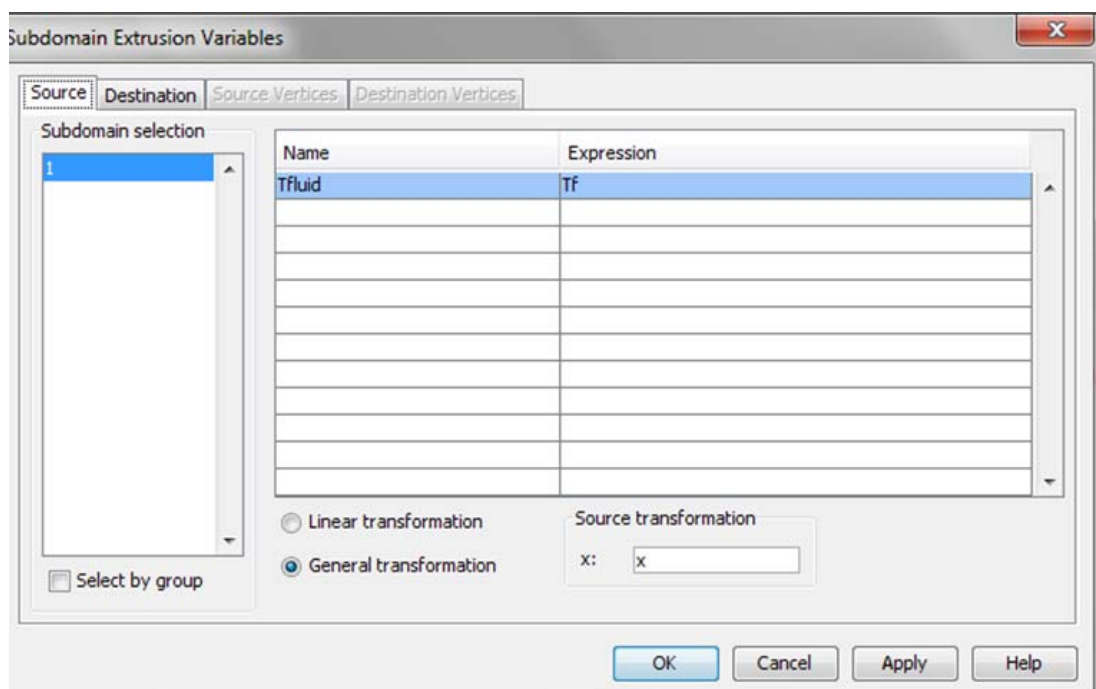
Στο αρχικό παράθυρο του COMSOL επιλέγουμε τη διάσταση του προβλήματος και το φαινόμενο που θα επιλύσουμε, δηλ για τη Geom 3 η γεωμετρία είναι μονοδιάστατη (1D) και το πρόβλημα που μελετάμε είναι η μετάδοση θερμότητας στο ρευστό ψύξης μέσω αγωγής και καθορίζεται η κατανομή θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία T_f καθορίζεται βάσει των θερμικών φορτίων που δέχεται η οροφή και εκφράζει τη θερμοκρασία που πρέπει να έχει το ρευστό ψύξης, ώστε να στερεοποιήσει το υλικό αλλαγής φάσης. Η κατανομή της θερμοκρασίας του ρευστού προκύπτει από την ανταλλαγή θερμικών φορτίων με το P.C.M. που περιβάλλει το σωλήνα.

Στη διφασική περιοχή το ρευστό εισέρχεται με T_s 22°C και εξέρχεται με T_1 26°C. Η διφασική περιοχή εισάγεται μόνο στον τρόπο ορισμού της θερμοχωρητικότητας του P.C.M., δηλαδή το `cp_pcm`. Ακολουθούμε τις οδηγίες ορισμού που δίνουν την τριγωνική μορφή του `cp` [1] Fig.2 (b) και τις εξισώσεις (10) και (11). Όλα τα παραπάνω τα έχουμε ορίσει στο Geom 1 [(Options > Expressions > Subdomain expressions και Subdomain selection επιλέγοντας το 2].

Geom 3: Ρευστό ψύξης

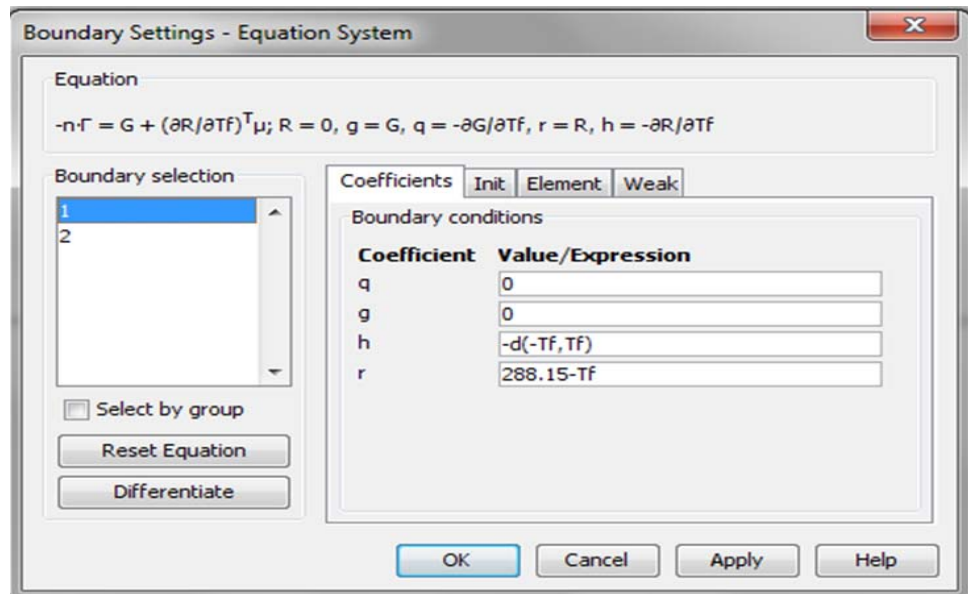
Σχήμα 7.44. Απεικόνιση της Geom 3

Αρχικά εισάγουμε τη θερμοκρασία του ρευστού ψύξης που ρέει στο σωλήνα (Options > Extrusion Coupling Variables > Subdomain Variables).



Σχήμα 7.45. Θερμοκρασία του ρευστού ψύξης που ρέει στο σωλήνα

Μετ' έπειτα εισάγουμε τις συνοριακές συνθήκες για τη θερμοκρασία του σωλήνα, την οποία εξετάζουμε στην περιφέρειά του, με το r να είναι η ακτίνα του σωλήνα. Το νερό εισέρχεται με θερμοκρασία 15°C (Physics > Equation System > Boundary Settings).



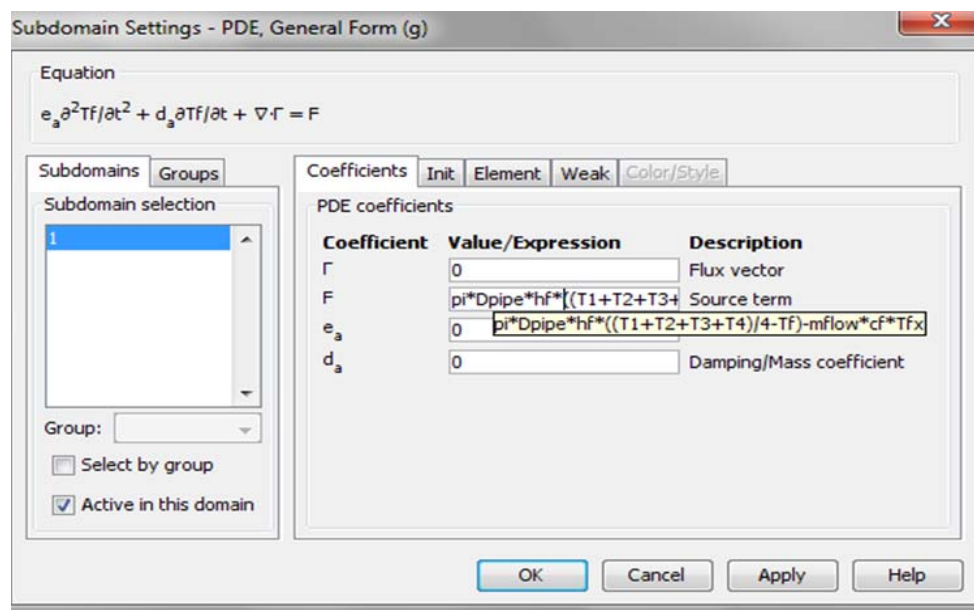
Σχήμα 7.46. Θερμοκρασία του σωλήνα ακτινικά

Η διακύμανση της θερμοκρασίας κατά μήκος του σωλήνα είναι μηδέν ($F = 0$), εξισώνοντας τις παρακάτω σχέσεις [1].

$$m^* C_f \partial T_f(t, z) / \partial z = q(t, z) \quad (14)$$

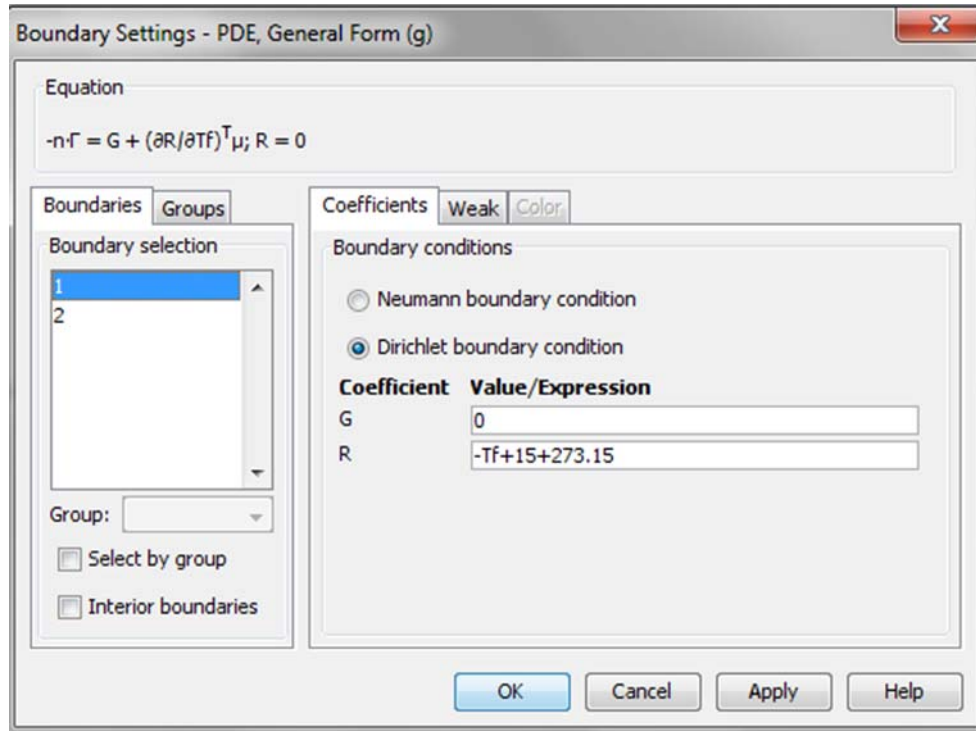
$$q(t + \Delta t, z) = \pi D h_f [T_t(t + \Delta t, z) - T_f(t, z)] \quad (15)$$

Οι σχέσεις αυτές δείχνουν τη θερμοκρασία κατά την κατεύθυνση της ροής και το ίδιο για μια χρονική στιγμή μετά αντίστοιχα (Physics > Subdomain Settings).

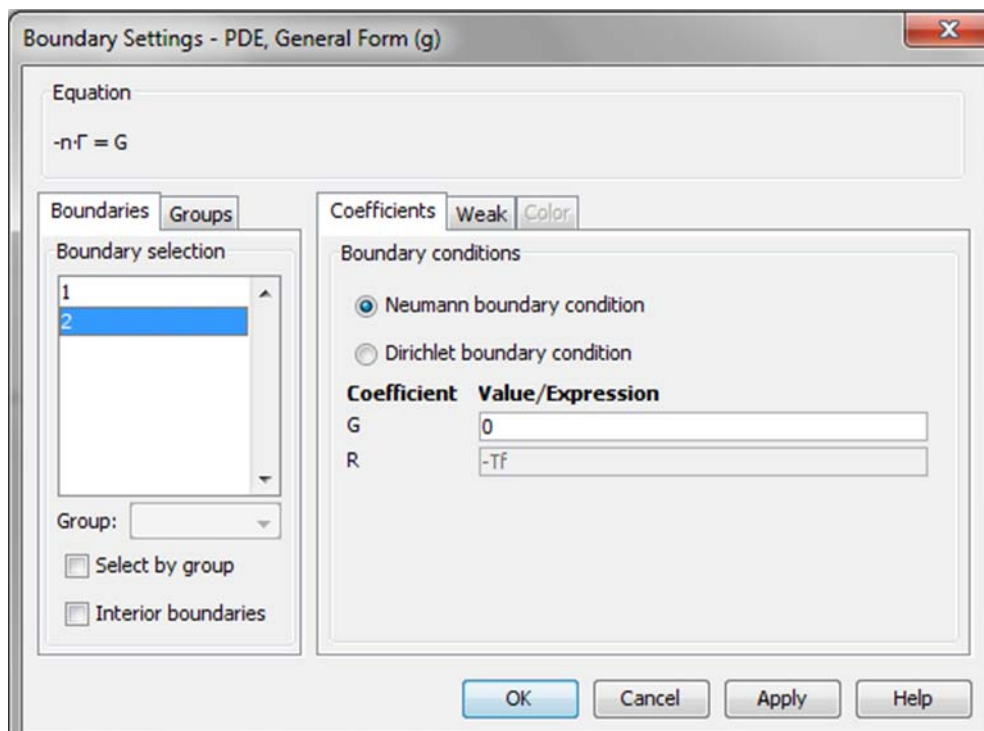


Σχήμα 7.47. Η διακύμανση της θερμοκρασίας κατά μήκος του σωλήνα είναι μηδέν

Στη συνέχεια εισάγουμε τις συνοριακές συνθήκες στην είσοδο και στην έξοδο του σωλήνα. Στην είσοδο εφαρμόζουμε οριακές συνθήκες dirichlet , $R=0 > T_f= 15 + 273,15$ και αντίστοιχα στην έξοδο οριακές συνθήκες Neumann (Physics > Boundary Settings).

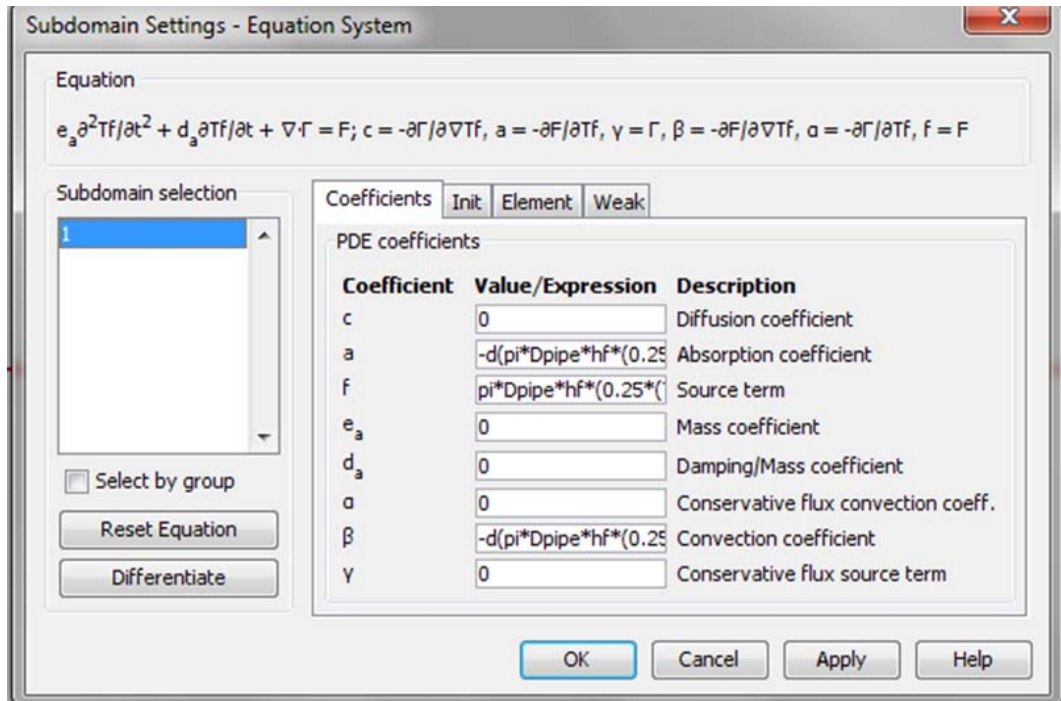


Σχήμα 7.48. Στην είσοδο οριακές συνθήκες dirichlet , $R=0 > T_f= 15 + 273,15$



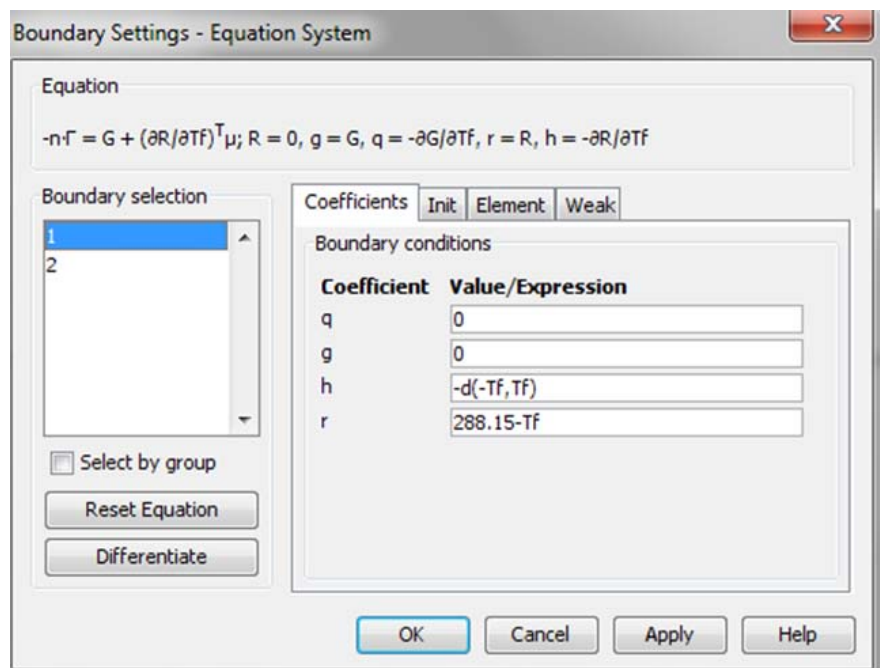
Σχήμα 7.49. Στην έξοδο οριακές συνθήκες Neumann

Παρακάτω εισάγουμε τις αντίστοιχες εκφράσεις για όλους τους συντελεστές που εμφανίζονται στην εξίσωση που θα επιλυθεί στο σημείο 1 γιατί θεωρούμε ομοιόμορφη την κατανομή θερμοκρασίας του ρευστού ψύξης (Physics > Equation System > Subdomain Settings).



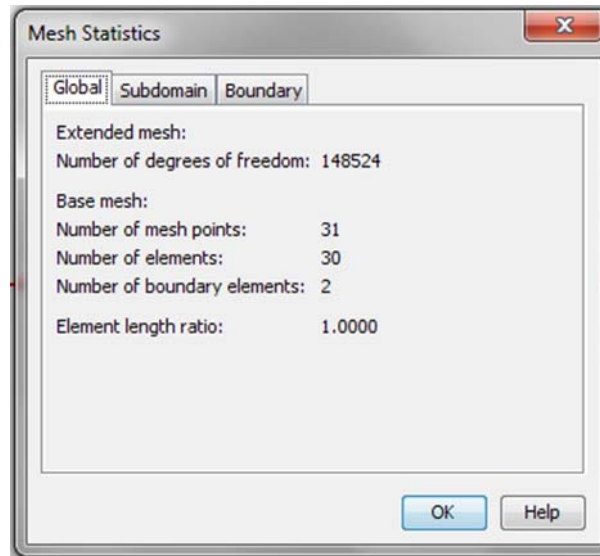
Σχήμα 7.50. Εκφράσεις των συντελεστών της εξίσωσης

Κατόπιν εισάγουμε τις οριακές συνθήκες στο σημείο 1 (Physics > Equation System > Boundary Settings).



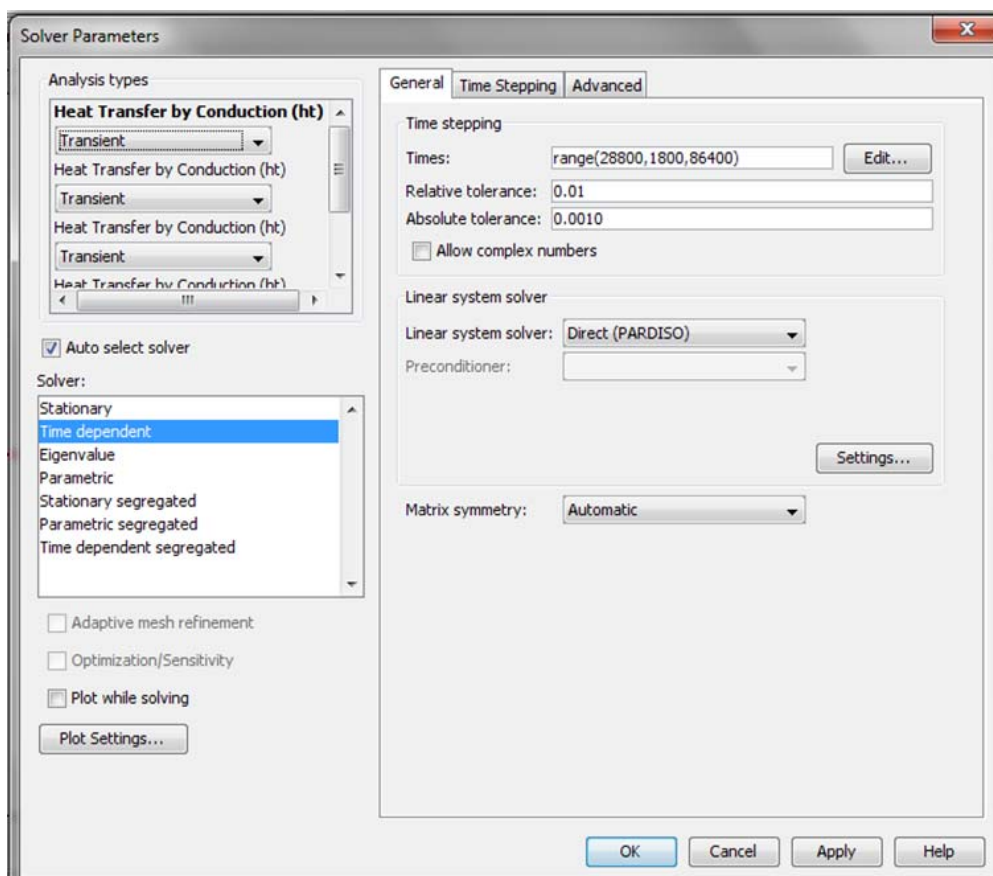
Σχήμα 7.51. Στο σημείο 1 οριακές συνθήκες

Στο τέλος δημιουργούμε το πλέγμα. Τα χαρακτηριστικά του τελικού πλέγματος της Geom 3 δίνονται στο παρακάτω πίνακα (Mesh > Mesh Statistics).

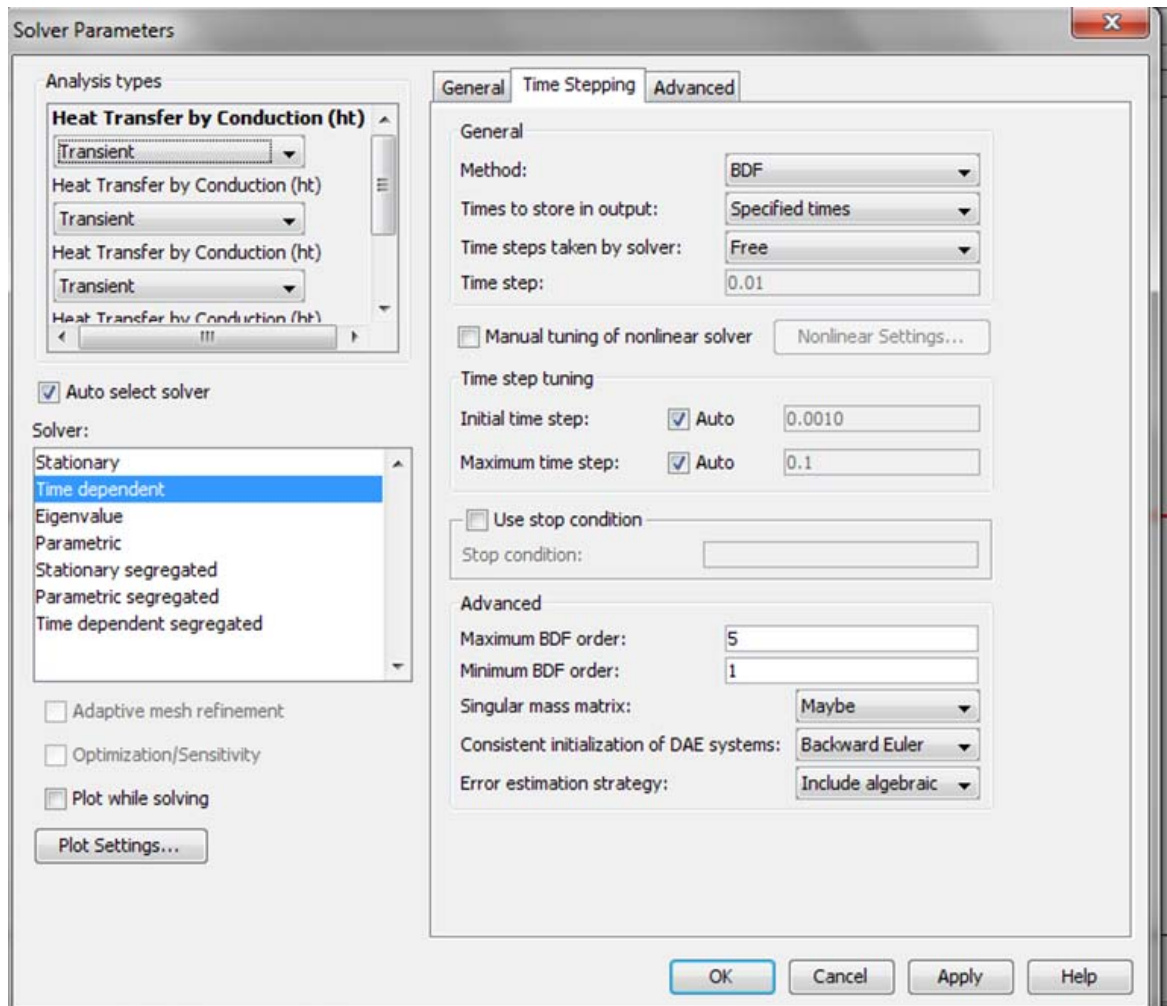


Σχήμα 7.52. Χαρακτηριστικά δημιουργίας πλέγματος της Geom 3

Παρακάτω φαίνονται τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά για την επίλυση του προβλήματος, το οποίο εξαρτάται από το χρόνο (Solve > Solver Parameters).



Σχήμα 7.53. Χαρακτηριστικά επίλυσης του προβλήματος



Σχήμα 7.54. Παράμετροι επίλυσης του προβλήματος

Όπου BDF (Backward Differentiation Formulas methods), είναι μέθοδοι για αριθμητική ολοκλήρωση διαφορικών εξισώσεων.

Μέγιστη και ελάχιστη τάξη για τη διακριτοποίηση του χρονικού βήματος, 5 και 1 αντίστοιχα.

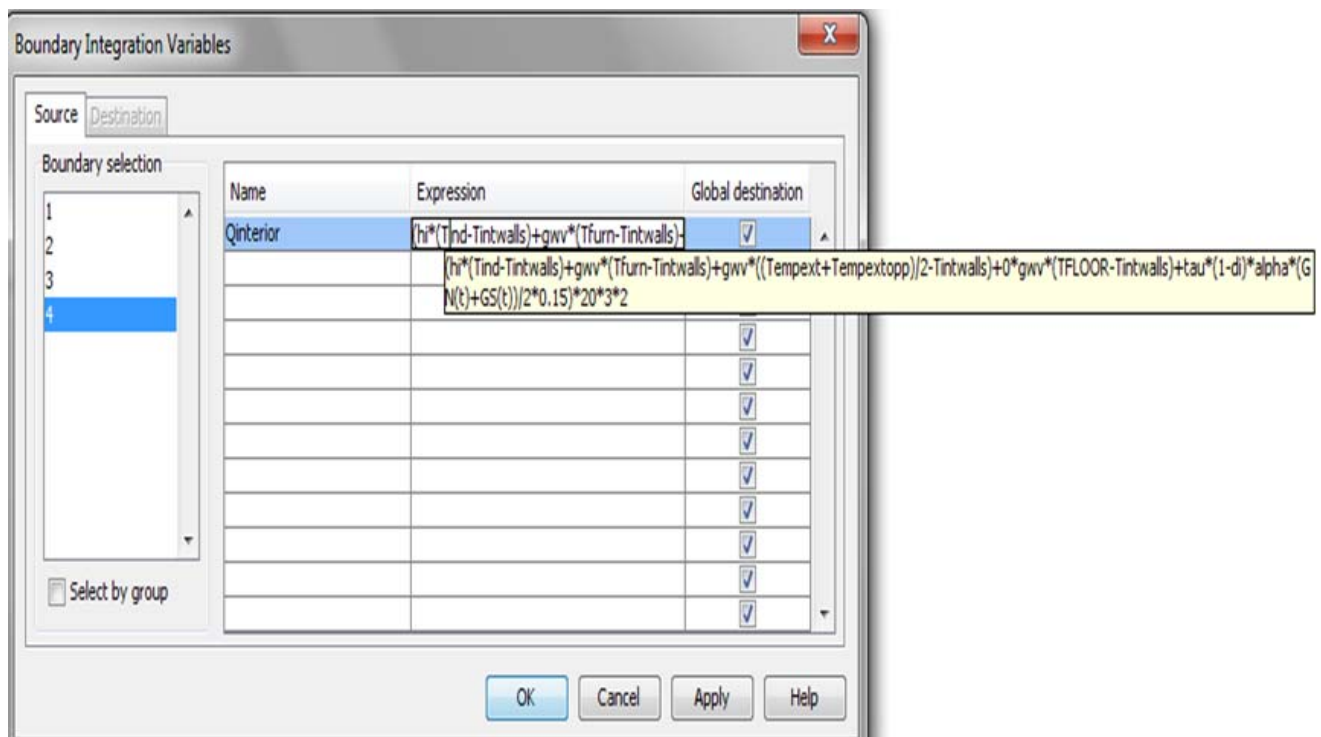
Επιλέγεται μέχρι 5 επειδή από 6 και πάνω δεν συγκλίνουν στο μηδέν.

Στο αρχικό παράθυρο του COMSOL επιλέγουμε τη διάσταση του προβλήματος και το φαινόμενο που θα επιλύσουμε, δηλ για τη Geom 4 η γεωμετρία είναι μονοδιάστατη (1D) και το πρόβλημα που μελετάμε είναι η μετάδοση θερμότητας στον εσωτερικό τοίχο με αγωγή και η κατανομή των θερμοκρασιών και στις δύο επιφάνειες του τοίχου, σε σχέση με τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα.

Geom 4: Εσωτερικός τοίχος

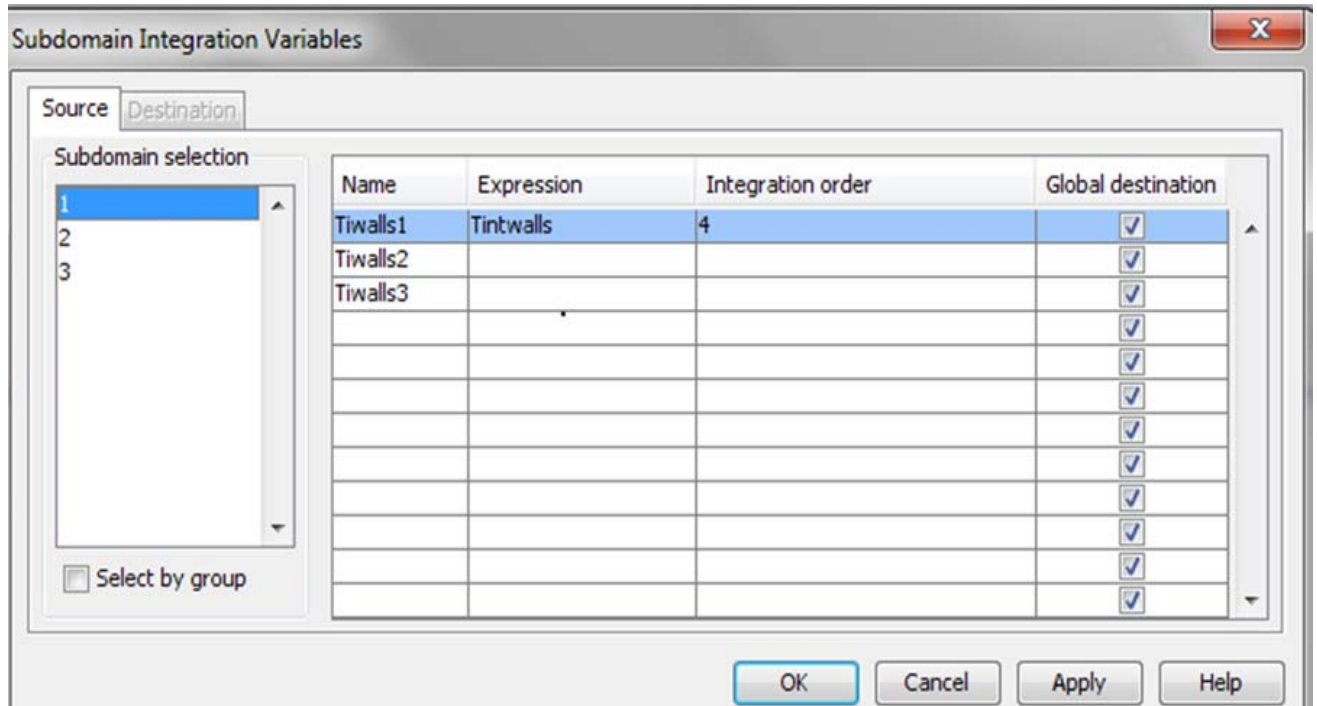
Σχήμα 7.55. Απεικόνιση της Geom 4

Αρχικά εισάγουμε τη ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του εσωτερικού τοίχου Q_{interior} (Options > Integration Coupling Variables > Boundary Variables) στο σύνορο 4 από τις σχέσεις (12) και (13).



Σχήμα 7.56. Η ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του εσωτερικού τοίχου

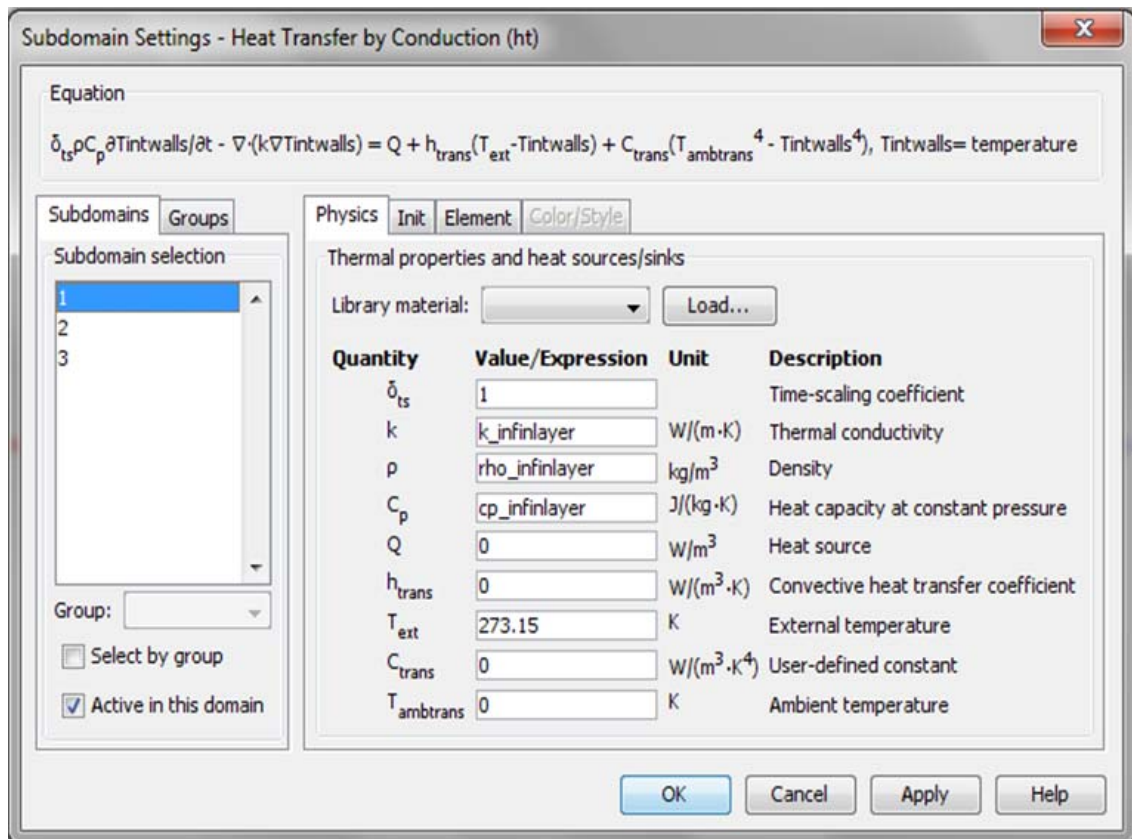
Εν συνεχεία εισάγουμε τη θερμοκρασία εσωτερικών τοίχων στα σύνορα 1, 2, 3 χρησιμοποιώντας την εντολή Options > Integration Coupling Variables > Boundary Variables.



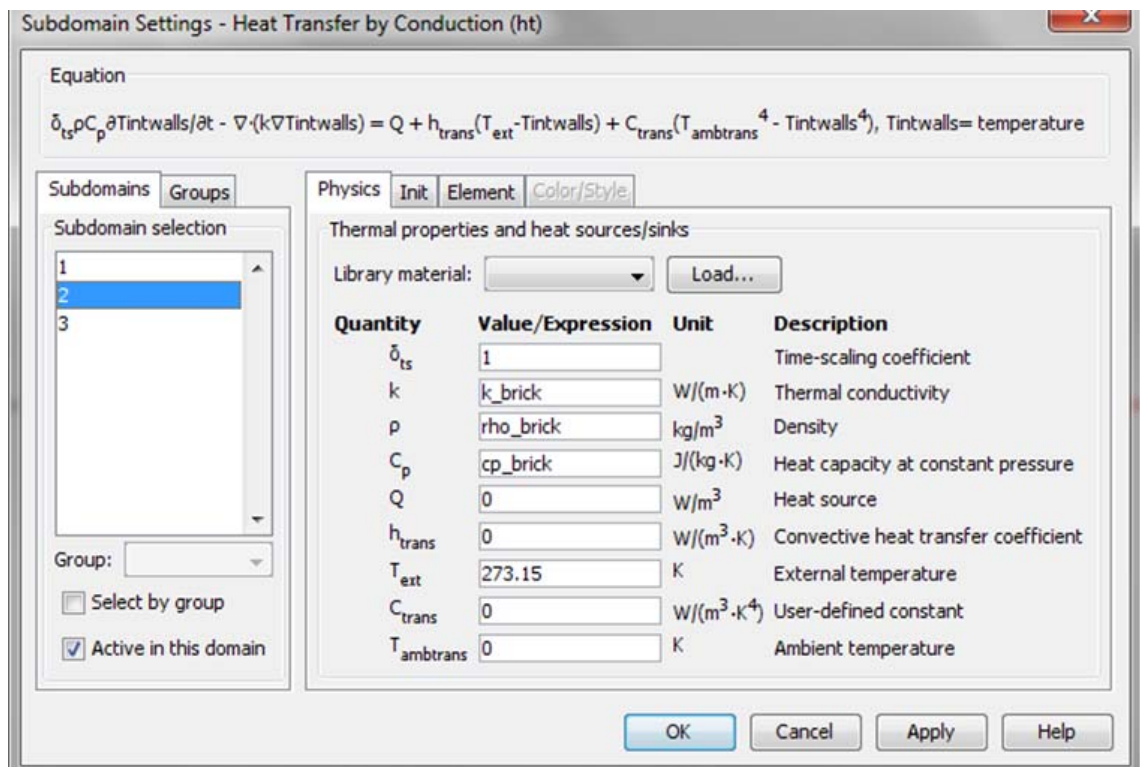
Σχήμα 7.57. Θερμοκρασία εσωτερικών τοίχων στα σύνορα 1, 2, 3

Όπου το 4 μας δείχνει ότι η ακρίβεια του υπολογισμού του ολοκληρώματος είναι 4^{ης} τάξης.

Στη συνέχεια εισάγουμε τη θερμική αγωγιμότητα k , την πυκνότητα ρ και την ειδική θερμοχωρητικότητα C_p του στρώματος 1 και του στρώματος 3 που είναι το εξωτερικό και το εσωτερικό στρώμα του τοίχου αντίστοιχα, καθώς και του στρώματος 2, το οποίο είναι από τούβλο χρησιμοποιώντας την εντολή Physics > Subdomain Settings.

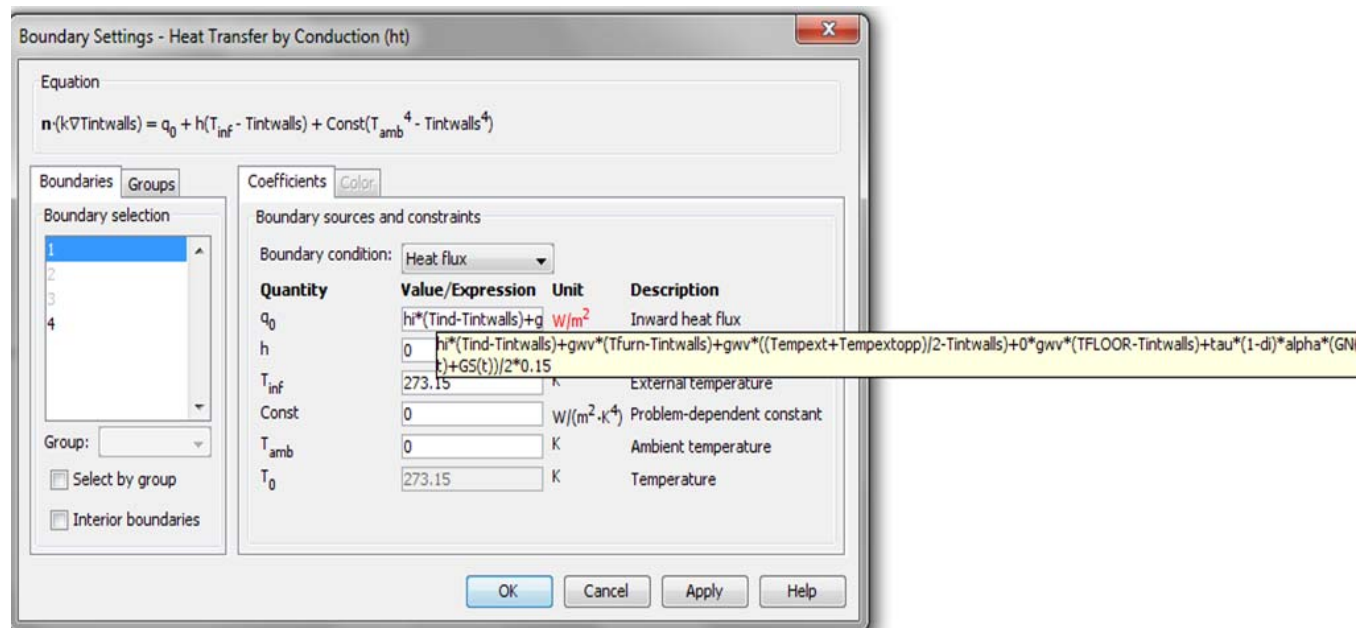


Σχήμα 7.58. Οι ιδιότητες k , ρ , C_p του στρώματος 1 και του στρώματος 3



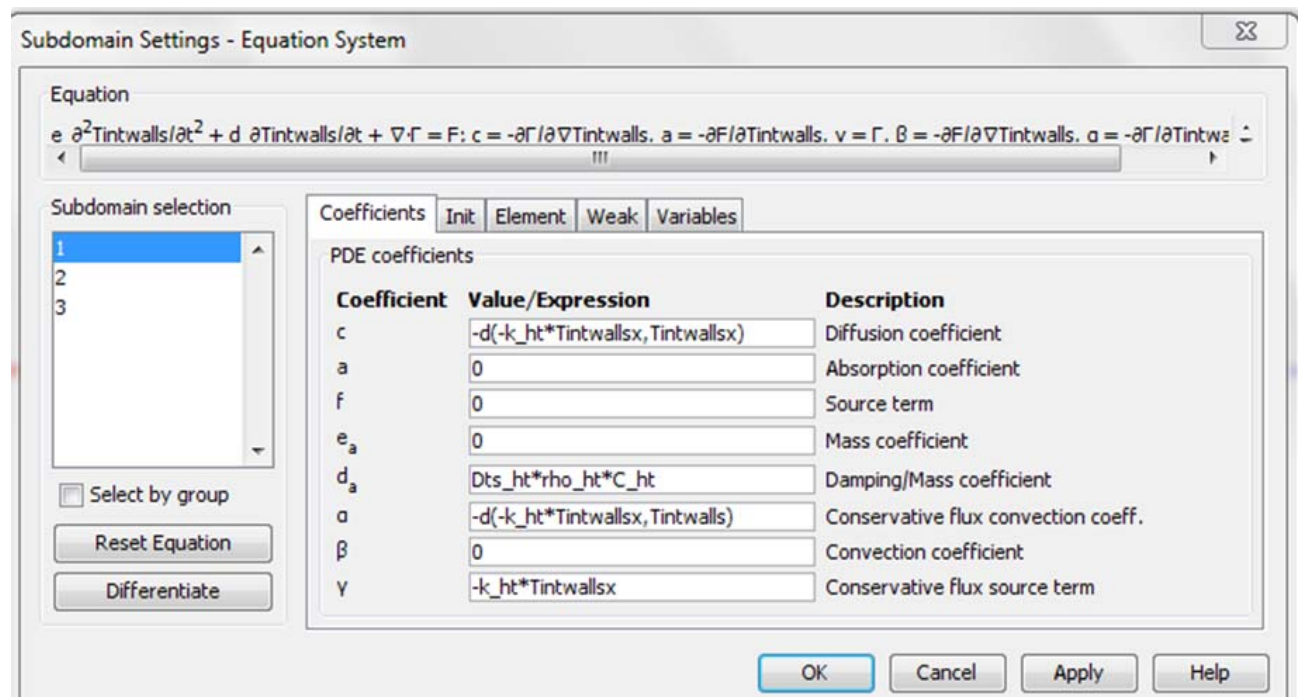
Σχήμα 7.59. Οι ιδιότητες k , ρ , C_p του στρώματος 2

Κατόπιν εισάγουμε τις σχέσεις της ροής θερμότητας του εσωτερικού τοίχου στα σύνορα 1 και 4. Οι σχέσεις αυτές είναι οι σχέσεις (12) και (13) χρησιμοποιώντας την εντολή Physics > Subdomain Settings.



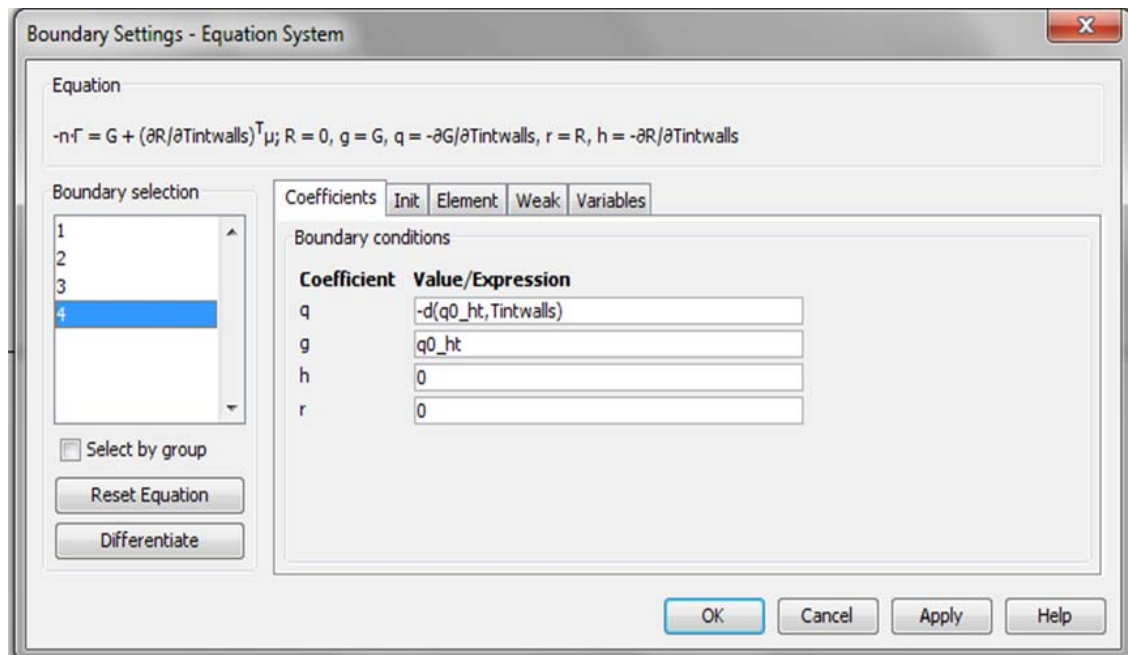
Σχήμα 7.60. Ροή θερμότητας του εσωτερικού τοίχου στα σύνορα 1 και 4

Στη συνέχεια εισάγουμε τις αντίστοιχες εκφράσεις για όλους τους συντελεστές που εμφανίζονται στην εξίσωση που θα επιλυθεί στα σημεία 1,2,3 χρησιμοποιώντας την εντολή Physics > Equation System > Subdomain Settings.



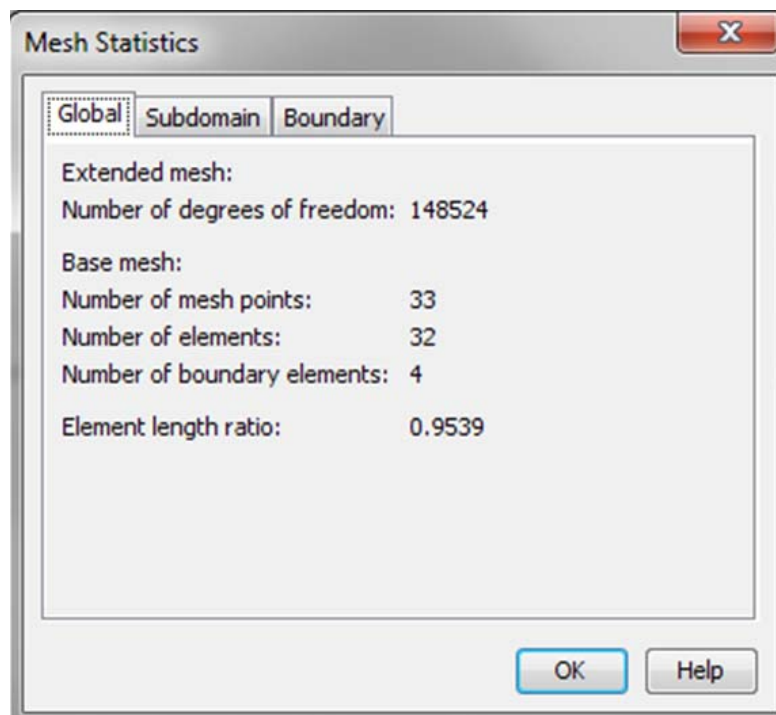
Σχήμα 7.61. Εκφράσεις των συντελεστών της εξίσωσης

Έπειτα εισάγουμε τις οριακές συνθήκες στα σύνορα 1 και 4, ενώ σ' όλα τα άλλα είναι μηδέν (Physics > Equation System > Boundary Settings).



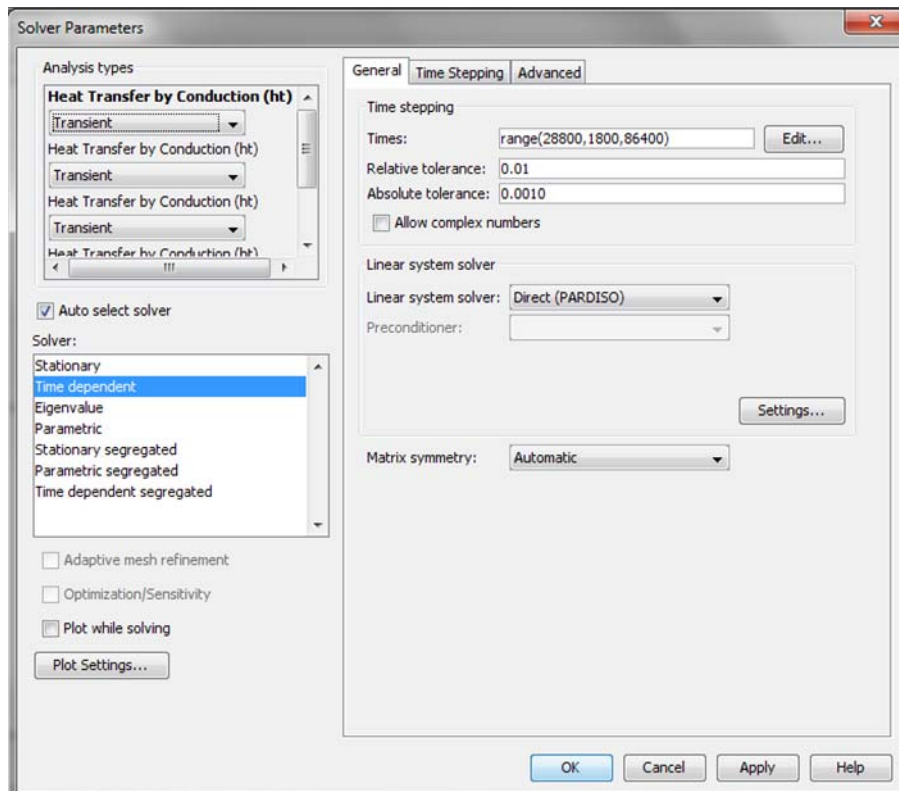
Σχήμα 7.62. Οριακές συνθήκες στα σημεία 1 και 4

Τελικά δημιουργούμε το πλέγμα. Τα χαρακτηριστικά του τελικού πλέγματος της Geom 4 δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Mesh > Mesh Statistics).

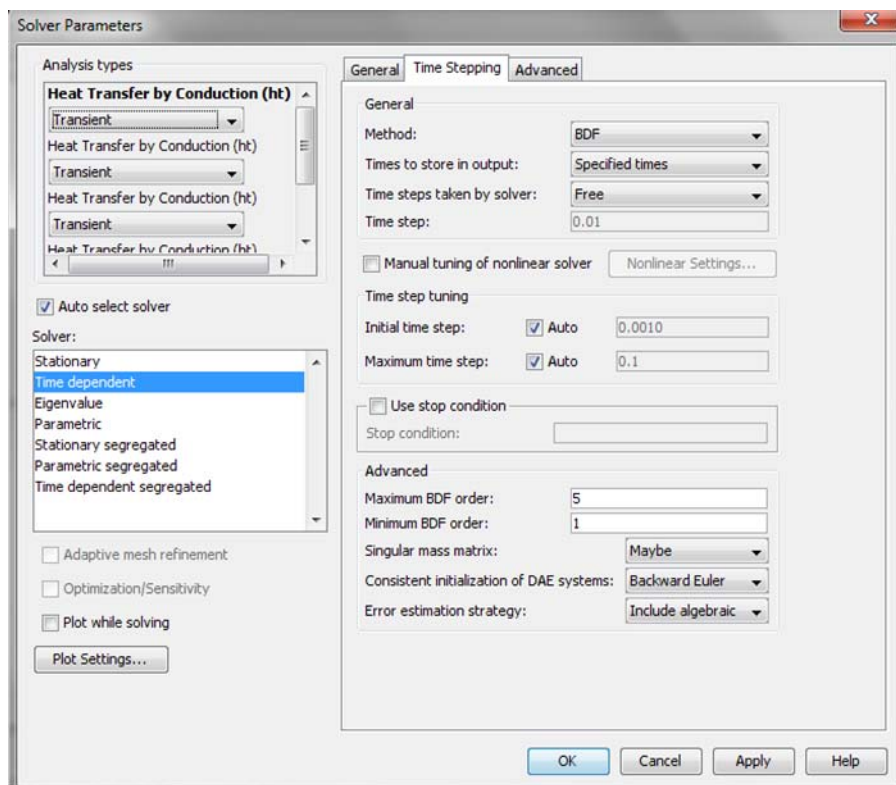


Σχήμα 7.63. Χαρακτηριστικά δημιουργίας πλέγματος της Geom 4

Παρακάτω φαίνονται τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά για την επίλυση του προβλήματος, το οποίο εξαρτάται από το χρόνο (Solve > Solver Parameters).



Σχήμα 7.64. Χαρακτηριστικά επίλυσης προβλήματος



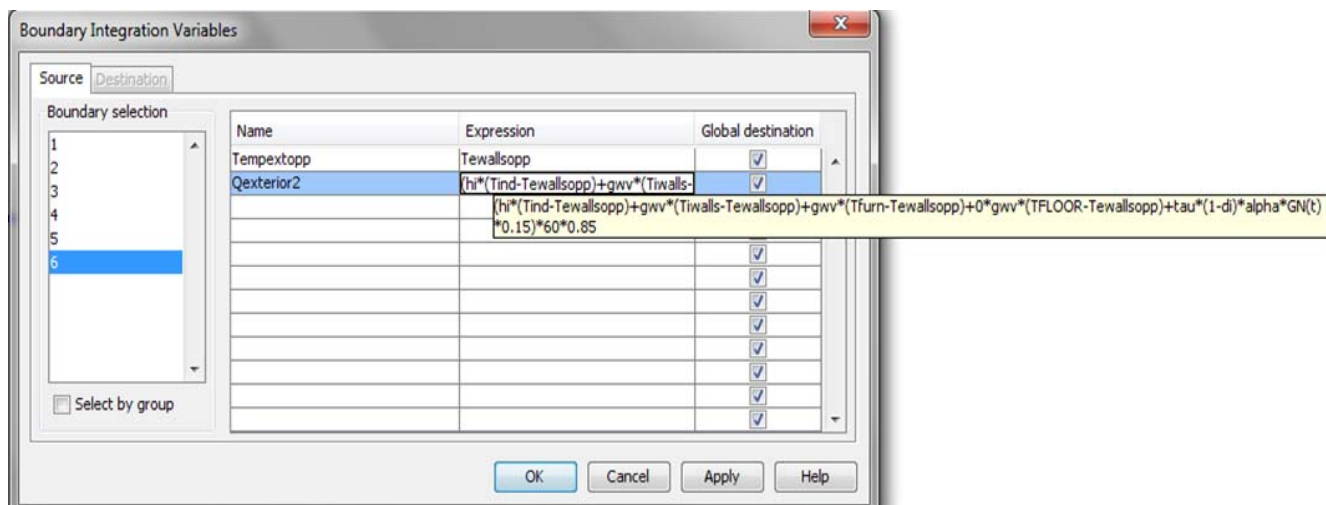
Σχήμα 7.65. Παράμετροι επίλυσης του προβλήματος

Στο αρχικό παράθυρο του COMSOL επιλέγουμε τη διάσταση του προβλήματος και το φαινόμενο που θα επιλύσουμε, δηλ για τη Geom 5 η γεωμετρία είναι μονοδιάστατη (1D) και το πρόβλημα που μελετάμε είναι η μετάδοση θερμότητας στον εξωτερικό νότιο τοίχο με αγωγή και η κατανομή των θερμοκρασιών και στις δύο επιφάνειες του τοίχου.

Geom 5 : Εξωτερικοί τοίχοι – Νότιος τοίχος

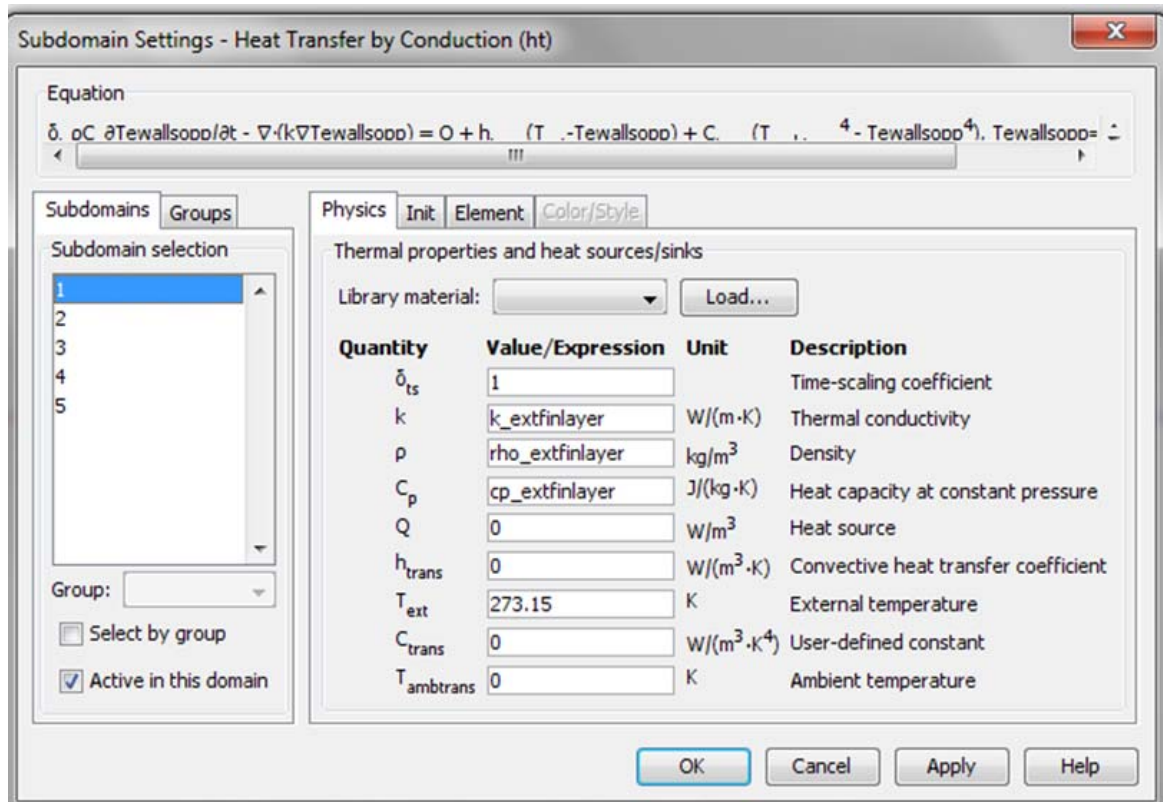
Σχήμα 7.66. Απεικόνιση της Geom 5

Αρχικά εισάγουμε τις σχέσεις για τη ροή θερμότητας της εξωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου $Temp_{extopp}$ και $Q_{exterior2}$ στο σύνορο 6 χρησιμοποιώντας την εντολή Options > Integration Coupling Variables > Boundary Variables. Οι σχέσεις αυτές είναι οι σχέσεις (12) και (13).

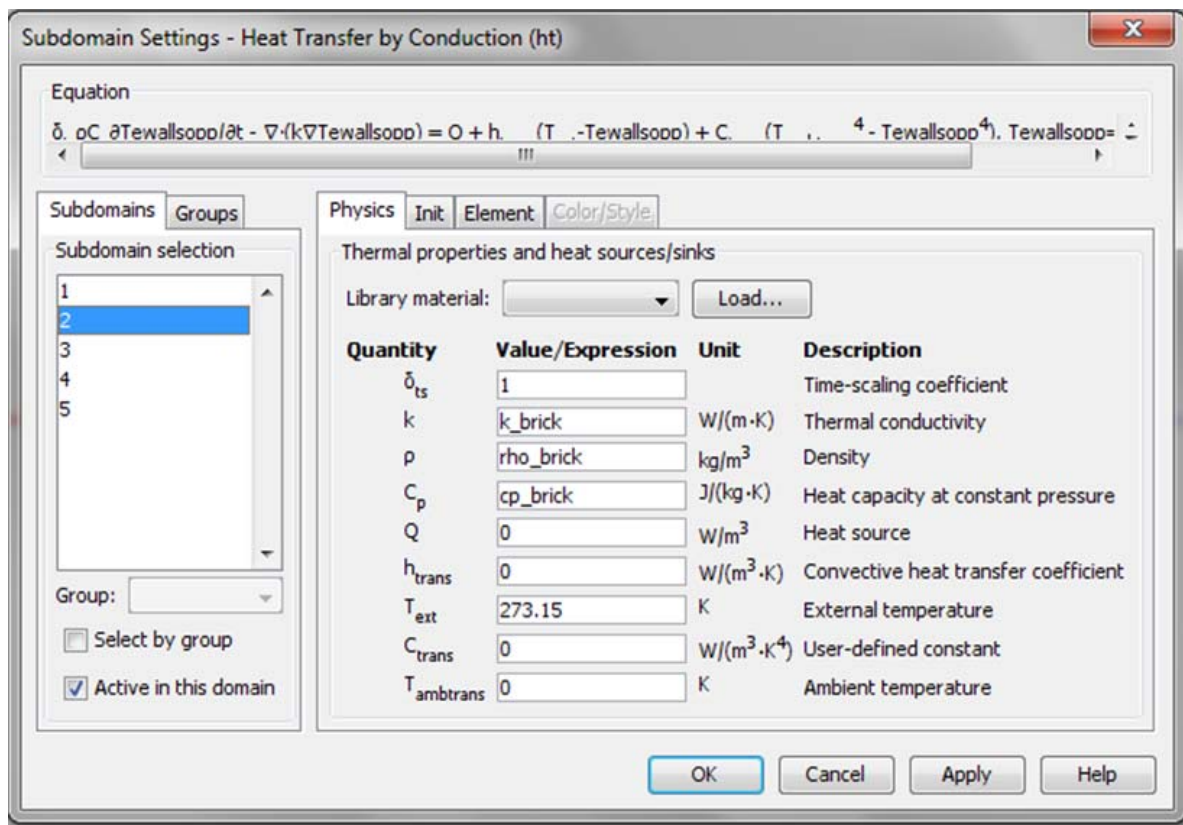


Σχήμα 7.67. Σχέσεις υπολογισμού για τη ροή θερμότητας στη Geom 5

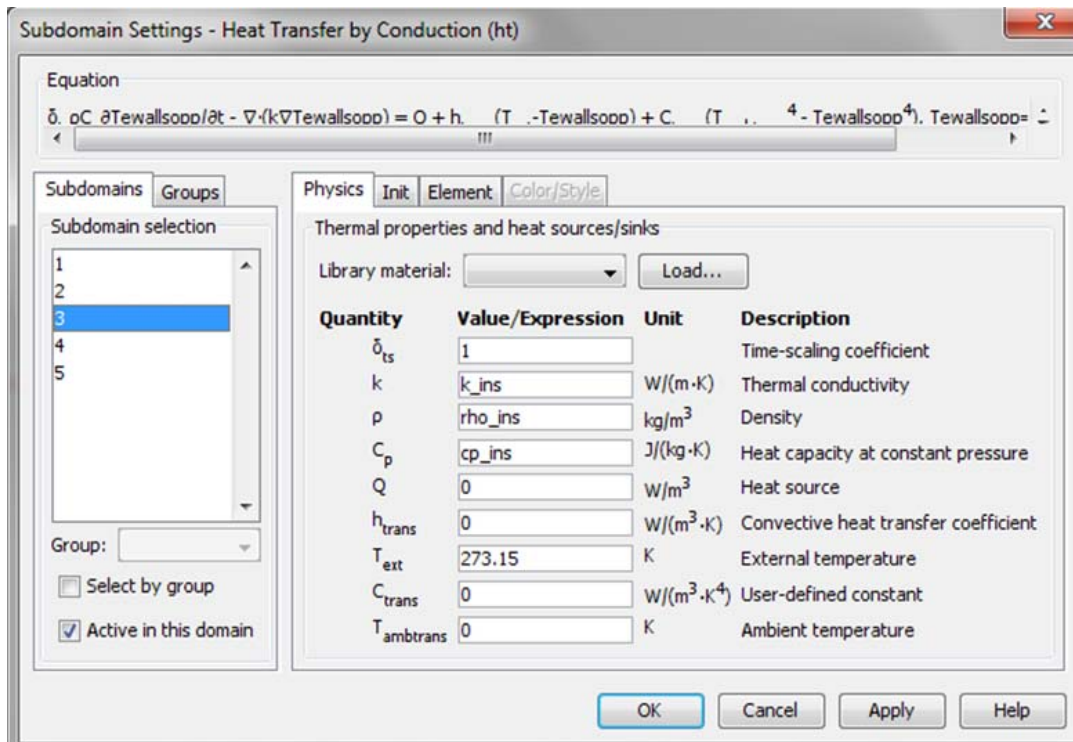
Στη συνέχεια εισάγουμε τη θερμική αγωγιμότητα k , την πυκνότητα ρ και την ειδική θερμοχωρητικότητα C_p του στρώματος 1 και του στρώματος 5 που είναι εσωτερικός και εξωτερικός τοίχος αντίστοιχα, καθώς και των στρωμάτων 2 και 4, τα οποία είναι από τούβλο, καθώς επίσης και του στρώματος 3 που είναι η μόνωση χρησιμοποιώντας την εντολή Physics > subdomain settings.



Σχήμα 7.68. Οι ιδιότητες k , ρ , C_p του στρώματος 1 και 5

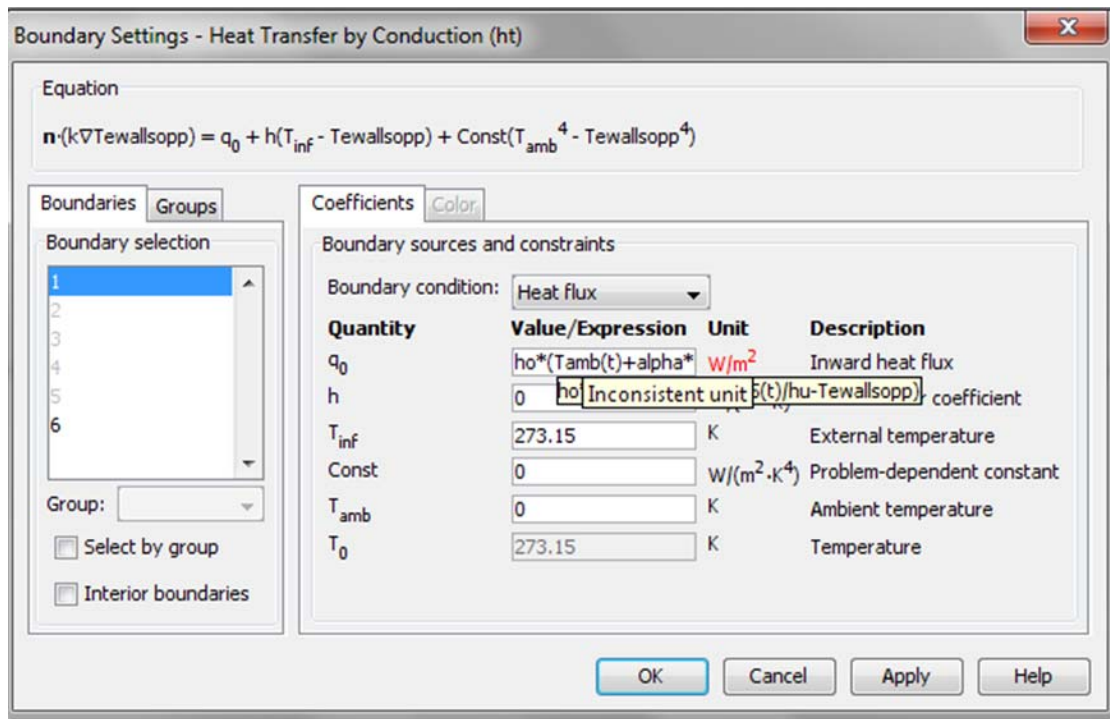


Σχήμα 7.69. Οι ιδιότητες k , ρ , C_p του στρώματος 2 και 4



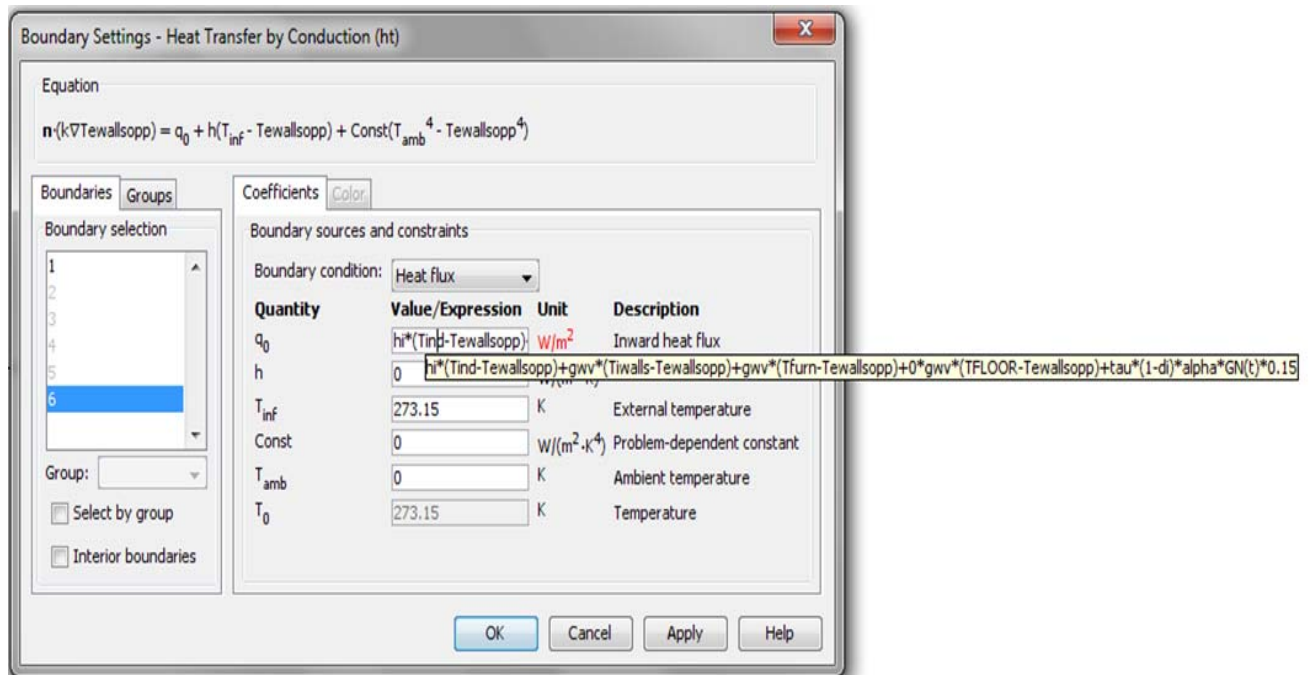
Σχήμα 7.70. Οι ιδιότητες k , ρ , C_p του στρώματος 3

Μετ' έπειτα εισάγουμε την ισοδύναμη εξωτερική θερμοκρασία από τη σχέση (3) χρησιμοποιώντας την εντολή Physics > Boundary settings στο σύνορο 1.



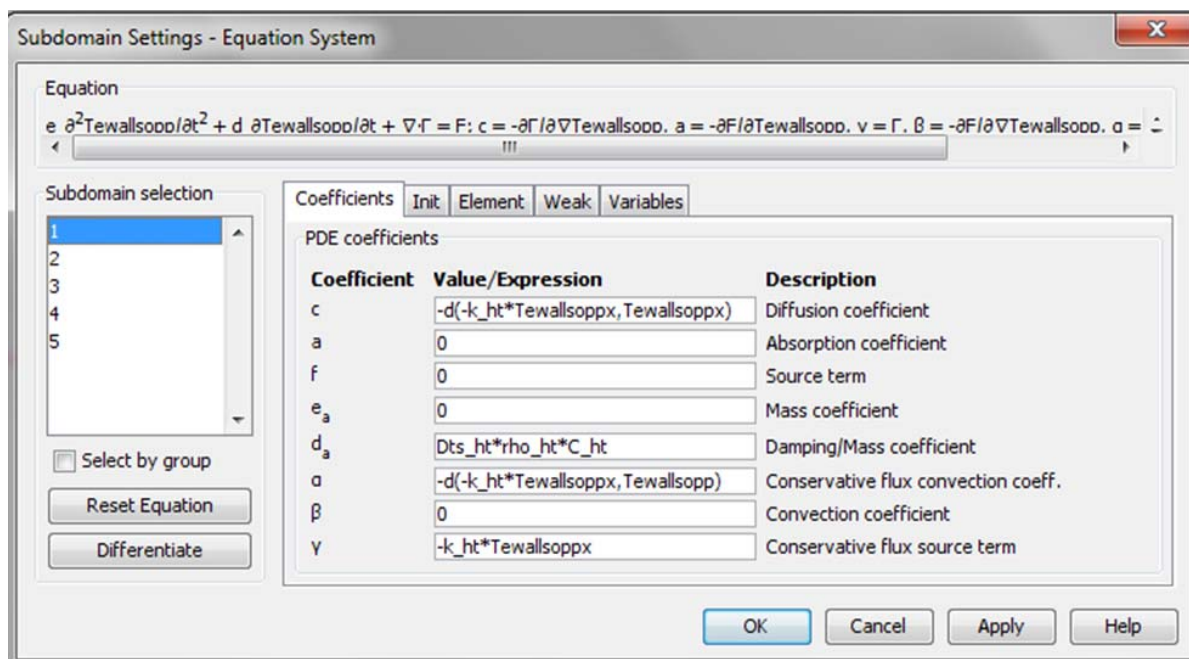
Σχήμα 7.71. Ισοδύναμη εξωτερική θερμοκρασία

Στη συνέχεια εισάγουμε τις σχέσεις (12) και (13) για τη ροή θερμότητας στο σύνορο 6.



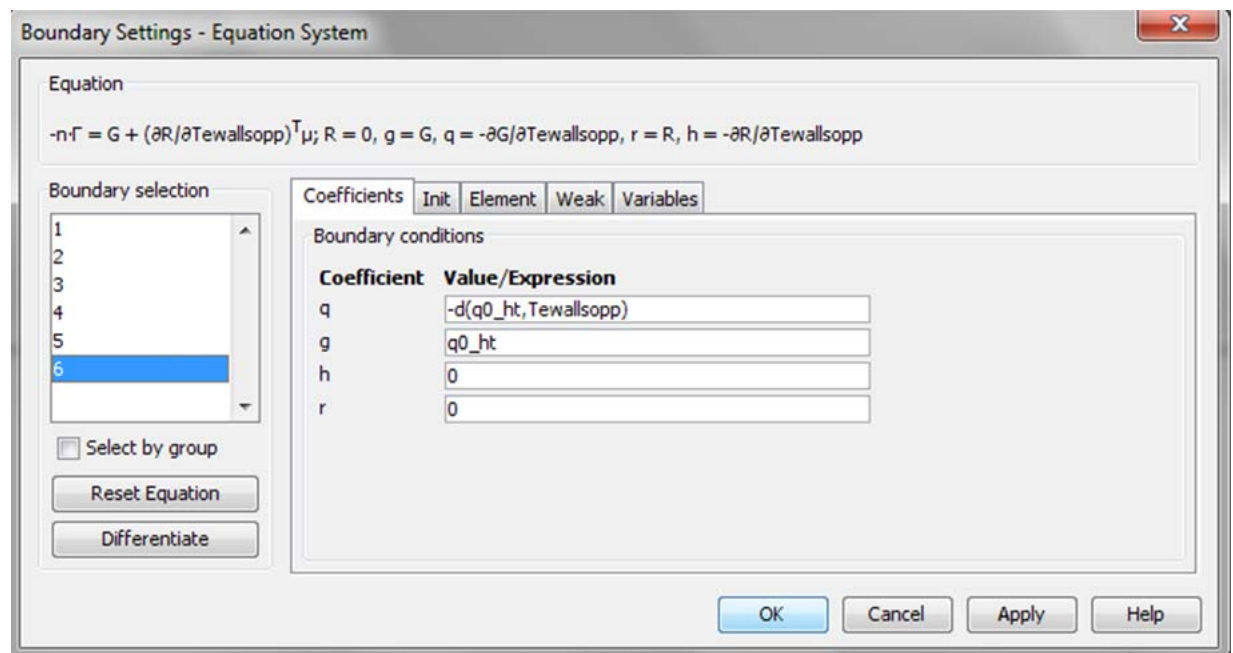
Σχήμα 7.72. Η ροή θερμότητας της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου

Κατόπιν, εισάγουμε τις αντίστοιχες εκφράσεις για όλους τους συντελεστές που εμφανίζονται στην εξίσωση που θα επιλυθεί στα σημεία 1,2,3,4,5 χρησιμοποιώντας την εντολή Physics > Equation System > Subdomain Settings.



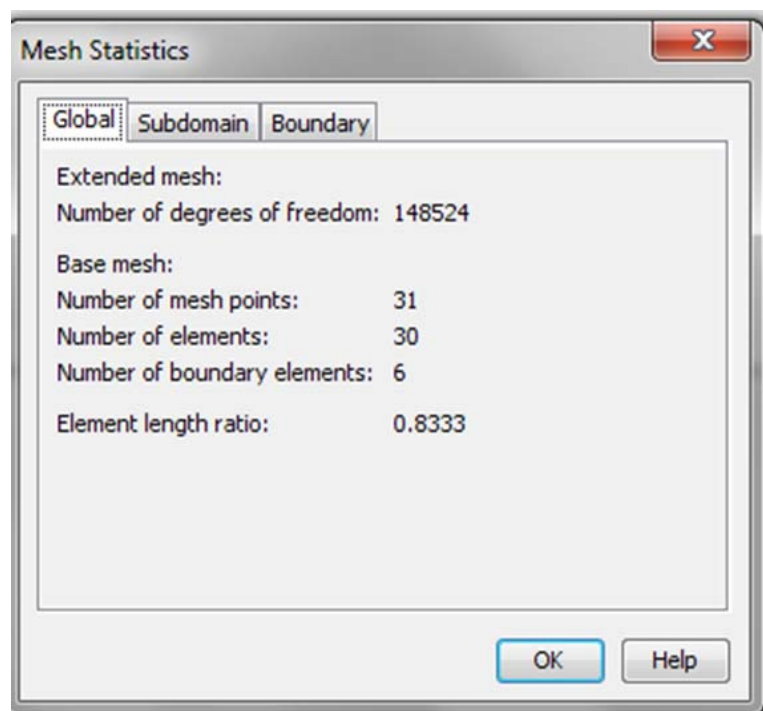
Σχήμα 7.73. Εκφράσεις των συντελεστών της εξίσωσης

Στη συνέχεια εισάγουμε τις οριακές συνθήκες στα σύνορα 1 και 6, ενώ σ' όλα τα άλλα είναι μηδέν (Physics > Equation System > Boundary Settings).



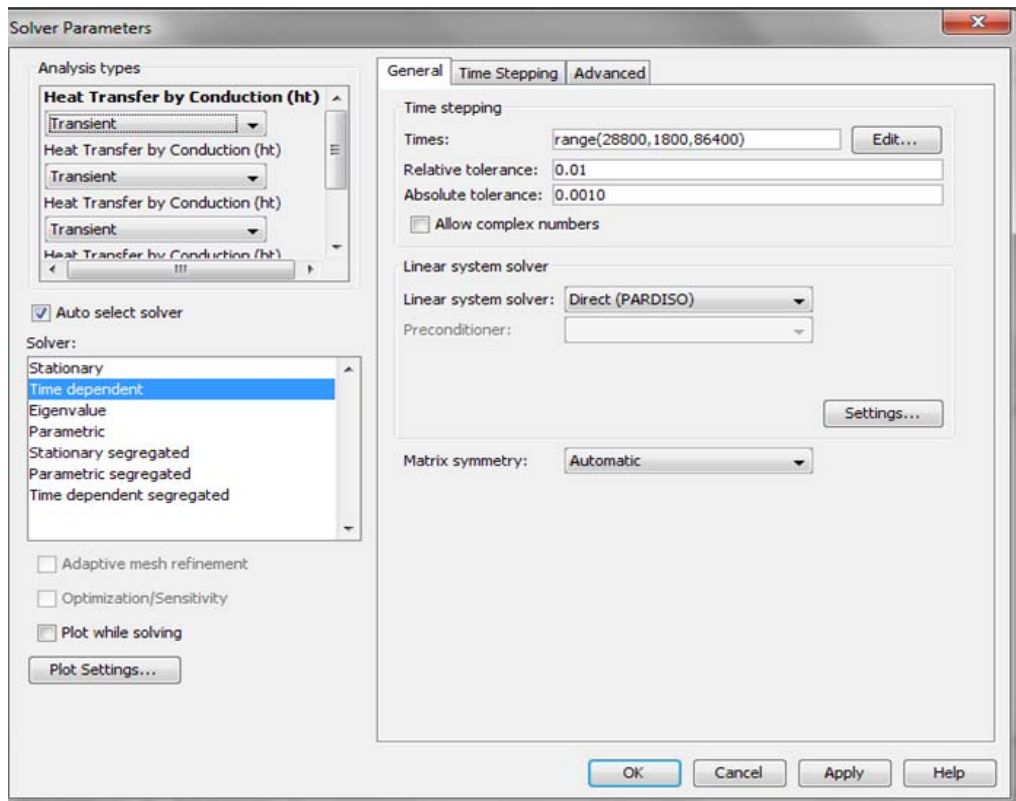
Σχήμα 7.74. Οριακές συνθήκες στα σύνορα 1 και 6

Τελικά δημιουργούμε το πλέγμα. Τα χαρακτηριστικά του τελικού πλέγματος της Geom 5 δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Mesh > Mesh Statistics).

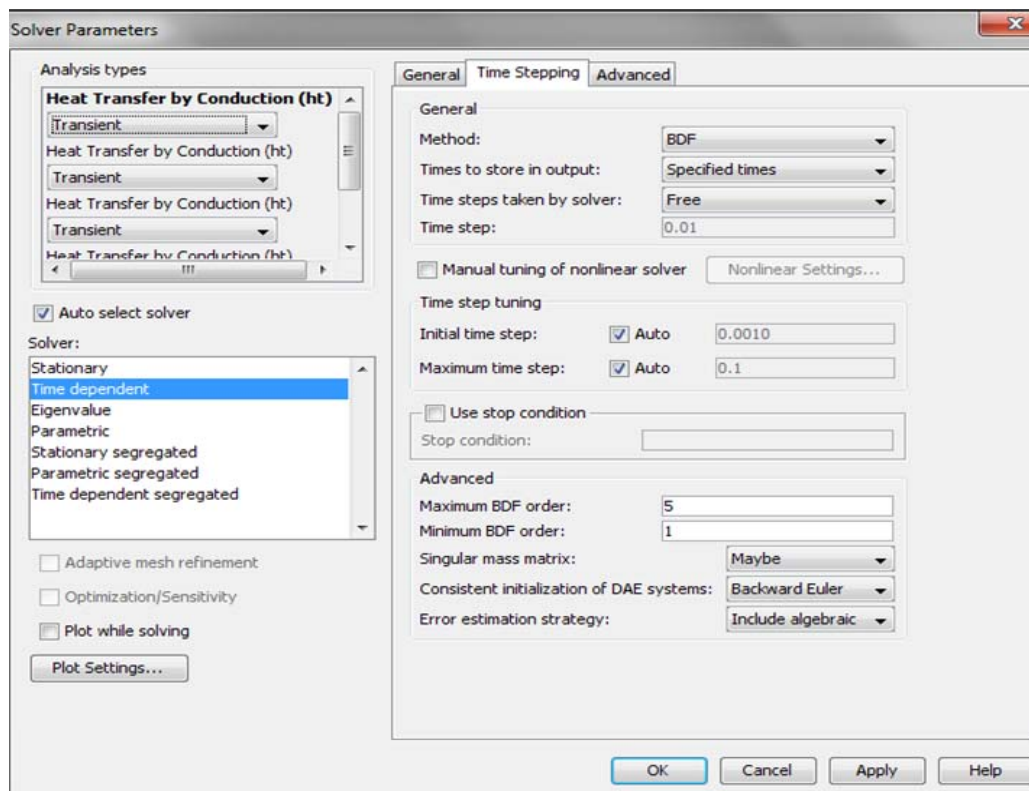


Σχήμα 7.75. Χαρακτηριστικά δημιουργίας πλέγματος της Geom 5

Παρακάτω φαίνονται τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά για την επίλυση του προβλήματος, το οποίο εξαρτάται από το χρόνο (Solve > Solver Parameters).



Σχήμα 7.76. Χαρακτηριστικά επίλυσης προβλήματος



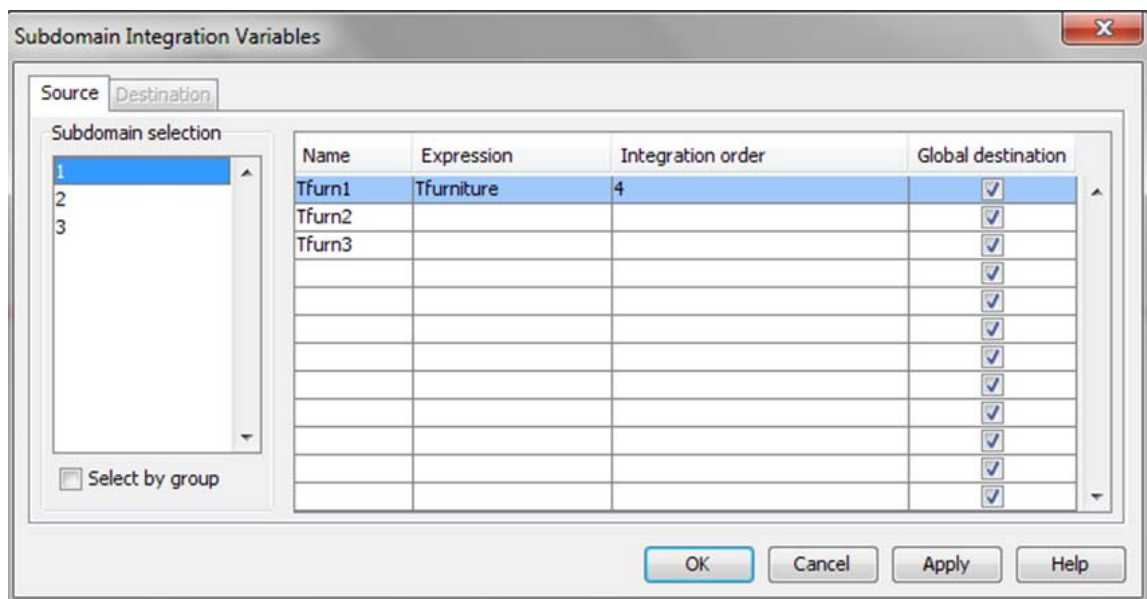
Σχήμα 7.77. Παράμετροι επίλυσης του προβλήματος

Στο αρχικό παράθυρο του COMSOL επιλέγουμε τη διάσταση του προβλήματος και το φαινόμενο που θα επιλύσουμε, δηλ για τη Geom 6 η γεωμετρία είναι μονοδιάστατη (1D) και το πρόβλημα που μελετάμε είναι η μετάδοση θερμότητας με αγωγή στην επίπλωση.

Geom 6: Επίπλωση

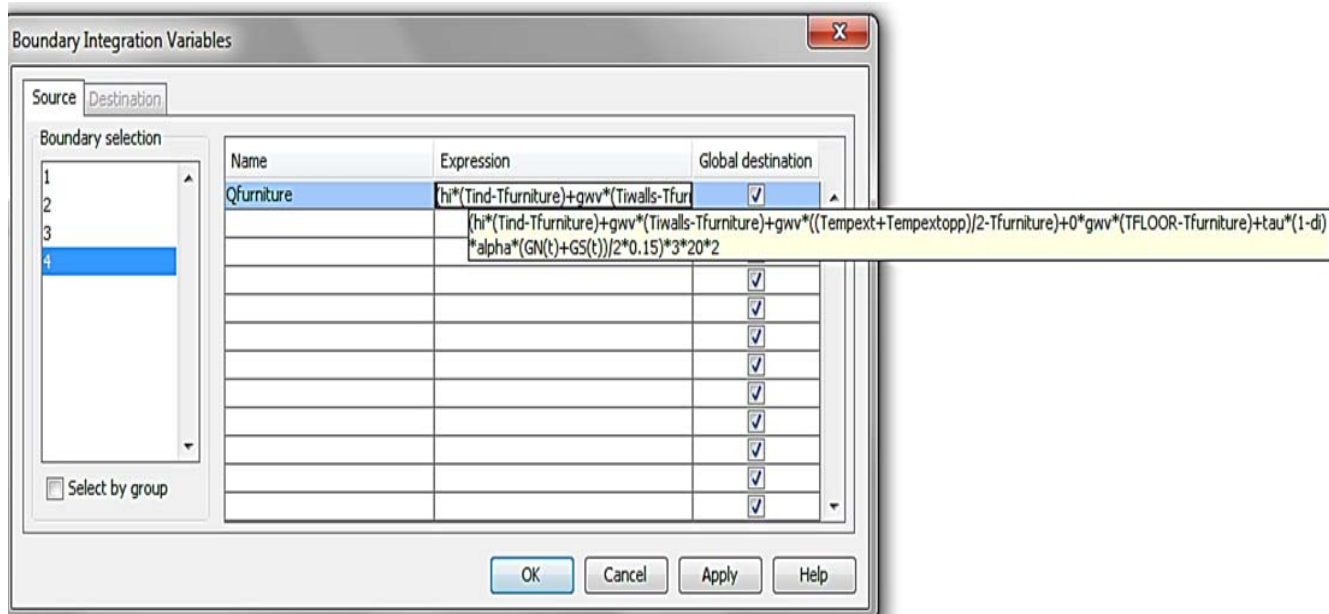
Σχήμα 7.78. Απεικόνιση της Geom 6

Αρχικά εισάγουμε τις θερμοκρασίες επίπλωσης στα σύνορα 1, 2, 3 χρησιμοποιώντας την εντολή Options > Integration Coupling Variables > Subdomain Integration Variables.



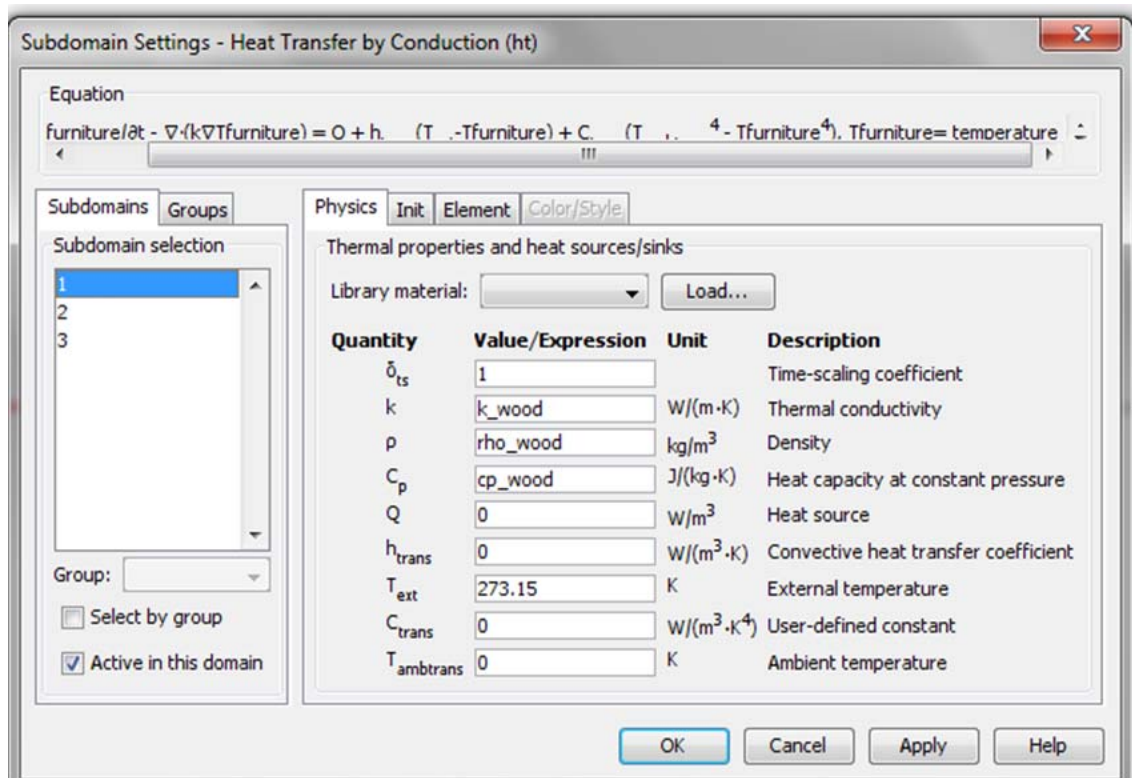
Σχήμα 7.79. Θερμοκρασίες επίπλωσης

Παρακάτω εισάγουμε τις σχέσεις υπολογισμού ροής θερμότητας από την επίπλωση. Οι σχέσεις αυτές είναι οι σχέσεις (12) και (13) χρησιμοποιώντας την εντολή Options > Integration Coupling Variables > Boundary Variables.



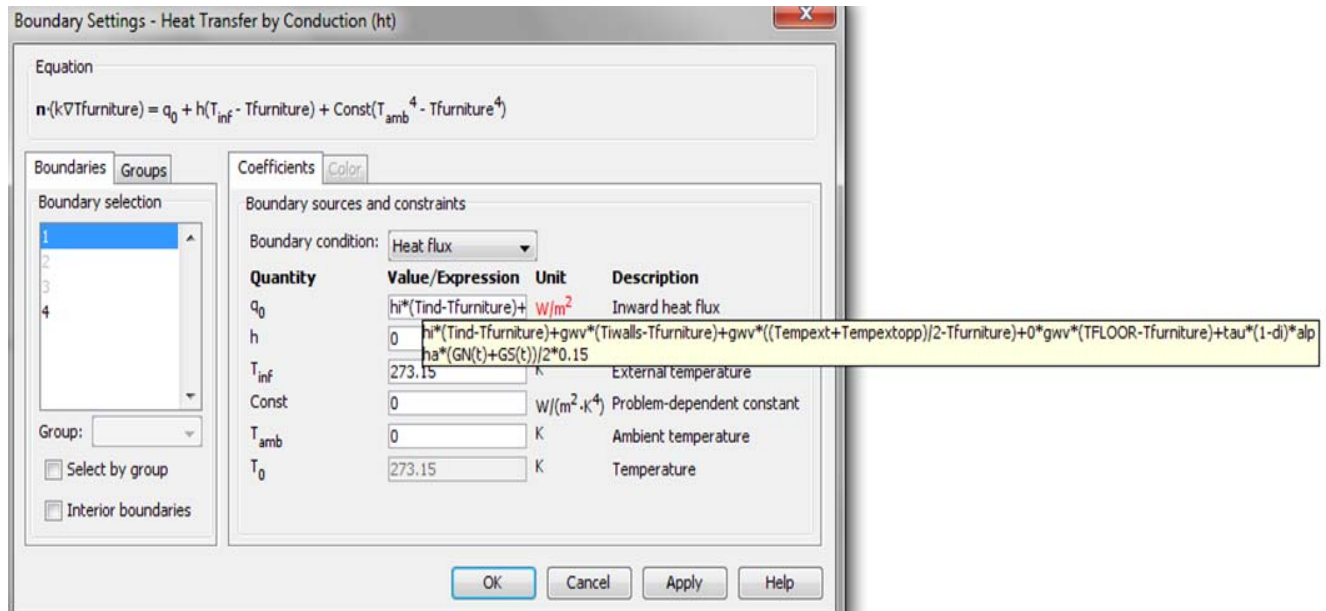
Σχήμα 7.80. Σχέση υπολογισμού ροής θερμότητας από την επίπλωση

Στη συνέχεια εισάγουμε τη θερμική αγωγιμότητα k , την πυκνότητα ρ και την ειδική θερμοχωρητικότητα C_p των στρωμάτων 1, 2 και 3 που αφορά την επίπλωση, ενώ το υλικό έχει θεωρηθεί ότι είναι ξύλινες πλάκες (Physics > Subdomain Settings).



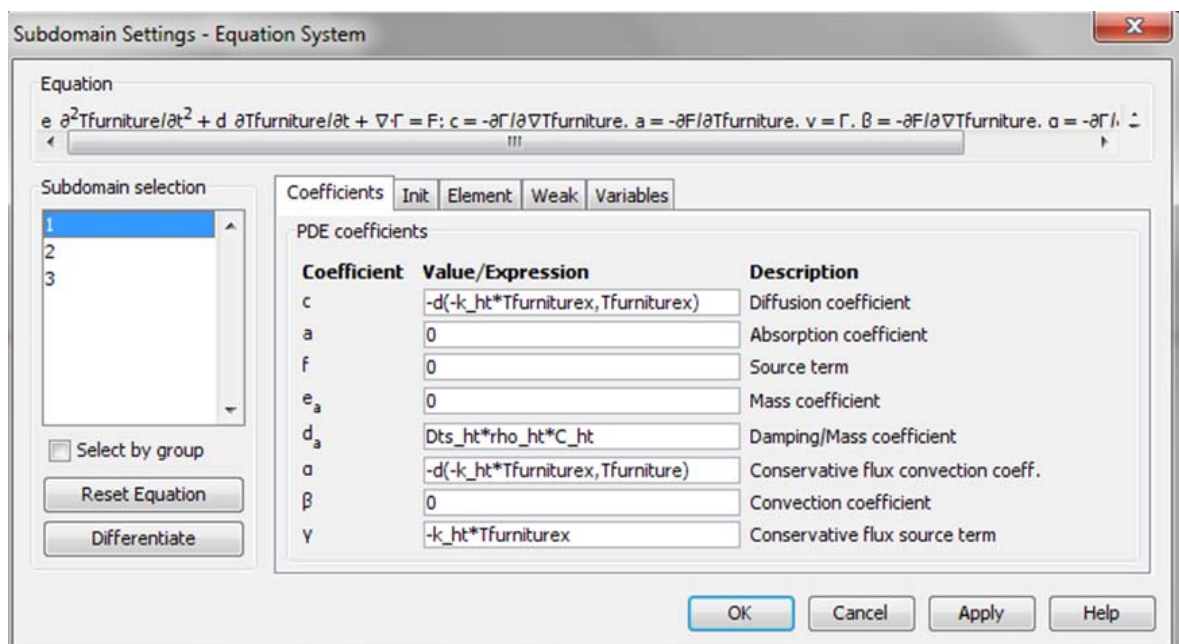
Σχήμα 7.81. Οι ιδιότητες k , ρ , C_p των στρωμάτων 1, 2, 3

Στα σημεία 1 και 4 εφαρμόζουμε τη σχέση (12) και συνοπολογίζουμε τη θερμοκρασία δαπέδου και τη θερμοκρασία των εσωτερικών και εξωτερικών τοίχων αντίστοιχα (Physics > Boundary Settings).



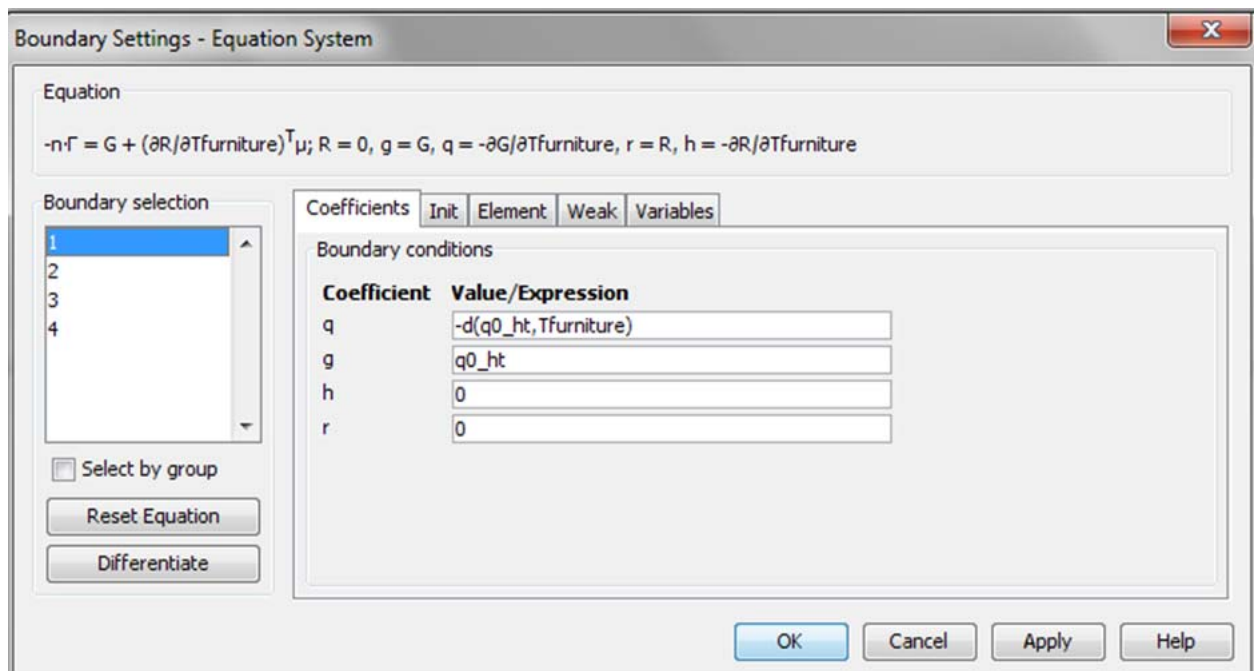
Σχήμα 7.82. Οριακές συνθήκες στα σημεία 1 και 4

Κατόπιν, εισάγουμε τις αντίστοιχες εκφράσεις για όλους τους συντελεστές που εμφανίζονται στην εξίσωση που θα επιλυθεί στα σημεία 1,2,3 χρησιμοποιώντας την εντολή Physics > Equation System > Subdomain Settings.



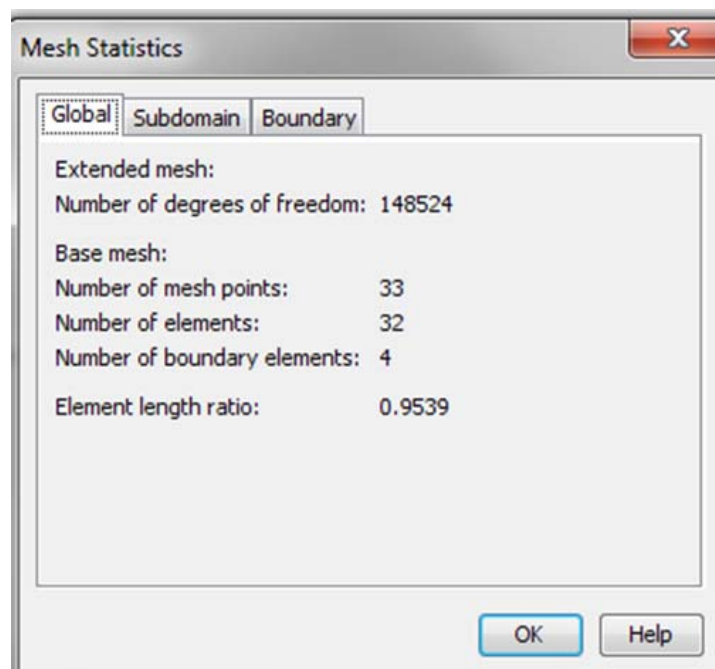
Σχήμα 7.83. Εκφράσεις των συντελεστών της εξίσωσης

Έπειτα, εισάγουμε τις οριακές συνθήκες στα σύνορα 1 και 4, ενώ σ' όλα τα άλλα είναι μηδέν (Physics > Equation System > Boundary Settings).



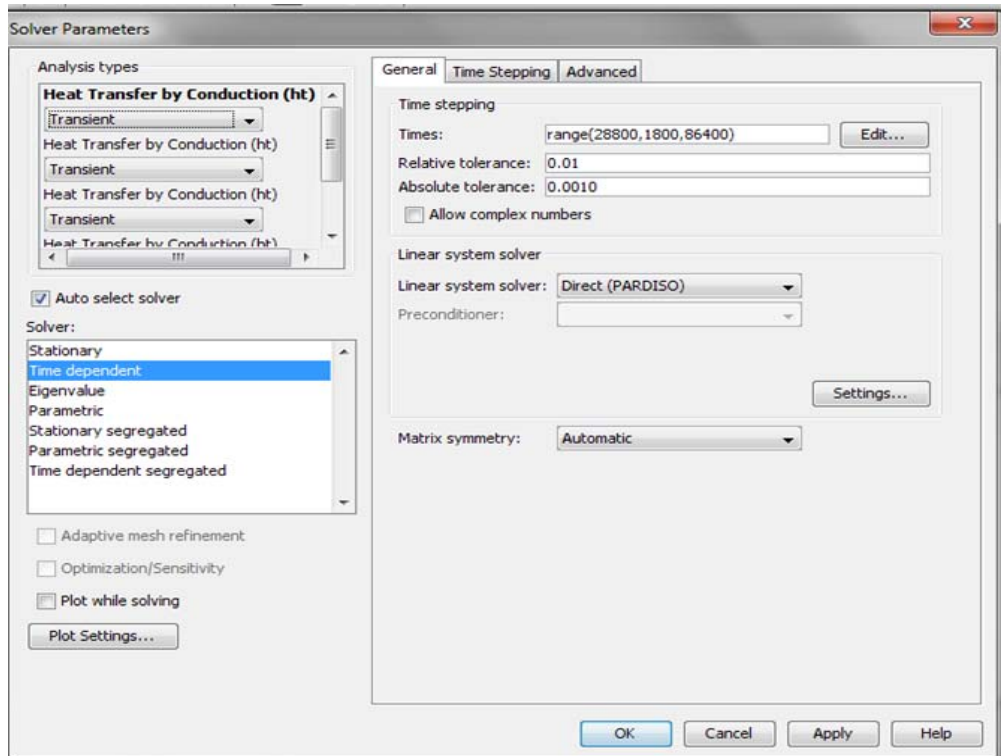
Σχήμα 7.84. Συνοριακές συνθήκες στα σημεία 1 και 4

Στο τέλος δημιουργούμε το πλέγμα. Τα χαρακτηριστικά του τελικού πλέγματος της Geom 6 δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Mesh > Mesh Statistics).

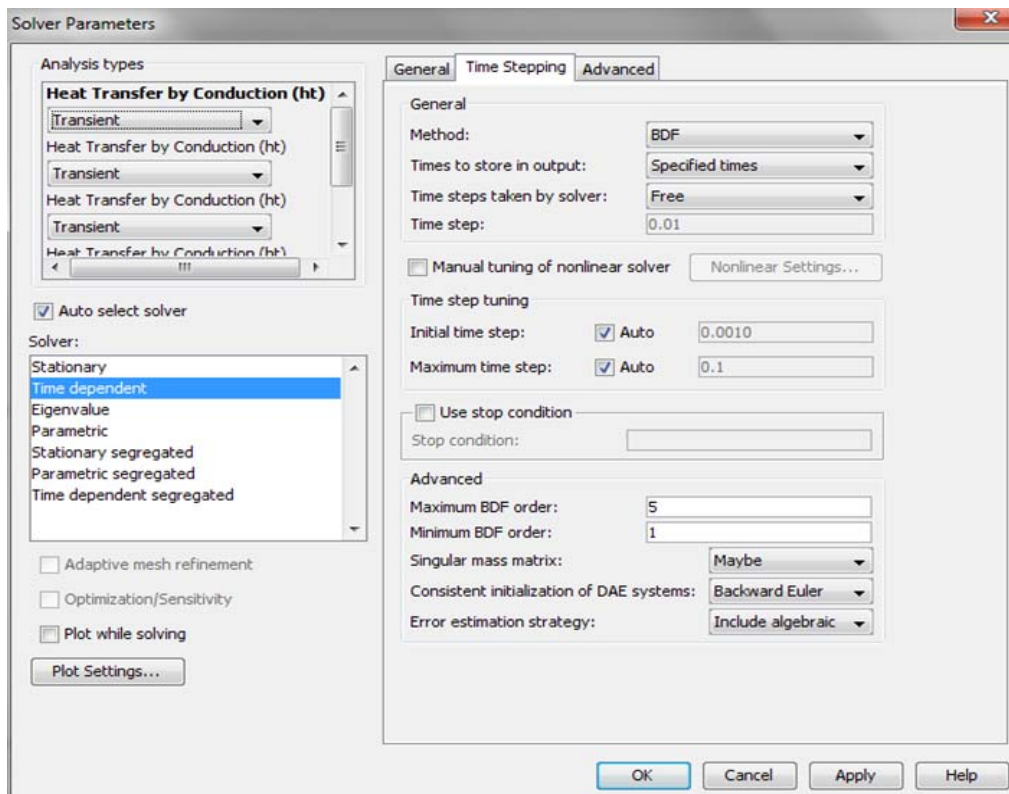


Σχήμα 7.85. Χαρακτηριστικά δημιουργίας πλέγματος της Geom 6

Παρακάτω φαίνονται τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά για την επίλυση του προβλήματος, το οποίο εξαρτάται από το χρόνο (Solve > Solver Parameters).



Σχήμα 7.86. Χαρακτηριστικά επίλυσης προβλήματος

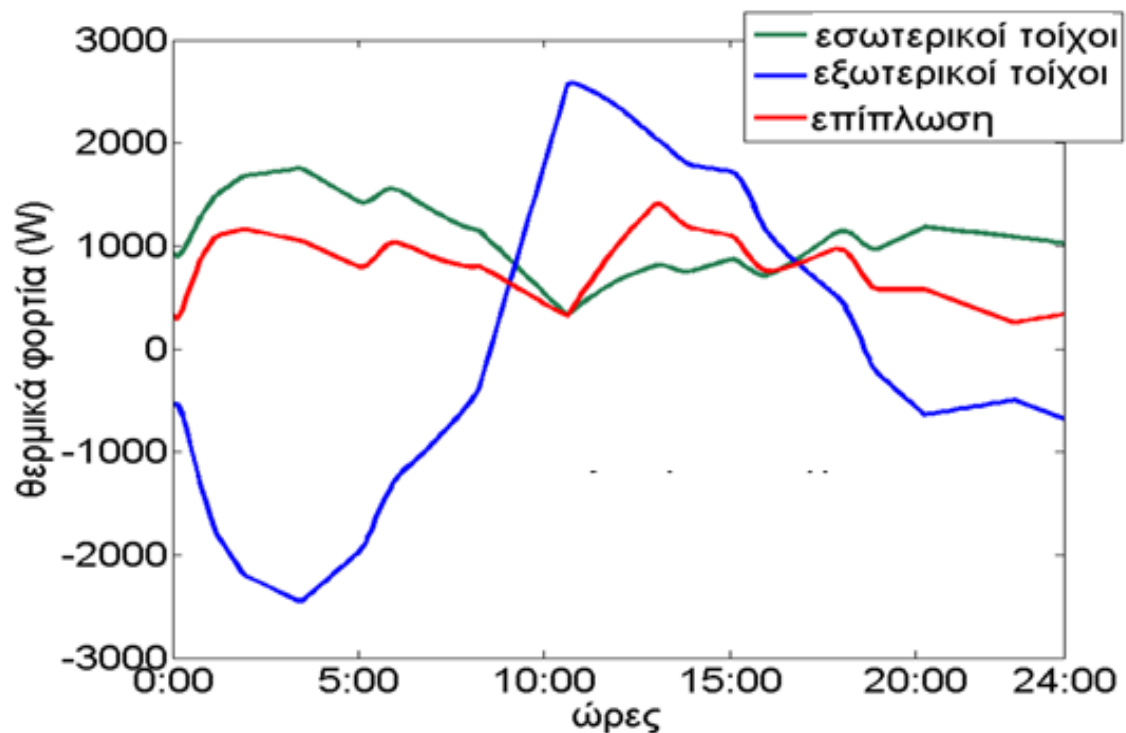


Σχήμα 7.87. Παράμετροι επίλυσης του προβλήματος

Στη συνέχεια παρατίθενται διάφορα διαγράμματα που απεικονίζουν τη χρονική μεταβολή των φορτίων του χώρου που παραλαμβάνει ο εσωτερικός αέρας κατά τη διάρκεια της ημέρας, την κατανομή της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, την κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του σωλήνα ψύξης και τέλος την κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε στρώμα υλικού της οροφής σε αποστάσεις $z = 0.5\text{m}$ και $z = 5\text{m}$ από το σημείο εισόδου του νερού ψύξης.

Η χρονική μεταβολή των φορτίων του χώρου που παραλαμβάνει ο εσωτερικός αέρας κατά τη διάρκεια της ημέρας παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.

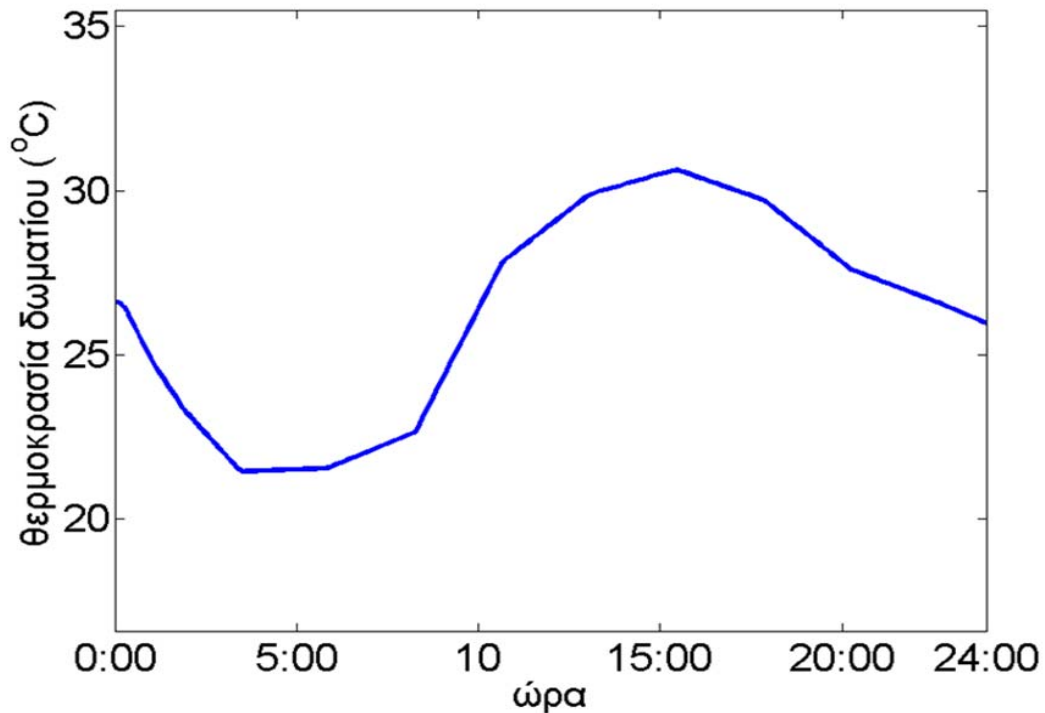
Τα φορτία αυτά περιλαμβάνουν τη ροή θερμότητας από τους εσωτερικούς τοίχους, καθώς επίσης και την θερμότητα που εισέρχεται στο χώρο από τους εξωτερικούς τοίχους και την επίπλωση. [Postprocessing > Global Variable Plots > Expression > $Q_{\text{furniture}}$ (επίπλωση) > $Q_{\text{exterior1}} + Q_{\text{exterior2}}$ (εξωτερικοί τοίχοι) > Q_{interior} (εσωτερικοί τοίχοι)]



Σχήμα 7.88. Χρονική μεταβολή των φορτίων του χώρου που παραλαμβάνει ο εσωτερικός αέρας

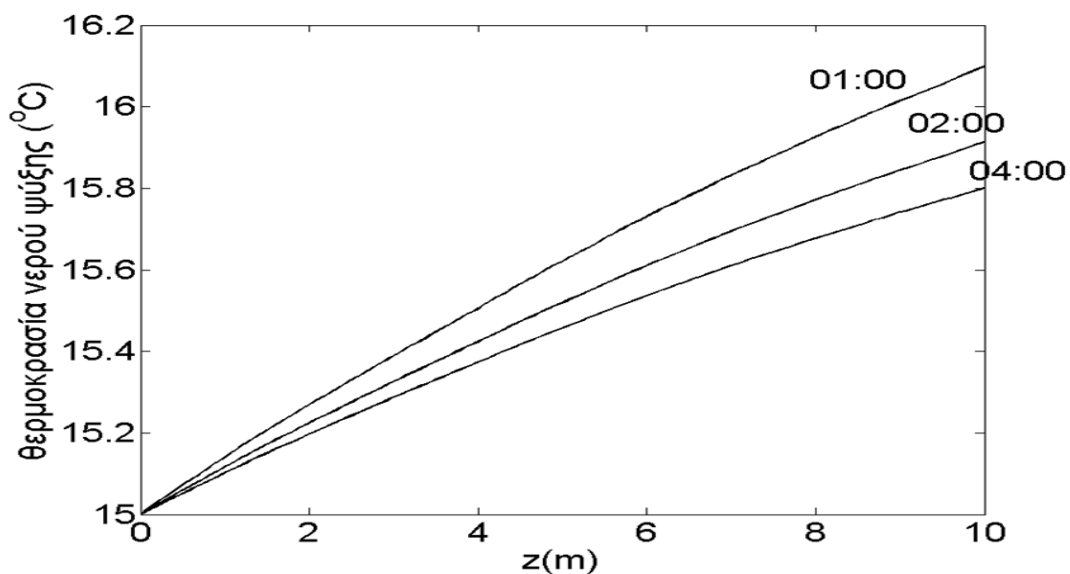
Το φορτίο που αντιστοιχεί στους εξωτερικούς τοίχους, όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, λαμβάνει και αρνητικές τιμές κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, λόγω του γεγονότος ότι τότε η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, οπότε η θερμότητα μεταφέρεται από τον εσωτερικό αέρα προς τους εξωτερικούς τοίχους.

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει την εξέλιξη της θερμοκρασίας του αέρα στο δωμάτιο όταν χρησιμοποιούνται υλικά αλλαγής φάσης, χρησιμοποιώντας την εντολή Postprocessing > Global variable plots > Quantities to plot > Tind - 273.15 > x-axis data > expression > $t / 3600$ για να βγει σε ώρες.



Σχήμα 7.89. Κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα όταν χρησιμοποιούνται P.C.M.

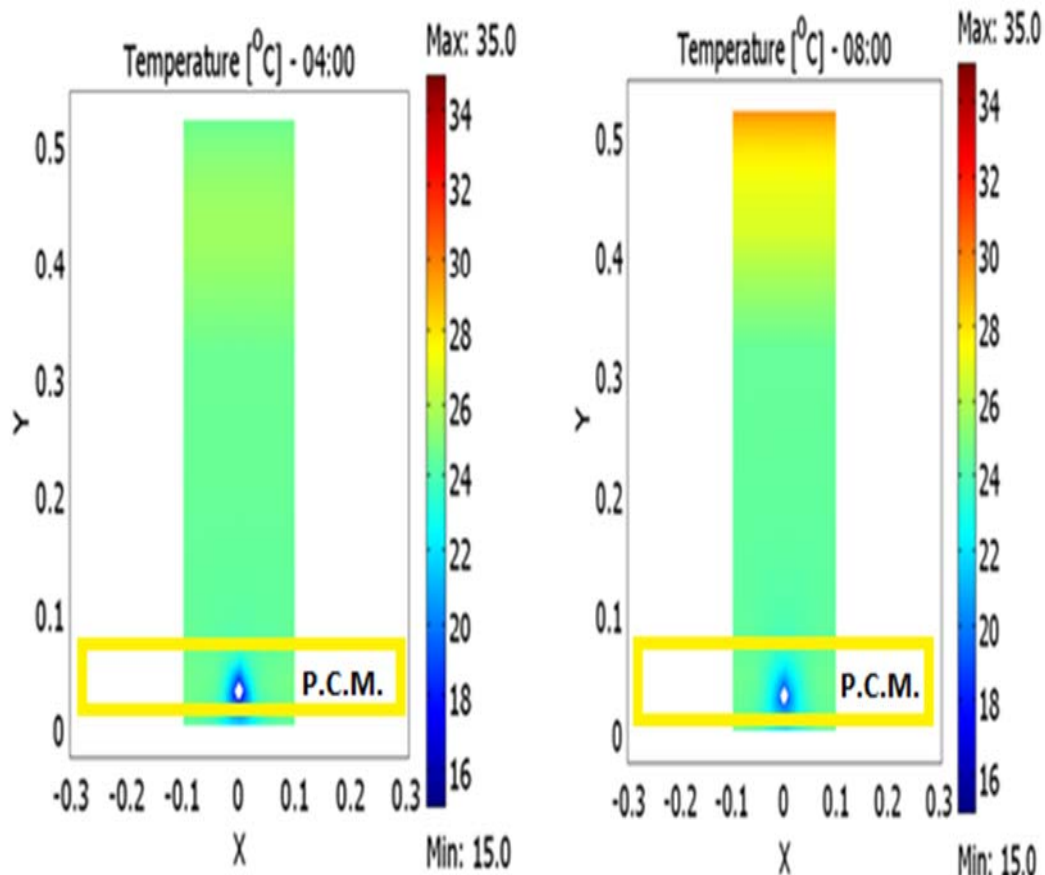
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος του σωλήνα ψύξης στη 01:00, στις 02:00 και στις 04:00. (Geom 3 > Post Processing > Domain Plot Parameters)



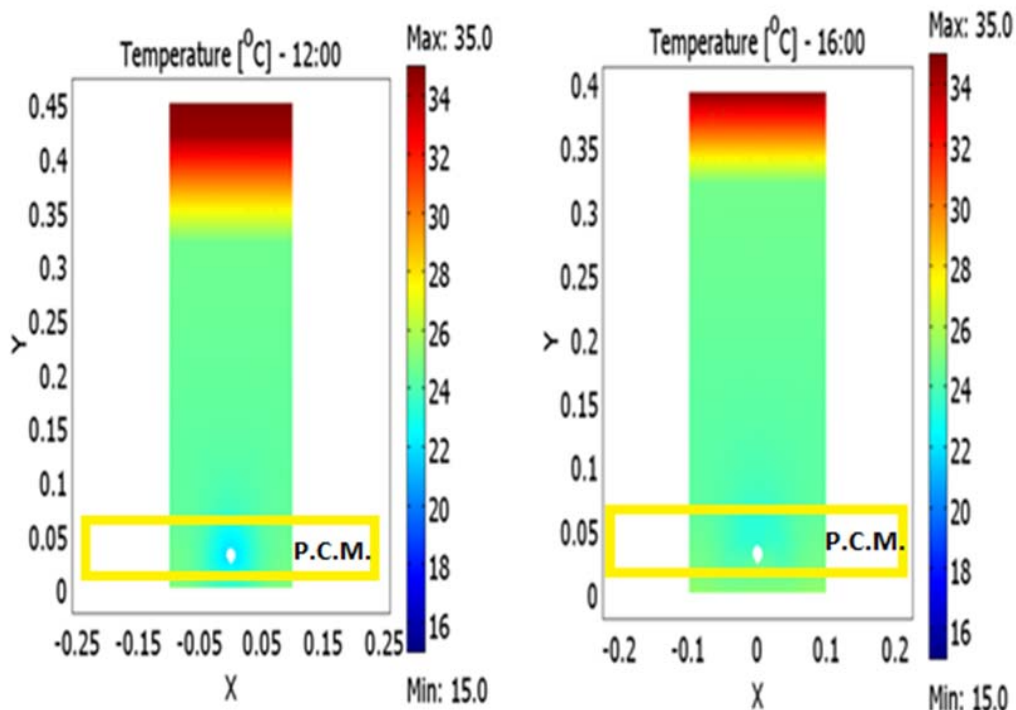
Σχήμα 7.90. Κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του σωλήνα ψύξης

Προκειμένου να απεικονιστεί η κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε στρώμα υλικού της οροφής, στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας σε μια διατομή της σε απόσταση $z = 0.5\text{m}$ από το σημείο εισόδου του νερού ψύξης κατά τις ώρες (α) 04:00, (β) 08:00, (γ) 12:00 και (δ) 16:00, χρησιμοποιώντας την εντολή (Post Processing > Cross Section Plot Parameters > Slice > Plane through three points > $z = 0.5$).

Όσον αφορά στην κατάσταση που βρίσκεται το P.C.M. στα παρακάτω σχήματα θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το P.C.M. είναι στη στερεή φάση για θερμοκρασίες από 18°C έως 22°C , ενώ είναι μίγμα υγρού στερεού για θερμοκρασίες από 22°C έως 26°C .

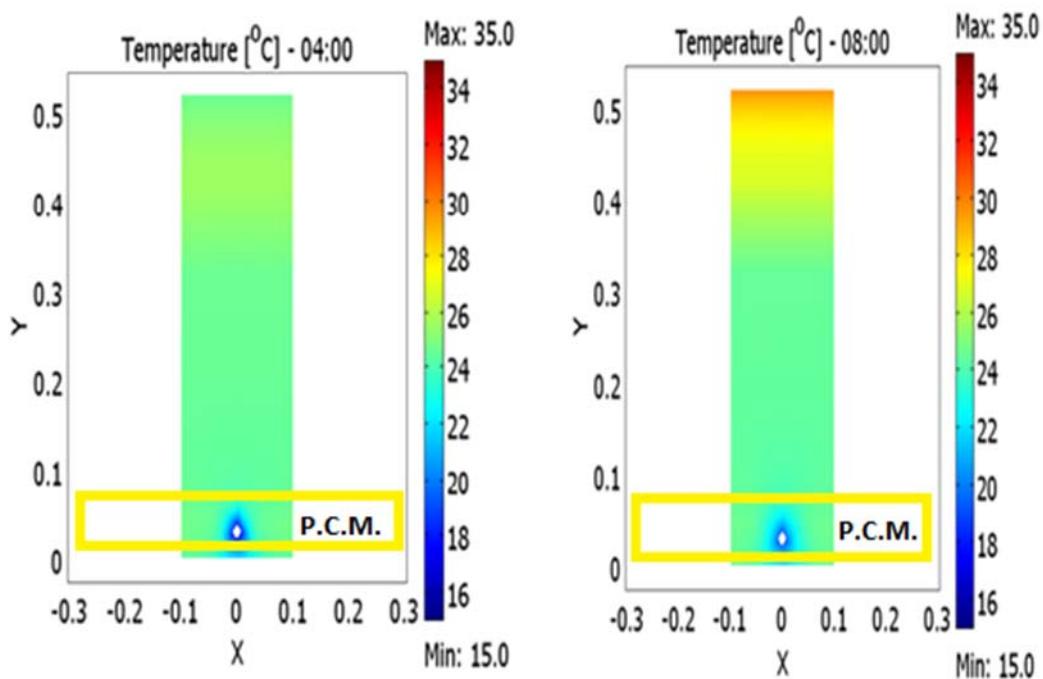


Το P.C.M. είναι στη στερεή κατάσταση γύρω από το σωλήνα ψύξης μέχρι και σε ακτίνα τριπλάσια από την ακτίνα του σωλήνα, ενώ στην υπόλοιπη έκταση του στρώματος είναι μίγμα ρευστού στερεού.

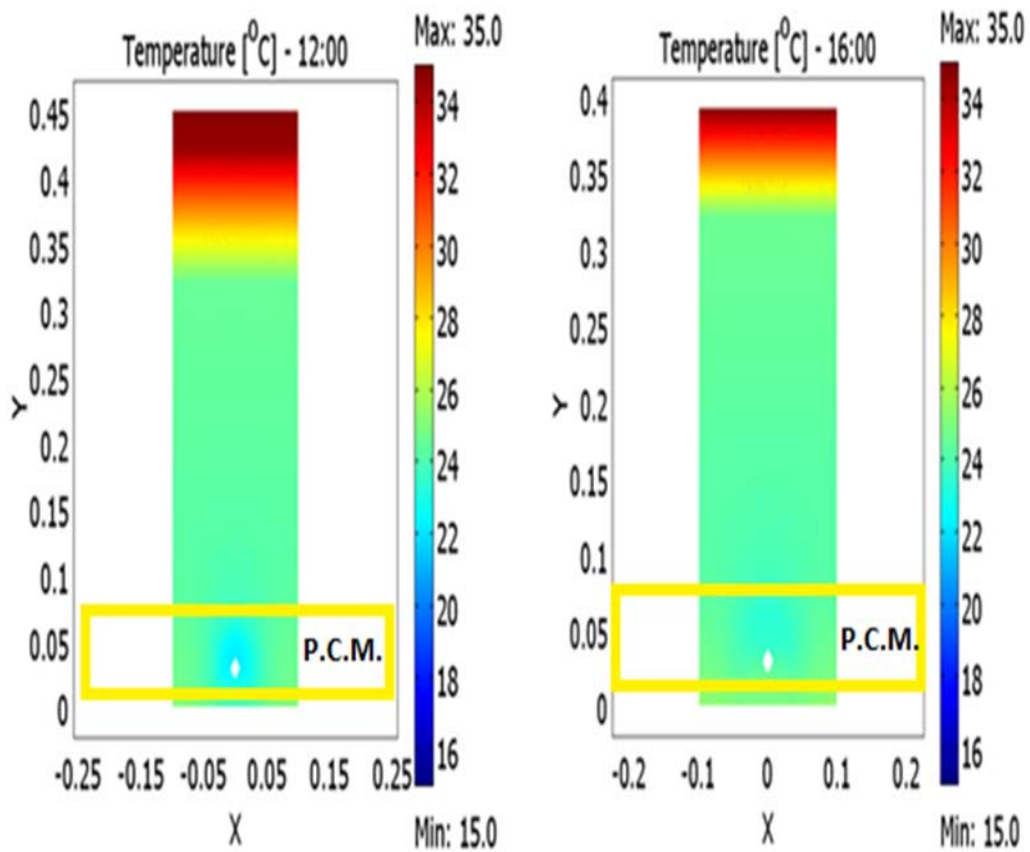


Το P.C.M. είναι μίγμα ρευστού στερεού σε όλη την έκταση του στρώματος.
 Σχήμα 7.91. Κατανομή της θερμοκρασίας της οροφής σε απόσταση $z = 0.5\text{m}$

Αντίστοιχα η κατανομή της θερμοκρασίας σε απόσταση $z = 5\text{m}$ τις ώρες (α) 04:00, (β) 08:00, (γ) 12:00 και (δ) 16:00 φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα:



Το P.C.M. είναι στη στερεή κατάσταση γύρω από το σωλήνα ψύξης μέχρι και σε ακτίνα τριπλάσια από την ακτίνα του σωλήνα, ενώ στην υπόλοιπη έκταση του στρώματος είναι μίγμα ρευστού στερεού.



Σχήμα 7.92. Κατανομή της θερμοκρασίας της οροφής σε απόσταση $z = 5\text{m}$.

Το P.C.M είναι μίγμα ρευστού στερεού σε όλη την έκταση του στρώματος.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης σε εφαρμογές ψύξης κτηρίων κατά τη διάρκεια θερμών καλοκαιρινών ημερών και η υπολογιστική προσομοίωσή της με χρήση του υπολογιστικού πακέτου COMSOL Multiphysics.

Συγκεκριμένα, εξετάζεται ένα σύστημα σωληνώσεων που βρίσκονται στην οροφή ενός διαμερίσματος, στο οποίο ρέει νερό ψύξης κατά τις νυχτερινές ώρες. Η θερμότητα αυτή αποθηκεύεται στα υλικά αλλαγής φάσης (P.C.M.) , τα οποία σε σχέση με τα συμβατικά υλικά δόμησης (τσιμέντο) έχουν μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα θερμότητας. Το θερμικό αυτό φορτίο αποδίδεται κατά τη διάρκεια της ημέρας για ψύξη, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό τις απαιτούμενες ηλεκτρικές καταναλώσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, επομένως και το συνολικό κόστος ψύξης.

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του συστήματος είναι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, η οποία εξασφαλίζει συνθήκες άνεσης στον εσωτερικό χώρο. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι εμφανές ότι το P.C.M. παρέχει ικανοποιητική θερμοκρασία στον ψυχόμενο χώρο, κατά τις ώρες λειτουργίας του, δηλαδή από τις 8:00 ως τις 00:00.

Κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, 00:00-8:00, το P.C.M. γύρω από το σωλήνα ψύξης στερεοποιείται, ενώ το υπόλοιπο είναι σε ημιστερεή κατάσταση. Ουσιαστικά, όντας σε αυτήν την κατάσταση, αποδίδει τη λαμβανόμενη ψύξη κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του αέρα δωματίου να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα κατά τη διάρκεια της ημέρας και χωρίς μεγάλες μεταβολές.

Η αλλαγή της κλίσης της καμπύλης της κατανομής θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου κατά τις πρωινές και τις βραδινές ώρες, οφείλεται στην ανατολή και τη δύση του ηλίου, αντίστοιχα, ενώ η απότομη αλλαγή στις 8:00 αντιστοιχεί στη διακοπή παροχής του ρευστού ψύξης.

Όπως φαίνεται από τις κατανομές θερμοκρασίας σε κάθε στρώμα του υλικού της οροφής, ανεξαρτήτως της απόστασης από το σημείο εισόδου του νερού ψύξης ($z = 0,5\text{m}$ και $z = 5\text{m}$) , το υλικό βρίσκεται στη στερεή κατάσταση γύρω από το σωλήνα ψύξης, ενώ στην υπόλοιπη έκτασή του είναι μίγμα ρευστού στερεού. Αυτό σημαίνει ότι οι συνθήκες αυτές δεν επιτρέπουν την πλήρη εκμετάλλευση της θερμοχωρητικότητας του υλικού αλλαγής φάσης. Πιθανή βελτίωση μπορεί να προκύψει με μείωση της απόστασης μεταξύ των σωλήνων ψύξης, καθώς και της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού ψύξης. Επίσης, θα μπορούσε να επιλεγεί ένα υλικό αλλαγής φάσης με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα και μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης.

Η εφαρμογή του συστήματος ψύξης οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας, αφού το υλικό αλλαγής φάσης έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει θερμότητα, η οποία είναι επαρκής για να καλύψει τα θερμικά φορτία. Κατά συνέπεια, δεν απαιτείται ή μπορεί να μειωθεί η χρήση κλιματισμού , καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου έχει αποφευχθεί. Πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι όταν χρησιμοποιείται συσκευή κλιματισμού καταναλώνεται επιπλέον ενέργεια από τις πιθανές επαναλαμβανόμενες διακοπές και τις επανεκκινήσεις του μηχανισμού κατά τη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας.

Επιπλέον, καθώς η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα και κατά συνέπεια δεν υπάρχει ανάγκη κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος για τη λειτουργία συσκευής ψύξης, μειώνονται οι αιχμές ζήτησης ενέργειας, πράγμα πολύ σημαντικό για την ομαλή λειτουργία των μονάδων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, το σύστημα ψύξης με υλικό αλλαγής φάσης στην οροφή βοηθά στην εξομάλυνση της καμπύλης κατανάλωσης ρεύματος, λόγω της μείωσης των ημερήσιων αιχμών φορτίου.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα από τη χρήση του συστήματος ψύξης οροφής είναι η βελτίωση του επιπέδου θερμικής άνεσης, διότι η υψηλή θερμοχωρητικότητα του υλικού αλλαγής φάσης αυξάνει την ομοιομορφία της θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C.Tzivanidis, ; K. A. Antonopoulos, E.Δ. Kravvaritis, “Transient Three-Dimensional Numerical Solution of Night Ceiling Cooling Using PCM-Embedded Piping”, J. Energy Eng. 2011, 137: 177-186.
- [2] X. Τζιβανίδης, « Σημειώσεις για το μάθημα Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων », Σημειώσεις Ε.Μ.Π., σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, Μάιος 2006
- [3] Γεώργιος Μπεργελές, « Υπολογιστική Ρευστομηχανική », Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα 2006
- [4] E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind, R. Letan, Numerical and experimental study of melting in a spherical shell, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 2007, p. 1790-1804.
- [5] E. Assis, L. Katsman, G. Ziskind, R. Letan « Numerical and experimental study of melting in a spherical shell », Heat Transfer Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Pearlstone Center for Aeronautical Studies, Ben-Gurion University of the Negev, Israel, January 2006
- [6] Atul Sharma , V.V. Tyagi , C.R. Chen , D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, October 2007
- [7] Zhang Yinping, Jiang Yi and Jiang Yi, A simple method, the T –history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, Measurement and Science Technology, 10, 1999, p. 201-205.
- [8] Harald Mehling, Luisa F. Cabeza, “Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications”, Chapter 3: Determination of physical and technical properties, Springer Berlin Heidelberg publications (2008).
- [9] Belen Zalba, Jose Marina, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, « Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications », October 2002
- [10] ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS 1993