



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Μάθημα: Ηλιακή Ενέργεια

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**"ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΩΣ ΜΕΣΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ
ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΜΟΝΩΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ."**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ: Ντάβου Έρικα

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: Κος Χρήστος Τζιβανίδης, Λέκτορας Ε.Μ.Πολυτεχνείου

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2009

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά από καρδιάς τον επιβλέποντα του παρόντος πονήματος και Λέκτορα του τομέα θερμότητας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Κύριο Χρήστο Τζιβανίδη για την ουσιαστική του καθοδήγηση, τις επιστημονικές συμβουλές και την γενικότερη ενθάρρυνση που μου προσέφερε, αφιερώνοντας γενναιόδωρα το χρόνο του στην επίλυση αποριών μου σε καίρια σημεία της μελέτης.

Ευχαριστώ ,ακόμη, τον Κύριο Κίμωνα Αντωνόπουλο, Καθηγητή του τομέα θερμότητας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την ακρόαση της παρούσης εργασίας και τη γενικότερη διάθεση συνεργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για όλη την ενθάρρυνση και υποστήριξή τους στην ακαδημαϊκή μου πρόοδο και στην εκπόνηση της παρούσης εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι δισκελής. Το πρώτο μέρος της είναι κατά βάση θεωρητικό. Αρχικά, γίνεται αναφορά στο σύγχρονο ενεργειακό πρόβλημα, το οποίο είναι σήμερα εντονότερο από ποτέ και παρουσιάζονται οι λόγοι για τους οποίους καθίσταται αναγκαία η στροφή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στον κτιριακό τομέα.

Στη συνέχεια, εισάγονται οι έννοιες του φαινομένου αλλαγής φάσης, της ενθαλπίας τήξεως και άλλων, για να παρουσιαστούν στη συνέχεια τα υλικά αλλαγής φάσης. Δίνεται ο ορισμός τους, οι ιδιότητές τους, γίνεται κατηγοριοποίησή τους κ.λπ. Ιδιαίτερη αναλυτική και εκτεταμένη παρουσίαση γίνεται στις εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης καθώς παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η χρήση τους ως μέσα διαχείρισης και εξοικονόμησης ενέργειας.

Ξεχωριστό κεφάλαιο αφιερώνεται στη θερμομόνωση των κτιριακών κελυφών καθώς αποτελεί τον πυρήνα γύρω από τον οποίο κινείται η μελέτη του δεύτερου μέρους.

Το δεύτερο μέρος είναι υπολογιστικό. Αρχικά, παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο που διέπει την μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας και την υπολογιστική μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης που την εκφράζει, και είναι απαραίτητο για τη κατανόηση του κώδικα που χρησιμοποιείται εν συνεχεία στη μελέτη.

Έπειτα, παρουσιάζονται οι σχέσεις που διέπουν την μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας και εισάγονται στον κώδικα, και στη συνέχεια συντάσσεται υπολογιστικό πρόγραμμα σε γλώσσα FORTRAN. Σκοπός του προγράμματος είναι η μελέτη της αγωγής θερμότητας από και προς το εσωτερικό κτιριακού κελύφους κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο.

Στόχος της μελέτης του δεύτερου μέρους, είναι η κατ'αρχήν η επιλογή του καταλληλότερου υλικού αλλαγής φάσης για εφαρμογή στην τοιχοποιία στην περιοχή των Αθηνών. Αφού γίνει επιλογή με κριτήριο τη μικρότερη δυνατή θερμοκρασιακή διακύμανση στο εσωτερικό του κτιρίου, μελετάται η θερμική συμπεριφορά του επιλεχθέντος υλικού σε διάφορες συνθήκες και συγκρίνεται με την αντίστοιχη συμβατική μόνωση που βρίσκεται από την σχετική βιβλιογραφία.

Στο τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων, γίνεται σύγκριση και γράφονται τα αντίστοιχα σχόλια, ενώ παρουσιάζονται γενικά συμπεράσματα από την μελέτη και αναφέρονται κάποιες ιδέες για περαιτέρω μελέτη του θέματος, με εφελτήριο το παρόν πόνημα, καθώς οι εφαρμογές των υλικών αλλαγής φάσης βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο επίπεδο, δίνοντας τη δυνατότητα για εκτεταμένη έρευνα και πείραμα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ:

1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	8
1.1.Σύγχρονο Ενεργειακό Πρόβλημα.....	8
1.2.Εξοικονόμηση Ενέργειας στα κτίρια με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	11
2. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ.....	14
2.1.Φαινόμενο αλλαγής φάσης.....	14
2.2.Ορισμός υλικών αλλαγής φάσης(PCMs).....	17
2.3.Σύντομη Ιστορική αναδρομή-εξέλιξη.....	18
2.4.Ιδιότητες των PCMs.....	22
2.5.Κατηγοριοποίηση PCM.....	26
2.5.1.Οργανικά υλικά.....	27
2.5.1.1. Παραφίνες.....	28
2.5.1.2. Λιπαρά οξέα.....	29
2.5.2.Ανόργανα υλικά.....	31
2.5.2.1 Ένυδρα άλατα.....	31
2.5.2.2 Άλας GLAUBER.....	32
2.5.3.Εύτηκτα μίγματα.....	33
2.6.Εφαρμογές PCMs.....	34
2.6.1.Συσκευασία PCMs.....	34
2.6.2.Συστήματα αποθήκευσης μη άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς θερμότητας.....	35
2.6.3.Συστήματα αποθήκευσης άμεσης επαφής με το μέσο μεταφοράς θερμότητας.....	36
2.6.4.Εφαρμογή PCMs στα κτίρια.....	36
2.6.5.Συσκευασίες για μεταφορές προϊόντων.....	43
2.6.6.Ηλεκτρονικές εφαρμογές.....	44
2.6.7.Εφαρμογές σε οχήματα.....	46
2.6.8.Θερμική ένδυση.....	47
2.6.9.Εφαρμογή σε φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	48
2.6.10.Ηλιακά συστήματα.....	49
2.6.11.Σύστημα κλιματισμού.....	49
2.6.12.Σύστημα νυχτερινού δροσισμού με PCMs.....	50

3. ΜΟΝΩΣΗ ΣΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ PCM.....	53
3.1. Σημασία μονώσεως στα κτίρια	53
3.2. Μελέτη και σχεδιασμός θερμομονώσεως κτιρίου.....	55
3.2.1. Θερμομόνωση εξωτερικής τοιχοποιίας.....	57
3.2.2. Θερμομόνωση επίπεδης οροφής από οπλισμένο σκυρόδεμα..	59
3.3. Θερμομονωτικά υλικά.....	61
3.4. Τα υλικά αλλαγής φάσης (PCMs) ως θερμομονωτικά υλικά.....	62

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ:

4. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ-

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ.....	65
4.1. Φαινόμενο αγωγής θερμότητας.....	65
4.2. Μεταβατική αγωγή θερμότητας.....	68
4.3. Μέθοδοι επίλυσης διαφορικής εξίσωσης μεταβατικής αγωγής θερμότητας.....	69
4.3.1. Αναλυτική επίλυση.....	69
4.3.2. Συναρτήσεις μεταφοράς.....	70
4.3.3. Αριθμητική επίλυση.....	71
4.4. Μέθοδοι διακριτοποίησης διαφορικών εξισώσεων.....	72
4.4.1. Μεταβολική μέθοδος.....	72
4.4.2. Μέθοδος σταθμισμένων υπολοίπων.....	73
4.4.3. Μέθοδος όγκου αναφοράς.....	73
4.4.4. Μέθοδος σειράς Taylor.....	74
4.5. Γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών.....	76
4.5.1. Άμεση διατύπωση.....	78
4.5.2. Έμμεση διατύπωση.....	79
4.5.3. Διατύπωση Crank-Nicolson.....	79
4.5.4. Οριακές συνθήκες.....	80
4.6. Επίλυση συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών.....	82
4.6.1. Μέθοδος αντιστροφής μητρώου.....	82
4.6.2. Επίλυση γραμμικών εξισώσεων τριδιαγωνίας μορφής(TDMA)...	83
4.6.3. Μέθοδος Gauss-Seidel.....	83

5.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ PCM ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ.....	85
5.1.Περιγραφή στόχου.....	85
5.2.Σχέσεις που διέπουν τη μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας στις οποίες βασίζεται ο κώδικας και η μορφή τους σε αυτόν.....	86
5.3.Περιγραφή κτιριακού κελύφους του προβλήματος.....	90
5.4.Επεξήγηση μεταβλητών που εμφανίζονται στο πρόγραμμα.....	92
5.5.Λογικό διάγραμμα του κώδικα.....	93
5.6.Αναλυτική παρουσίαση του κώδικα.....	94
6.ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ,ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ,ΣΧΟΛΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ.	
6.1.Αποτελέσματα του κώδικα για PCM με διάφορα σημεία τήξεως και επιλογή του καταλληλότερου για την περιοχή των Αθηνών.....	112
6.2.Επιλογή καταλληλότερου PCM.....	116
6.3.Σύγκριση κτιριακού κελύφους με PCM,με μη μονωμένο κτιριακό κέλυφος.....	118
6.4.Θερμική συμπεριφορά του PCM που επιλέχθη,κατά το χειμερινό μήνα Φεβρουάριο και σύγκρισή του με απλή μόνωση.....	120
6.5.Σύγκριση κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C με κτιριακό κέλυφος με απλή μόνωση ίδιου πάχους κατά το μήνα Ιούλιο.....	124
6.6.Θερμική συμπεριφορά PCM σε κτιριακό κέλυφος με εσωτερικό φορτίο Q.....	127
6.7.Εφαρμογή του PCM στο δεύτερο (εξωτερικό) στρώμα του τοίχου και της οροφής και σύγκρισή του με την απλή μόνωση για καλοκαίρι και χειμώνα.....	130
6.8 Εφαρμογή του PCM σε διπλό τοίχο και σύγκρισή του με απλή μόνωση.....	136
7.Γενικά συμπεράσματα.....	140
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	142

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

1.1.ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Ο 20ος αιώνας αποτέλεσε την περίοδο των εντονότερων μεταβολών που έχει καταγράψει ως τώρα η ιστορία, τον «αιώνα του εμφράγματος» όπως θα μπορούσαμε να πούμε, εξαιτίας του ραγδαίου ρυθμού εξέλιξης των γεγονότων. Το θέμα της ενέργειας, που παραμένει στο επίκεντρο του αιώνα αυτού και θα καθορίσει αναμφίβολα τις εξελίξεις του επόμενου, μπορεί να προσεγγιστεί από τρεις διαφορετικές απόψεις:

- Της εξασφάλισης της αναγκαίας ποσότητας ενέργειας, στην κατάλληλη για την κάθε χρήση μορφή, δηλαδή της *ενεργειακής επάρκειας*.
- Του *κόστους* αυτής της ενέργειας.
- Των *περιβαλλοντικών επιπτώσεων* από τη χρήση της.

Αυτές οι τρεις απόψεις συνθέτουν ό,τι έχει γίνει ευρύτερα γνωστό με τον όρο «ενεργειακό πρόβλημα».

Όλες οι κοινωνίες χρησιμοποιούν εκείνες τις πηγές ενέργειας που είναι διαθέσιμες στο περιβάλλον τους. Ο ήλιος και τα δάση έδωσαν την ενέργεια τους στον άνθρωπο για πολλά χρόνια. Μόνο πριν 5.000 χρόνια οι άνθρωποι άρχισαν να χρησιμοποιούν άλλες πηγές ενέργειας. Πρώτοι οι Αιγύπτιοι συνέλεξαν πετρέλαιο που επέπλεε στην επιφάνεια των λιμνών. Έκαιγαν το πετρέλαιο για φωτισμό. Αμερικανοί ινδιάνοι χρησιμοποιούσαν τον άνθρακα για να ψήσουν δοχεία αργίλου. Οι αρχαίοι Κινέζοι χρησιμοποιούσαν το φυσικό αέριο για να θερμάνουν το νερό της θάλασσας και να παράγουν αλάτι. Διοχέτευαν το αέριο με σωλήνες από ρηχά φρεάτια. Το ίδιο χρονικό διάστημα οι άνθρωποι άρχισαν να χρησιμοποιούν τη γεωθερμική ενέργεια. Διοχέτευαν με σωλήνες το καυτό νερό από τις ζεστές πηγές στα σπίτια τους και το χρησιμοποιούσαν για θέρμανση. Μέχρι τις αρχές του 19ου αιώνα η χρήση του φωτιστικού πετρελαίου στις ΗΠΑ βρισκόταν στο ίδιο επίπεδο που την είχαν αφήσει οι αρχαίοι Έλληνες και οι Ρωμαίοι. Το 1829 στο Κεντάκι των ΗΠΑ αναβλύζει η πρώτη πετρελαιοπηγή ενώ η πρώτη γεώτρηση ειδικά για την αναζήτηση πετρελαίου έγινε από τον Έντγουιν Ντρέικ στην δυτική Πενσυλβάνια τον Αύγουστο του 1859 και σε βάθος 21 μέτρων, με ρυθμό 20 βαρέλια ημερησίως. Έτσι άνοιξε τον δρόμο στη βιομηχανία πετρελαίου. Την ίδια περίπου περίοδο πετρελαϊκά πεδία ανακαλύφθηκαν στην Ευρώπη και την Άπω Ανατολή.

Με την αρχή του 20ου αιώνα η Βιομηχανική Επανάσταση, που χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση του αυτοκινήτου, είχε προχωρήσει τόσο πολύ ώστε το επεξεργασμένο πετρέλαιο για φωτιστική χρήση έπαυε να έχει την πρώτη σημασία και η πετρελαϊκή βιομηχανία έγινε η πρώτη πηγή ενέργειας στον κόσμο. Η ενεργειακή εξάρτηση από το πετρέλαιο και τα παράγωγα του γίνεται ολοένα και πιο έντονη. Σήμερα το πετρέλαιο αποτελεί σημαντική πρώτη ύλη στην βιομηχανία των πετροχημικών, αλλά την μεγαλύτερη εφαρμογή βρίσκει στην παραγωγή ενέργειας, από την οποία εξαρτάται το παρόν και το μέλλον της παγκόσμιας οικονομίας. Το ενεργειακό πρόβλημα με τη μορφή που το ξέρουμε σήμερα είναι σχετικά πρόσφατο. Η ανθρωπότητα επί δύο περίπου αιώνες ζούσε και κατανάλωνε ενέργεια με μια αφελή ανεμελιά, έως ό,του περί το 1960-70 συνειδητοποιήσαμε όλοι μας δύο πράγματα: πρώτον ότι τα ορυκτά καύσιμα, άνθρακας και πετρέλαιο, έχουν πεπερασμένα αποθέματα και δεύτερον ότι η καύση τους προξενεί ανεπανόρθωτες αλλοιώσεις στο κλίμα και κατ' επέκταση στη σύσταση και τη μορφή του πλανήτη. Έτσι

γίναμε γνώστες των δύο προβλημάτων τα οποία συνδέονται με την ενέργεια που καθημερινά αναλώνουμε: του Ενεργειακού και του Οικολογικού.

Το οικολογικό πρόβλημα δημιουργείται με την καύση των ορυκτών καυσίμων όπως του άνθρακα, του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και άλλων, και την έκλυση στην ατμόσφαιρα μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα τα οποία είναι υπεύθυνα για πολλά κλιματικά φαινόμενα με κύριο το φαινόμενο του θερμοκηπίου που υπερθερμαίνει τον πλανήτη και προκαλεί τις παρατηρούμενες ήδη σήμερα κλιματικές αλλαγές. Παράλληλα η ρύπανση της ατμόσφαιρας με τα δύο αέρια, μαζί και με τα στερεά αιωρούμενα σωματίδια τα οποία επίσης εκλύονται κατά την καύση, ή και από άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες, επιδρούν στη ζωή και την παρουσία πολλών ειδών της χλωρίδας και της πανίδας της γης.

Σε ο,τι αφορά στο ενεργειακό πρόβλημα, αυτό συνίσταται πρωτίστως στην έλλειψη ενεργειακής, καθώς και στο κόστος εξασφάλισης και διανομής της. Η έλλειψη αυτή, ή εν πάση περιπτώσει η βέβαιη εκτίμηση ότι σε σύντομο σχετικά διάστημα θα στερέψουν τα καύσιμα που παράγουν την ενέργεια, δημιουργεί μια εφιαλτική προοπτική καθολικής κατάρρευσης του επιπέδου ζωής και του πολιτισμού μας, εκτός αν βρεθούν εγκαίρως άλλες πηγές ενέργειας ικανές να καλύψουν το κενό που αναπόφευκτα αργά ή γρήγορα θα δημιουργηθεί. Στις μέρες μας, υπάρχουν περίπου 1500 κοιτάσματα πετρελαίου μεγάλου και γιγαντιαίου μεγέθους στον κόσμο. Περιέχουν το 94% του γνωστού αργού πετρελαίου. Τα 400 μεγαλύτερα κοιτάσματα περιέχουν το 60-70% της συνολικής ποσότητας. Μόνο 41 απ' αυτά τα τελευταία ανακαλύφθηκαν μετά το 1980. Σύμφωνα με τους Βρετανούς ειδικούς πλέον ο πλανήτης ολόκληρος έχει ερευνηθεί εξαντλητικά και έτσι έχει καταστεί σαφές ότι δεν υπάρχουν άλλα κοιτάσματα σε νέες περιοχές που να μπορούν να συγκριθούν με εκείνα της Βόρειας Θάλασσας και της Αλάσκας και να μην έχουν ανακαλυφθεί. Η Αμερικανική Γεωλογική Επιθεώρηση συμφωνεί μ' αυτή την άποψη και αναφέρει ότι η ανακάλυψη σημαντικών κοιτασμάτων πετρελαίου κορυφώθηκε το 1962 και έκτοτε βρίσκεται σε πτώση. Η χρυσή εποχή του πετρελαίου έχει τελειώσει. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν θα συνεχίσουν να ανακαλύπτονται νέα μικρότερα κοιτάσματα, αλλά δεν θα επαρκούν ώστε να αντισταθμίσουν τη συνεχιζόμενη μείωση στα παγκόσμια αποδεδειγμένα αποθέματα. Οι γνώμες όλων των ειδικών μέχρι σήμερα επομένως, συγκλίνουν στο γεγονός ότι σε περίπου 30 χρόνια από τώρα η κρίση θα έχει εκδηλωθεί και θα βρίσκεται στο αποκορύφωμά της. Τα πρώτα συμπτώματα αρχίζουν να γίνονται ορατά από τώρα που παρατηρούμε μια συχνή αύξηση της τιμής του πετρελαίου.[1]

Η χώρα μας, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, ακολούθησε μια τακτική αύξησης της κατανάλωσης εισαγόμενου πετρελαίου με αποτέλεσμα σήμερα το πετρέλαιο ν' αντιπροσωπεύει περισσότερο του 70% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης, με προοπτική, εάν δεν ληφθούν μέτρα, σε 10 χρόνια το ποσοστό να έχει αυξηθεί στα 75% και σε 15 χρόνια στο 80%. Δηλαδή με μαθηματική ακρίβεια οδηγούμεθα σε μία πλήρη ομηρεία της χώρας από εισαγωγές αργού. Ενώ το ποσοστό του πετρελαίου στην τελική ενεργειακή κατανάλωση της χώρας μειώθηκε από 77,6% το 1973 στο 70,0% το 1998, υπό την πίεση μέτρων και ακριβών τιμών, τελευταία έχει αρχίσει πάλι ν' αυξάνεται. Παρατηρούμε επομένως, ότι σε σύγκριση με άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Ελλάδα εμφανίζεται από τις πλέον εξαρτώμενες από εισαγωγές πετρελαίου αφού ο μέσος Ευρωπαϊκός όρος εξάρτησης κυμαίνεται μεταξύ 40%-50%. Για λόγους σύγκρισης αξίζει ν' αναφέρουμε ότι η εξάρτηση από εισαγωγές πετρελαίου για την Γερμανία 53,0%, την Ιταλία 51,0%, για την Ισπανία 65,6% για την

Σουηδία 41,0% και για την Αυστρία 46,0%. Επιπροσθέτως, από το έτος 2007 η Ελλάδα ξεπέρασε και επίσημα το όριο αύξησης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα, η Ελλάδα είχε το δικαίωμα βάσει της παγκόσμιας συνθήκης του Κιότο που στοχεύει στην καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, μέχρι το 2010 να αυξήσει τις εκπομπές της κατά 25% σε σχέση με το έτος βάσης (1990). Παρά το γεγονός ότι η Ελλάδα είχε δικαίωμα συγκεκριμένης αύξησης των εκπομπών, ακόμα και αυτό το όριο ξεπεράστηκε. Σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, κατά το 2005 η Ελλάδα αύξησε τις εκπομπές της κατά 25,4%, δηλαδή 0,4% πάνω από το όριο που μας είχε τεθεί. Έτσι, η συνολική αύξηση έως το 2010 προβλέπεται να είναι ακόμα μεγαλύτερη, καθώς δεν έχουν ληφθεί τα απαραίτητα μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας, προώθησης των ΑΠΕ, και μείωσης των εκπομπών. Ως εκ τούτου, θεωρείται αναγκαία όσο ποτέ άλλοτε η πλήρης αναθεώρηση της σήμερα ακολουθούμενης ενεργειακής πολιτικής. Βασικός άξονας θα πρέπει να είναι η σταδιακή απεξάρτηση της χώρας από το εισαγόμενο πετρέλαιο, σε επίπεδα που θα πλησιάζουν τουλάχιστον τον μέσο όρο της Ε.Ε., με την παράλληλη ανάπτυξη των εγχώριων πηγών ενέργειας, συμβατικών και μη.

Συμπερασματικά, καθίσταται πλέον επιτακτική η ανάγκη στροφής σε άλλες πηγές ενέργειας που θα απεξαρτοποιήσουν τόσο τη χώρα μας όσο και ολόκληρο τον κόσμο από τα ρυπογόνα και πεπερασμένα ορυκτά καύσιμα καθώς και την επικινδυνή, εξαιτίας της σχετικής άγνοιας της ασφαλούς χρήσεως της, πυρηνικής ενέργειας. Είναι συνεπώς απαραίτητη η στροφή στην ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ως ανανεώσιμες χαρακτηρίζονται οι πηγές που θα συνεχίζουν να μας παρέχουν ενέργεια σε βάθος χρόνου. Είναι οι πηγές ενέργειας που τροφοδοτούνται συνεχώς με ενέργεια από τον ήλιο, όπως: ο ίδιος ο ήλιος (ηλιακή ενέργεια), ο άνεμος (αιολική ενέργεια), οι υδατοπτώσεις (υδροηλεκτρική ενέργεια), η ενέργεια των κυμάτων, ρευμάτων, ωκεανών καθώς και η ενέργεια βιομάζας.

Στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανήκει και η γεωθερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και σχετίζεται με την ηφαιστειότητα και τις ειδικότερες γεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Η χρήση των ανανεώσιμων ή εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι ακόμη πολύ περιορισμένη σε παγκόσμια κλίμακα, εξυπηρετεί όμως το στόχο της προστασίας του περιβάλλοντος, γιατί είναι "καθαρές" και φιλικές προς το περιβάλλον.

Η *ηλεκτροπαραγωγή* από ΑΠΕ αφορά κυρίως σε Αιολικά πάρκα και Μικρά Υδροηλεκτρικά έργα και σε ένα μικρότερο βαθμό στη βιομάζα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, ενώ στο μέλλον αναμένεται ότι θα αφορά και στη γεωθερμία. Η παραγωγή θερμικής ενέργειας αναφέρεται κυρίως σε θερμικά ηλιακά συστήματα και θερμική χρήση της βιομάζας και της γεωθερμίας.

Στις *μεταφορές* οι ΑΠΕ εφαρμόζονται με τη χρήση των λεγόμενων υγρών βιοκαυσίμων. Τα βιοκάυσιμα συνιστά το λεγόμενο βιοντίζελ (παραγωγή από φυτικά λάδια πιθανόν και χρησιμοποιημένα μαγειρικά), που είναι υποκατάστατο ντίζελ, και η βιοαιθανόλη (από σακχαρώδεις ενώσεις, σιτηρά, ζαχαροκάλαμα, καλαμπόκι), που αποτελεί υποκατάστατο βενζίνης.

Η *συμπαράγωγή και πολυπαραγωγή* για βέλτιστη εκμετάλλευση των καυσίμων αφορά στην ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για θέρμανση και ψύξη, παραγωγή ατμού, παραγωγή πόσιμου νερού κλπ. Μελλοντικά ενδιαφέρουσες τεχνολογίες είναι οι τεχνολογίες υδρογόνου, οι κυψελίδες καυσίμου για συμπαράγωγή και τις μεταφορές και η παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ.[2],[3].

1.2.ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.

Ο κτιριακός τομέας είναι υπεύθυνος για το 40% περίπου της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Η κατανάλωση αυτή, είτε σε μορφή θερμικής (κυρίως πετρέλαιο) είτε σε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα εκτός της σημαντικής οικονομικής επιβάρυνσης λόγω του υψηλού κόστους της ενέργειας, τη μεγάλη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους, κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), που όπως προείπαμε ευθύνεται κατά κύριο λόγο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια στην Ελλάδα παρουσιάζει αυξητική τάση λόγω της αύξησης της χρήσης κλιματιστικών και μικροσυσκευών. Η χρήση των κλιματιστικών αποτελεί σημαντικό παράγοντα αύξησης του ηλεκτρικού φορτίου αιχμής στη χώρα με τεράστιες οικονομικές συνέπειες και σημαντική επιβάρυνση του καταναλωτή. Επιπλέον, τα κλιματιστικά επιδεινώνουν το φαινόμενο της υπερθέρμανσης των αστικών κέντρων και τις συνεπαγόμενες δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν το καλοκαίρι.

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτίριο εξασφαλίζεται εν μέρει με τον κατάλληλο σχεδιασμό του κτιρίου και τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων, και εν μέρει μέσω της υψηλής αποδοτικότητας των εγκατεστημένων ενεργειακών συστημάτων, η οποία προϋποθέτει την άριστη ποιότητα του σχετικού εξοπλισμού και της εγκατάστασής του καθώς και των σχετικών τεχνικών μελετών που τον προδιαγράφουν. Άλλος ένας καθοριστικός παράγοντας εξοικονόμησης ενέργειας είναι η ενεργειακή διαχείριση του κτιρίου, μία συστηματική, οργανωμένη και συνεχής δραστηριότητα που αποτελείται από ένα προγραμματισμένο σύνολο διοικητικών, τεχνικών και οικονομικών δράσεων.

Οι επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα κτίριο μπορεί να αφορούν:

- Στο κτιριακό κέλυφος (π.χ.θερμομόνωση, κατάλληλα συστήματα ανοιγμάτων παθητικά ηλιακά συστήματα)
- Στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου (π.χ.χρήση βλάστησης)
- Στις εγκαταστάσεις θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού, ζεστού νερού και τις ηλεκτρικές συσκευές
- Στην ορθολογική χρήση του κτιρίου και την αξιοποίηση των δομικών του στοιχείων (π.χ.ενεργειακή διαχείριση, φυσικός αερισμός, αξιοποίηση της θερμικής μάζας)

Όσον αφορά στο σχεδιασμό του κτιρίου με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας προωθείται ο λεγόμενος *βιοκλιματικός σχεδιασμός* του κτιρίου. Πρόκειται για το σχεδιασμό ο οποίος λαμβάνοντας υπόψιν το κλίμα κάθε περιοχής στην οποία βρίσκεται το κτίριο, στοχεύει στην εξασφάλιση των απαραίτητων εσωκλιματικών συνθηκών (θερμική και οπτική άνεση, ποιότητα αέρα) με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, αξιοποιώντας τις διαθέσιμες περιβαλλοντικές πηγές (ήλιο,αέρα-άνεμο,νερό,έδαφος). Τεχνικές βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελούν η θερμική προστασία του κελύφους, τα παθητικά ηλιακά συστήματα, οι τεχνικές φυσικού δροσισμού και φυσικού φωτισμού και ορισμένες τεχνικές ορθολογικής χρήσης ενέργειας (θερμικές ζώνες, αποθήκευση θερμότητας στα δομικά στοιχεία του κτιρίου). Στην Ελλάδα τα βιοκλιματικά κτίρια, όπως προκύπτει από μετρήσεις,ενεργειακές καταγραφές και προσομοιώσεις, παρουσιάζουν εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 30% σε σχέση με συνήθη συμβατικά κτίρια, ενώ σε σχέση με παλαιότερα μη

μονωμένα κτίρια η αντίστοιχη εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται σε ποσοστό της τάξης του 80%.

Βασικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελούν:

-Θερμική προστασία των κτιρίων τόσο το χειμώνα, όσο και το καλοκαίρι με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών που εφαρμόζονται στο εξωτερικό κέλυφος των κτιρίων, ιδιαίτερα με την κατάλληλη θερμομόνωση και αεροστεγάνωση του κτιρίου και των ανοιγμάτων του.

-Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση των κτιρίων τη χειμερινή περίοδο και για φυσικό φωτισμό όλο το χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται με τον προσανατολισμό των χώρων και ιδιαίτερα των ανοιγμάτων (ο νότιος προσανατολισμός είναι ο καταλληλότερος) και την διαρρύθμιση των εσωτερικών χώρων ανάλογα με τις θερμικές τους ανάγκες και με τα παθητικά ηλιακά συστήματα που συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και αποτελούν «φυσικά» συστήματα θέρμανσης, αλλά και φωτισμού.

-Προστασία των κτιρίων από τον καλοκαιρινό ήλιο κυρίως μέσω της σκίασης, αλλά και της κατάλληλης κατασκευής του κελύφους.

-Απομάκρυνση της θερμότητας που το καλοκαίρι συσσωρεύεται μέσα στο κτίριο με φυσικό τρόπο προς το εξωτερικό περιβάλλον με συστήματα και τεχνικές παθητικού δροσισμού, όπως ο φυσικός αερισμός τις νυχτερινές ώρες.

-Εξασφάλιση επαρκούς φυσικού φωτισμού και ελέγχου της φωτεινής ακτινοβολίας ώστε να υπάρχει επάρκεια και ομαλή κατανομή του φωτός μέσα στους χώρους.

-Βελτίωση του κλίματος έξω και γύρω από τα κτίρια με τον βιοκλιματικό σχεδιασμό των εξωτερικών χώρων και εν γένει του δομημένου περιβάλλοντος ακολουθώντας όλες τις παραπάνω αρχές.

Το δεύτερο μέρος της παρούσας μελέτης αναφέρεται στη πρώτη από τις αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού που αναφέρθηκαν.

Η ηλιακή ενέργεια έχει σπουδαίες προοπτικές όσον αφορά στη χρήση της στα κτίρια, αφού η ηλιακή ακτινοβολία μετρούμενη σε ενεργειακές μονάδες υπολογίζεται να είναι 30000 φορές περισσότερη από αυτήν που πραγματικά έχει ανάγκη ο άνθρωπος. Η ποσότητα της ενέργειας που φθάνει σαν ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης σε ένα χρόνο υπολογίζεται πως είναι περίπου 1000 φορές η ενέργεια που αντλείται αν καούν όλα τα ορυκτά καύσιμα που θα έχουν εξορυχθεί κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου. Κατά συνέπεια, η χρήση ηλιακής ενέργειας στα κτίρια έχει εξαιρετικές προοπτικές να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Είναι επίσης καθαρή πηγή ενέργειας, χωρίς εκπομπές ρύπων, και φυσικά δωρεάν, άφθονη και ανανεώσιμη. Παρ'όλ' αυτά υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση της ηλιακής ενέργειας. Είναι απρόβλεπτη πηγή ενέργειας, από την άποψη της ηλιοφάνειας, είναι διακοπτόμενη και πολλές φορές για μεγάλα χρονικά διαστήματα (συννεφιά, χιόνι, βροχή). Εξ' αιτίας αυτών των απολύτως φυσικών λόγων, καθώς επίσης και λόγω του γεγονότος ότι από τις 8760 ώρες του έτους οι μισές περίπου είναι νύχτα για οποιοδήποτε μέρος στον πλανήτη, γίνεται προφανής η ανάγκη δημιουργίας ενός συστήματος ικανού να παράγει τέτοια χρονική καθυστέρηση στο φαινόμενο, ώστε η παροχή ενέργειας να μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση ανά πάσα στιγμή.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στα κτίρια μπορεί να γίνει με δυο είδη συστημάτων: τα ενεργητικά και τα παθητικά ηλιακά συστήματα.

Ενεργητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης ή δροσισμού είναι όσα παθητικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούν μηχανικά μέσα για τη θέρμανση ή δροσισμό του

εσωτερικού χώρου των κτιρίων. Τέτοια συστήματα είναι ιδίως ο ηλιακός συλλέκτης θερμού ύδατος, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τα υβριδικά συστήματα.

Αντιθέτως, όταν σε ένα κτίριο η ροή της θερμότητας γίνεται με φυσικούς τρόπους όπως δια της αγωγής, της συναγωγής και της ακτινοβολίας και η ηλιακή ενέργεια συνεισφέρει πάνω από το μισό της ολικής εξωτερικής ενέργειας που απαιτείται για θέρμανση, το κτίριο θεωρείται σαν ηλιακή παθητική κατασκευή. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα λειτουργούν χωρίς μηχανολογικά εξαρτήματα ή πρόσθετη παροχή ενέργειας και με φυσικό τρόπο θερμαίνουν, δροσίζουν αλλά και φωτίζουν τα κτίρια. Χωρίζονται επομένως σε τρεις κατηγορίες: τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης, φυσικού δροσισμού και φυσικού φωτισμού. Μπορεί, τέλος, να γίνει διάκριση των συστημάτων παθητικής συλλογής ενέργειας σε: συστήματα άμεσου ηλιακού κέρδους, έμμεσου ηλιακού κέρδους και συστήματα με θερμική συμπεριφορά θερμοκηπίου, μια διάκριση που αναφέρεται αποκλειστικά στην κατασκευή τους.[4],[5].

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ:

Υπάρχουν δυο τύποι συστημάτων θερμικής αποθήκευσης: συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας και συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας.

Αισθητή ονομάζεται η θερμότητα που προκαλεί αλλαγές στη θερμοκρασία ενός αντικειμένου, ενώ λανθάνουσα είναι η θερμότητα που επιφέρει αλλαγή στην κατάσταση (στερεή-υγρή-αέρια) αλλά δεν επιφέρει καμία αλλαγή στη θερμοκρασία. Για παράδειγμα το νερό παραμένει στους 100°C ενώ βράζει. Η θερμότητα που προστίθεται για να συνεχίσει η ατμοποίηση του νερού είναι λανθάνουσα θερμότητα.

Εκτενής έρευνα έχει διενεργηθεί επάνω στα υλικά και τα συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας και η τεχνολογία για τη χρήση τους είναι αρκετά ανεπτυγμένη. Ωστόσο, παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα όπως η περιορισμένη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου του μέσου αποθήκευσης και η μη ισοθερμική συμπεριφορά κατά την αποθήκευση και την απόδοση της θερμότητας, δηλαδή κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έτυχαν μεγάλης απήχησης κυρίως λόγω της ικανότητάς τους στην αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας σε σχετικά μικρό χώρο και του χαρακτηριστικού τους να αποθηκεύουν τη θερμότητα σε μια συγκεκριμένη σταθερή θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης της αποθηκευτικής ουσίας.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας τα οποία συνδυάζουν τη χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials PCMs), θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικά για την έρευνα, λόγω της μεγάλης αποθηκευτικής (από ενεργειακή άποψη) ικανότητάς τους.[5].

2. ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

2.1. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Η αλλαγή φάσης στη θερμοδυναμική είναι η διαδικασία μετάβασης ενός θερμοδυναμικού συστήματος από τη μια φάση σε κάποια άλλη, με ταυτόχρονη παρατήρηση μιας ραγδαίας αλλαγής σε μια ή περισσότερες φυσικές ιδιότητες του συστήματος και ειδικά στη θερμοχωρητικότητά του και με ταυτόχρονη μικρή μεταβολή σε άλλες ιδιότητες όπως η θερμοκρασία του.

Συνήθως, ο όρος *αλλαγή φάσης* αναφέρεται σε μεταβάσεις μεταξύ των τριών καταστάσεων στερεής-υγρής και αέριας, εξαιρώντας συνήθως την κατάσταση πλάσματος.

Οι αλλαγές φάσης μπορεί να αφορούν σε μεταβάσεις μεταξύ στερεής, υγρής και αέριας φάσης μιας ουσίας λόγω αλλαγών στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ή σε μετάβαση μεταξύ διαφορετικών μοριακών δομών (ιδίως για στερεά) όπως για παράδειγμα τη μετάβαση από μια άμορφη δομή σε μια κρυσταλλική ή τη μετάβαση μεταξύ δυο διαφορετικών κρυσταλλικών δομών.

Είναι δυνατόν σε κάποιες περιπτώσεις να εμφανιστεί αλλαγή κατάστασης μη αδιαβατικά με τέτοιο τρόπο ώστε το θερμοδυναμικό σύστημα να διέλθει τα όρια της αλλαγής φάσης, χωρίς να παρατηρείται η αλλαγή αυτή καθ' αυτή, όπως παρατηρείται στα φαινόμενα της υπέρψυξης (supercooling) και της υπερθέρμανσης (superheating). Η προκύπτουσα κατάσταση δεν είναι ενεργειακά σταθερή και χαρακτηρίζεται ως ενεργειακά ημί-σταθερή.

Οι αλλαγές φάσης προκύπτουν από την αποβολή ή την απορρόφηση λανθάνουσας θερμότητας. Είναι ευνόητο πως η μετάβαση από μια φάση σε μια άλλη δε γίνεται στιγμιαία αλλά σταδιακά αφού η ανταλλαγή αυτής της θερμότητας μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος δεν γίνεται στιγμιαία, επομένως το θερμοδυναμικό σύστημα κατά την αλλαγή της φάσης περνάει και από καταστάσεις μικτής φάσης, όπου ένα τμήμα του έχει ολοκληρώσει τη μετάβαση και το υπόλοιπο όχι.[6]

ΕΝΘΑΛΠΙΑ ΤΗΞΕΩΣ:

Ενθαλπία τήξεως ή *αλλιώς θερμότητα τήξεως* είναι το ποσό θερμικής ενέργειας το οποίο πρέπει να απορροφηθεί ή να εκλυθεί ώστε ένα mole μιας ουσίας να αλλάξει κατάσταση από στερεή σε υγρή ή αντίστροφα. Είναι γνωστή και ως *λανθάνουσα θερμότητα τήξης* ή *λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης* και η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η αλλαγή ονομάζεται *θερμοκρασία τήξεως*. Όταν αφαιρεθεί θερμότητα από ένα υγρό ή στερεό η θερμοκρασία πέφτει. Όταν προστεθεί θερμότητα η θερμοκρασία αυξάνεται. Ωστόσο, στο σημείο μετάβασης μεταξύ στερεού και υγρού (στο σημείο τήξεως), απαιτείται επιπλέον ενέργεια. Για τη μετάβαση από υγρή σε στερεή κατάσταση τα μόρια της ουσίας οφείλουν να τοποθετηθούν σε αυστηρότερη διάταξη 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 θερμότητα τήξεως μπορεί να παρατηρηθεί αν μετρήσουμε τη θερμοκρασία του νερού καθώς παγώνει. Αν βυθίσουμε ένα κλειστό δοχείο που περιέχει νερό σε θερμοκρασία δωματίου, σε ένα πολύ ψυχρό περιβάλλον (έστω στους -20°C), θα παρατηρήσουμε τη θερμοκρασία να πέφτει σταθερά μέχρι να φτάσει λίγο κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης του (0°C). 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 πάγου. Ο λόγος που η θερμοκρασία σταθεροποιείται στο σημείο πήξεως πριν την περαιτέρω πτώση της, είναι η θερμότητα τήξεως. Η ενέργεια της λανθάνουσας θερμότητας τήξεως πρέπει να αφαιρεθεί προτού η θερμοκρασία μπορέσει να συνεχίσει την πτώση της (το υγρό πρέπει να γίνει στερεό).

Μονάδα μέτρησης της λανθάνουσας θερμότητας τήξεως είναι:

- το kilojoule ανά kg [kJ/kg], ή επίσης joule/mole [J,mol] στο διεθνές σύστημα μονάδων,
- οι θερμίδες ανά γραμμάριο [cal/gr], σε παλαιό σύστημα μονάδων περιορισμένης πλέον χρήσεως πλην της χρήσεως των kcal στα θρεπτικά συστατικά τροφών και:
- British Thermal Units ή αλλιώς Btu ανά pound ή mole [Btu/lb ή [Btu/mol].

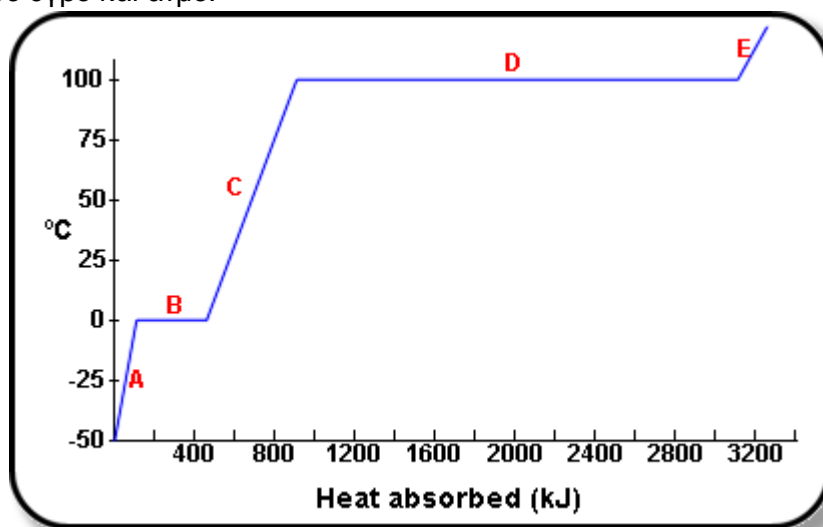
Η αποθηκευτική ικανότητα ενός υλικού αλλαγής φάσης που θερμαίνεται από θερμοκρασία T_1 σε T_2 , αν υφίσταται αλλαγή φάσης σε θερμοκρασία T^* , είναι το άθροισμα της μεταβολής της αισθητής θερμότητας του στερεού από T_1 σε T^* , της λανθάνουσας θερμότητας σε θερμοκρασία T^* και της μεταβολής της αισθητής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

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διαδικασία αλλαγής φάσης του νερού από πάγο (στερεό) σε υγρό και ατμό:



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα αλλαγής φάσης νερού

όπου: στην περιοχή A ο πάγος απορροφάει αισθητή θερμότητα και η θερμοκρασία του ανεβαίνει, στην περιοχή B γίνεται απορρόφηση λανθάνουσας θερμότητας τήξεως, στην περιοχή C η θερμοκρασία του υγρού πλέον νερού ανεβαίνει καθώς απορροφά εκ νέου αισθητή θερμότητα, στην περιοχή D το νερό βράζει και απορροφά λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης και τέλος στην περιοχή E ο ατμός απορροφά αισθητή θερμότητα και η θερμοκρασία του ανεβαίνει (υπέρθερμος ατμός). [7]

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ SUPERCOOLING(ΥΠΕΡΨΥΞΕΩΣ)

Ως φαινόμενο supercooling ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία η θερμοκρασία ενός υγρού ή αερίου μειώνεται κάτω από το σημείο ψύξεώς του(στερεοποίησης του), *χωρίς να γίνεται στερεό*. Το αποτέλεσμα είναι η λεγόμενη "μετασταθής κατάσταση". Ένα υγρό χαμηλότερα από το τυποποιημένο σημείο ψύξεως του θα δημιουργήσει κρυστάλλους στην παρουσία ενός παράγοντα διαμόρφωσης κρυσταλλικής δομής (πυρήνα κρυστάλλου). Ωστόσο, απουσία τέτοιου παραγοντα, η υγρή φάση μπορεί να διατηρηθεί μέχρι τη θερμοκρασία στην οποία προκύπτει ομογενής κρυσταλλική δομή στερεάς φάσης, πολύ χαμηλότερα (συνήθως) από τη θερμοκρασία στερεοποίησής του.

Συνήθως το φαινόμενο supercooling είναι ανεπιθύμητο, και στην περίπτωση υλικών αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας όσο εντείνεται τόσο λιγότερο αποδοτική κάνει την αξιοποίηση της αποθηκευμένης θερμότητας. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις στις οποίες το φαινόμενο αξιοποιείται και τέτοιες είναι: -Η υπεραγωγιμότητα, δηλαδή η μείωση της ηλεκτρομαγνητικής αντίστασης (σε Ohms) σχεδόν σε μηδενική, η οποία επιτρέπει ελάχιστη απώλεια ενέργειας και δίνει την δυνατότητα δημιουργίας ενός υπερμαγνήτη.

-Η εφαρμογή του φαινομένου στην βιομηχανία προϊόντων και τροφίμων, αλλά και στην συντήρηση οργάνων με τη μέθοδο της αστραπιαίας ψύξεως (flash freezing) όπου τα αντικείμενα ψύχονται απότομα στην έκθεσή τους σε κρυογόνες θερμοκρασίες και στερεοποιούνται. Ένα υπέρψυκτο υγρό δύναται να παραμείνει στην υγρή φάση αρκετά κάτω από το σημείο στερεοποίησης του όταν είναι καθαρό, χωρίς προσμίξεις ή άλλους παράγοντες και βρίσκεται σε δοχείο αρκετά λείο ούτως ώστε να μειωθούν οι πιθανότητες σχηματισμού αρχικού πυρήνα κρυστάλλου. Όταν όμως ελλείψει κάποιας από αυτές τις προϋποθέσεις ένα υπέρψυκτο υγρό μπει σε φάση στερεοποίησης, παρουσία αρχικού πυρήνα κρυστάλλου, τότε αυτή θα επέλθει σχεδόν ραγδαία.

Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, συχνά το φαινόμενο supercooling είναι ανεπιθύμητο όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της εμφάνισης του στα φτερά των διερχομένων από σύννεφα αεροπλάνων όπου σταγονίδια υπέρψυκτου νερού κρυσταλλώνουν απότομα κατά την επαφή τους με τα φτερά. Αυτό προκαλεί πρόβλημα στην άνωση επομένως αεροσκάφη που προορίζονται να πετάξουν σε τέτοιες συνθήκες είναι εφοδιασμένα με σύστημα αντιπηκτικό.

Κατά την ψύξη ενός δείγματος PCM, το φαινόμενο είναι εμφανές αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου όπου παρουσιάζεται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού PCM πριν την εκκίνηση της αλλαγής φάσης κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης (σχ.2.6,2.7). Κατά τη συνέχιση της ψύξεως 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. 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 και ο βαθμός supercooling. Θα πρέπει ακόμα να επισημανθεί ότι ο βαθμός του supercooling δεν είναι φυσική ιδιότητα του υλικού με σταθερή τιμή αλλά μεταβάλεται με διάφορες παραμέτρους όπως ο όγκος του δείγματος, η "καθαρότητα" του υλικού, ο ρυθμός ψύξης και η επιφάνεια του δοχείου αποθήκευσης.[8],[9],[10],[11].

2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται, αποθηκεύοντας θερμότητα σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας σε ένα μέρος του θερμοκρασιακού τους εύρους και συναλλάσσοντας θερμότητα με μορφή αισθητής θερμότητας σε ένα άλλο μέρος, ονομάζονται υλικά αλλαγής φάσης, ή στη διεθνή βιβλιογραφία phase change materials (PCMs). Πρόκειται επομένως για *αποθηκευτικά υλικά λανθάνουσας θερμότητας*, που χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα.

Ως υποψήφια PCMs θεωρούνται συνήθως υλικά που αλλάζουν μεταξύ στερεής και υγρής φάσης, αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σε ερευνητικό επίπεδο και υλικά που μεταβαίνουν από τη μια φάση στην άλλη με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Τα υλικά που μεταπίπτουν σε αέρια κατάσταση κατά την αλλαγή φάσης δεν ενδιαφέρουν λόγω των πρακτικών δυσκολιών που παρουσιάζει η μεγάλη αλλαγή της πυκνότητας αλλά και της ίδιας της φύσης των αερίων. Το ιδανικό PCM θα ήταν ένα υλικό που θα παρουσίαζε μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας, υψηλή αγωγιμότητα, θερμοκρασία τήξεως σύμφωνη με το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής, να είναι χημικά σταθερό, φτηνό στην παραγωγή του, να μην είναι τοξικό, διαβρωτικό και εύφλεκτο καθώς και να τήκεται με την ελάχιστη εμφάνιση του φαινομένου supercooling.

Το πλέον γνωστό PCM είναι το νερό το οποίο κατά την αλλαγή φάσης του σε πάγο μπορεί να αποθηκεύσει πολύ μεγάλα ποσά θερμότητας, αφού έχει περίπου 80 φορές περισσότερη αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με την υγρή κατάσταση του νερού. Επειδή η χρήση του πάγου ως PCM παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα τα οποία δημιουργούνται λόγω των ιδιοτήτων του νερού (δηλαδή θερμοκρασία πήξεως στους 0°C, μεγάλη μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία, χαμηλή θερμοκρασία προσαγωγής στο σύστημα αποθήκευσης και άλλα) η προσπάθεια στράφηκε στην ανάπτυξη υλικών με βάση το νερό, ώστε να παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματά του (δηλαδή μεγάλη τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας, μεγάλη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας) αλλά να μην παρουσιάζουν τα προαναφερθέντα προβλήματα της χρήσεως του πάγου και κυρίως τη θερμοκρασία τήξεως. Βάσει αυτής της σκέψεως δημιουργήθηκαν τα πρώτα PCMs που είναι τα ένυδρα άλατα, μια κατηγορία υλικών που αναπτύσσεται και τελειοποιείται ακόμη και σήμερα. Τα ένυδρα άλατα είναι σχετικά ασταθείς ενώσεις αλάτων με μόρια νερού που ανάλογα με την πρόσδοση ή απορρόφηση θερμότητας από το σύστημα αποβάλλουν ή προσλαμβάνουν μόρια νερού.

Κύριο πλεονέκτημα των PCMs έναντι του πάγου είναι η ρύθμιση της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (-40°C ÷ 110°C). Το χαρακτηριστικό αυτό είναι το κύριο πλεονέκτημα των PCMs διότι ανάλογα με την εφαρμογή, η επιθυμητή θερμοκρασία αλλαγής φάσης είναι διαφορετική. Για παράδειγμα, για εφαρμογές σε τοιχοποιία επιθυμητή θερμοκρασία αλλαγής φάσης είναι από 25°C ως 27°C, ενώ για εφαρμογές κλιματισμού το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να αλλάζει φάση στους 2°C με 5°C.[5],[9],[10].

2.3 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ-ΕΞΕΛΙΞΗ

ΠΡΩΤΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ

Η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης ως μέσο θερμικής αποθήκευσης εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια. Ο πάγος υπήρξε από τα πρώτα χρησιμοποιούμενα PCMs. Η χρήση πάγου για τη διατήρηση εμπορευμάτων σε μια σταθερή χαμηλή θερμοκρασία είναι αρκετά παλιά. Τα σπίτια από πάγο, γνωστά και ως "ίγκλου", χτίστηκαν ενσωματώνοντας μεγάλα τεμάχια πάγου που κόβονταν από την επιφάνεια παγωμένων ποταμών κατά τη χειμερινή περίοδο και διατηρούνταν στη συνέχεια σε μόνωση πριονιδίου ώστε να παρέχουν πάγο για χρήση κατά την περίοδο της Άνοιξης.

Η βιομηχανία τροφίμων χρησιμοποιούσε μεθόδους θερμικής αποθήκευσης για τη διατήρηση της παραγωγής σε μια ελεγχόμενη χαμηλή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της μεταφοράς και της αποθήκευσης. Τα συστήματα αυτά που ονομάζονταν *ψυχροί συσσωρευτές* ή *πιάτα δροσισμού* αποτελούνταν από επίπεδα μεταλλικά δοχεία γεμάτα με παγωμένα μίγματα αλάτων χαμηλού σημείου τήξεως.

Παρόμοια μίγματα αλάτων χρησιμοποιούνταν επίσης σε πλαστικά δοχεία από τη φαρμακοβιομηχανία και τα νοσοκομεία για τη διατήρηση χημικών και φαρμάκων σε συγκεκριμένη ελεγχόμενη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Ως κύρια PCMs για εφαρμογές σε χαμηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιήθηκαν μίγματα ανόργανων αλάτων όπως άλατα θειικού μαγνησίου και νατρίου, καλίου, αμμωνίου, ασβεστίου ή χλωρίδια του μαγνησίου.

Μόλις έγινε αντιληπτή η σπουδαιότητα της τεχνολογίας PCMs σε εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών, ξεκίνησε η έρευνα για την εύρεση υλικών αλλαγής φάσης με υψηλότερα σημεία τήξεως για εφαρμογές θέρμανσης.

Αρχικά, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας επικεντρώθηκε στους μεμονωμένους χρήστες των συστημάτων αυτών και όχι σε τεχνολογικά ανεπτυγμένα θερμικά συστήματα. Οι πρώτες έρευνες περιελάμβαναν κάποια συστήματα, τα οποία προορίζονταν για εστιατορες και ξενοδόχους και ήταν σχεδιασμένα να διατηρούν τα ζεστά πιάτα σε ικανοποιητική θερμοκρασία όση ώρα διαρκούσε το σερβίρισμα, το θερμό μπουκάλι γνωστό και ως "θερμός" για τη διατήρηση ζεστών ροφημάτων και εφαρμογές σε ρούχα διαβίωσης (σε ακραίες συνθήκες).

Στα τέλη του 1940, κατασκευάστηκε ένα θεραπευτικό επίθεμα που περιείχε νάτριο και βορικό άλας ως θερμικό μέσο. Το πρώτο προϊόν το οποίο αναπτύχθηκε για θεραπευτικό σκοπό ήταν μία συσκευασία παροχής ψύξης, ονομαζόταν γενικά "cool pack" και αναπτύχθηκε από αθλίατρους σε συνεργασία με νοσοκομειακές μονάδες και η κύρια χρήση του ήταν να περιορίζει το μωλώπισμα σε περίπτωση τραυματισμού. Το προϊόν περιελάμβανε μια πλαστική σακούλα εσωτερικά χωρισμένη σε δύο τμήματα: το ένα περιείχε το χαμηλής θερμοκρασίας υλικό αλλαγής φάσης σταθεροποιημένο σε υπέρψυκτη κατάσταση και το άλλο τμήμα περιείχε έναν παράγοντα πυρηνοποίησης, κάποιου είδους πηκτικό δηλαδή. Η όλη κατασκευή ενεργοποιούνταν όταν το διαχωριστικό των δυο υλικών στο εσωτερικό της σακούλας έσπαγε προκαλώντας ανάμιξη των δυο υλικών που κατέληγε σε κρυσταλλοποίηση του υλικού αλλαγής φάσης και την απελευθέρωση όλης της αποθηκευμένης ενέργειας.

Αντιστοίχως, αναπτύχθηκαν άλλα πακέτα που λειτουργούσαν κατά παρόμοιο τρόπο, με τη διαφορά ότι το υλικό αλλαγής φάσης που περιείχαν είχε υψηλό σημείο

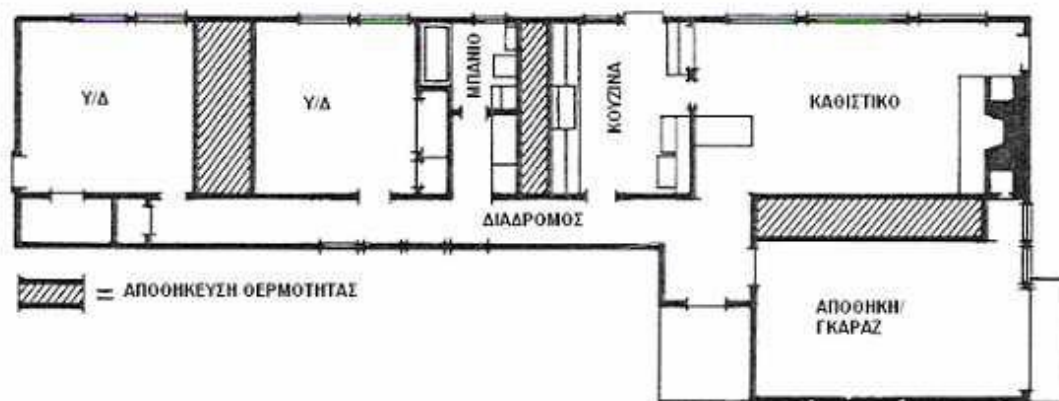
τήξεως για παραγωγή υψηλότερης θερμοκρασίας. Τα λεγόμενα “hot packs” χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στον τομέα της διαβίωσης τόσο στις στρατιωτικές αποστολές όσο και στις εξερευνητικές όπου η περίοδος έκθεσης σε χαμηλές θερμοκρασίες ήταν παρατεταμένη. “Θερμός”, κατάλληλα επενδεδυμένα ρούχα και τσάντες διάσωσης είναι μερικά από τα προϊόντα που αναπτύχθηκαν για την διαβίωση σε αντίξοες συνθήκες με τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης διαφόρων σημείων τήξεως.[9],[13].

ΘΕΡΜΑΝΣΗ-ΨΥΞΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

Οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν για να χρησιμοποιηθούν τα υλικά αλλαγής φάσης στη θέρμανση και ψύξη κτιρίων ξεκινούν το 1920. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 κτίζονται τα πρώτα σπίτια-δείγματα που χρησιμοποιούν PCM. Η Δρ. Maria Telkes από της ΗΠΑ υπήρξε πρωτοπόρος στην εισαγωγή PCM στα κτίρια. Το 1946 πρότεινε την κατασκευή ενός δοκιμαστικού σπιτιού που ονομάστηκε το σπίτι του Dover και το οποίο κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του αρχιτέκτονα Eleanor Raymond σε ένα κτήμα στη Βοστώνη. Το σπίτι αποτελείτο από έναν όροφο 135m² με δυο υπνοδωμάτια, κουζίνα, σαλόνι και γκαράζ. Δεκαωκτό ηλιακοί συλλέκτες ολικής επιφάνειας 67m² συνέλλεγαν θερμική ενέργεια. Στη συνέχεια, η θερμότητα αυτή μεταφερόταν μέσω ενός αγωγού με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα σε τρία δοχεία αποθήκευσης που βρίσκονταν ανάμεσα στα δωμάτια. Κάθε τέτοιο δοχείο είχε χωρητικότητα 1.9m³ και περιείχε ως υλικό αλλαγής φάσης το λεγόμενο άλας του Glauber (ένυδρο θειικό άλας Na₂SO₄·10H₂O) με σημείο τήξεως τους 32°C. Με 21 τόνους PCM που περιείχαν συνολικά τα δοχεία αποθήκευσης το κτίριο μπορούσε να αποθηκεύει θερμότητα ύψους 11 MJ (4.7εκατ.Βtu). Τα PCMs που διέθετε το κτίριο είχαν την ικανότητα να αποθηκεύουν θερμότητα για 12 μέρες παρέχοντας αισθητή θερμότητα για θερμοκρασίες μέχρι 32°C (σημείο τήξεως). Η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1948 με κόστος 20.000\$ εκ των οποίων τα 3000\$ είχαν δαπανηθεί για την εγκατάσταση των PCMs. Το σπίτι κατοικήθηκε από τον Δρ. Anthony Nemethy και την οικογένειά του οι οποίοι τα δυο πρώτα χρόνια δήλωσαν πλήρως ικανοποιημένοι. Όπως αναφέρει η Telkes, τα δυο πρώτα έτη το σύστημα θέρμανσης αποδείχθηκε πλήρως αποτελεσματικό ακόμα και σε περιόδους με επτά ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς. Το σύστημα λειτούργησε με επιτυχία, παρέχοντας ένα άνετο περιβάλλον γύρω στους 21°C χωρίς να χρειαστεί οποιοδήποτε συνοδευτικό σύστημα θέρμανσης. Τον τρίτο χρόνο όμως το σύστημα απέτυχε. Βρέθηκε ότι η απόδοση του άλατος του Glauber μειώνεται μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους χρήσεως. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι το άλας είχε διαχωριστεί σε διάλυμα και άνυδρο άλας (Na₂SO₄) χάνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο την αποθηκευτική του ικανότητα. Επίσης τα δοχεία αποθήκευσης άρχισαν να διαβρώνονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι θερμικές απώλειες.

Το 1950 ο μηχανικός Lawrence Gardenhire ξεκίνησε να κατασκευάζει ένα ηλιακό σπίτι με PCM στην περιοχή του New Mexico. Η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1953. Το σπίτι ήταν διόροφο και κάθε όροφος είχε επιφάνεια 102m². Και ο Gardenhire, όπως και η Telkes, χρησιμοποίησε δοχεία αποθήκευσης με PCM χωρητικότητας 1.9m³, μόνο που αντί να τα εγκαταστήσει ανάμεσα στα δωμάτια όπως η Telkes τα εγκατέστησε στη στέγη δίπλα στους ηλιακούς συλλέκτες. Επίσης προσέθεσε διφθοριούχο νάτριο στο άλας του Glauber για να αποφύγει το διαχωρισμό. Δυστυχώς όμως και αυτή η κατασκευή παρουσίασε τα ίδια προβλήματα με την κατασκευή της Telkes.[9].

Την επόμενη προσπάθεια για ένα ηλιακό σπίτι με εφαρμογή PCM την έκαναν οι αρχιτέκτονες Aladar και Victor Olgyay, οι οποίοι κατασκεύασαν ένα διόροφο κτίριο με επιφάνεια ορόφου 111m². Το σχεδιασμό του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ανέλαβε εκ νέου η Telkes λόγω της προηγούμενης εμπειρίας της. Και σε αυτή την περίπτωση η Telkes χρησιμοποίησε ως PCM το άλας του Galuber. Για να ξεπεραστούν τα προηγούμενα προβλήματα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εκτός από τους 12 τόνους PCM που περιελάμβανε, ήταν εμπλουτισμένο με πυριτικό άλας νατρίου και χρωμίου, ουσία που παρεμποδίζει τη διάβρωση. Τα PCMs ήταν ενσωματωμένα σε κυλινδρικά δοχεία χάλυβα, διαμέτρου 0.1m και ύψους 0.6m, τα οποία ήταν τοποθετημένα κάθετα στους τοίχους. Παρόλο που τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, οι προσπάθειες από αυτή την ομάδα επιστημόνων δε συνεχίστηκαν.



Σχήμα 2.2 Πρότυπο σπίτι κατά Telkes.

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Υλικό DSP (disodium phosphate-φωσφορικό άλας νατρίου):

Το 1950 οι δυο μεγάλες εταιρίες ηλεκτρισμού των ΗΠΑ Edison Illuminating Companies και Edison Electric Institute με τη βοήθεια του Δρ. Gordon Wilkes (MIT) πειραματίστηκαν με ένα νέο PCM λεγόμενο DSP ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) με σημείο τήξεως τους 36°C. Το νέο αυτό υλικό φιλοδοξούσε να χρησιμοποιηθεί σε αντλίες μεταφοράς θερμότητας. Το σύστημα μεταφοράς θερμότητας ενσωμάτωσε μια σειρά δοχείων χάλυβα που περιείχε DSP. Τα δοχεία αυτά βυθίστηκαν στο νερό που αποτελούσε το μέσο μεταφοράς θερμότητας. Τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής δεν ήταν ικανοποιητικά. Ο κύκλος τήξεως-πήξεως του νέου PCM αποδείχθηκε ότι δεν ήταν πλήρως αναστρέψιμος και ως εκ τούτου μειωνόταν εντυπωσιακά η ικανότητα αποθήκευσης του υλικού. Ένα επιπλέον πρόβλημα ήταν η διάβρωση των δοχείων χάλυβα.[9].

Διαστημική εφαρμογή NASA:

Το 1960 αποτέλεσε περίοδο ραγδαίας ανάπτυξης στον τομέα της διαστημικής τεχνολογίας. Η NASA τότε επιχορήγησε επιστημονικά προγράμματα του MIT που μελετούσαν τα PCMs. Ο στόχος των επιστημόνων ήταν να επιτύχουν θερμικό έλεγχο σε διάφορα συστήματα με τη χρήση PCM. Τα επιτυχή αποτελέσματα των ερευνών εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά λίγα χρόνια αργότερα στο διαστημόπλοιο Apollo 15 Lunar Rover Vehicle. Συγκεκριμένα τα PCMs χρησιμοποιήθηκαν για να ελεγχθεί η

θερμότητα που απελευθερωνόταν από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του Apollo 15. Κατά τη διάρκεια του διαστημικού ταξιδιού τα PCMs, που αποτελούνταν από μίγματα παραφίνης, αποθήκευαν τη θερμότητα που απελευθερωνόταν από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και την απέβαλαν με μορφή ακτινοβολίας. Χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή σε επένδυση χώρου για να απορροφούν την επιπλέον θερμότητα που εκλυόταν από τα ηλεκτρονικά συστήματα, ώστε να μειώνεται η χρήση των κλιματιστικών συσκευών για το ίδιο έργο. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν PCMs σε κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών που ήταν εγκατεστημένο στο διαστημόπλοιο.[9],[13].

Πανεπιστήμιο της Πενσυλβανίας:

Το πρώτο μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα έλαβε χώρα το 1971 στο πανεπιστήμιο της Πενσυλβανίας. Σε αυτό συμμετείχαν οι επιστήμονες Δρ.S.Freedman, Δρ.Telkes, Δρ. M.Altman. Στόχος τους ήταν να μελετήσουν τις ιδιότητες των διαφόρων οργανικών και μη οργανικών PCMs και να τα κατηγοριοποιήσουν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το $K_2HPO_4 \cdot 6H_2O$ (ανόργανο PCM) και ορισμένα μίγματα παραφίνης (οργανικό PCM) είναι κατάλληλα για εφαρμογές κλιματισμού (χαμηλό σημείο τήξεως) ενώ για θέρμανση χώρου συνίστανται τα $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$.[9].

Κόσμος:

Η δεκαετία του 1970 ήταν ορόσημο για τα PCMs και γενικότερα για τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Το 1973 με τον αραβικό αποκλεισμό πετρελαίου εμφανίζεται η πρώτη πετρελαϊκή κρίση. Αυτό ώθησε τις κυβερνήσεις διάφορων χωρών να αναζητήσουν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Από το 1973 και μετά ξεκινά η κυβερνητική χρηματοδότηση ερευνητικών προγραμμάτων πάνω στα PCMs σε χώρες όπως οι ΗΠΑ, η Αγγλία, η Γερμανία και η Γαλλία. Τα ερευνητικά εργαστήρια των ΗΠΑ επικεντρώνονταν στην έρευνα των ανόργανων PCMs, την ώρα που τα μεγαλύτερα Ευρωπαϊκά ερευνητικά κέντρα βασιζόνταν στις προοπτικές των οργανικών PCMs για τις μελέτες τους. Ιδιαίτερως σημαντικά ήταν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές τις μελέτες. Οι πλέον δραστήριες χώρες ήταν η τότε Δυτική Γερμανία, η τότε ΕΣΣΔ, η Αγγλία, η Σουηδία, η Δανία, η Γαλλία και η Ιταλία. Πέρα από την Ευρώπη πολύ σημαντική ερευνητική πρόοδο έκαναν και οι παραδοσιακά πρωτοπόροι σε επιστημονικά θέματα Ιάπωνες. Πιο συγκεκριμένα:

Η ερευνητική δραστηριότητα στη Γερμανία απέφερε καρπούς, καθώς οι επιστήμονες συνέταξαν αναλυτικά γραφήματα και πίνακες φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων των PCMs, καθώς και πληροφορίες για PCMs για τους τομείς της κατασκευής και της μόνωσης. Τα κύρια υλικά που εξετάστηκαν ήταν οι παραφίνες, τα ένυδρα άλατα και κάποια εύτηκτα μίγματα για εφαρμογές κάτω των $100^{\circ}C$. Οι δοκιμές περιλάμβαναν τη χρήση των υλικών σε σωλήνες με πτερύγια. Άλλη μεγάλη έρευνα εξέταζε τη διαφορετική θερμική συμπεριφορά των PCMs σε ηλιακό στίψι, το οποίο θερμαίνεται από μια αντλία θερμότητας με αποθηκευτικό μέσο το νερό. Οι ερευνητές αντικατέστησαν το νερό πρώτα με πάγο και μετά με παραφίνη (σημείο τήξης 18 με $25^{\circ}C$), για τρία έτη. Αποδείχθηκε ότι η παραφίνη έχει την καλύτερη συμπεριφορά καθώς επίσης ότι αυξάνει το συντελεστή συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας από 2,6 σε 3,3, καθώς επίσης ότι η παραφίνη χρειάζεται το μισό όγκο από αυτόν του νερού γεγονός που δίνει μικρότερο κόστος εγκατάστασης.

Η Γαλλία είναι μία από τις χώρες που έδειξαν γρήγορα μεγάλο ενδιαφέρον για τις θερμικές προοπτικές των PCMs και κατασκεύασαν για ερευνητικούς σκοπούς

αρκετά κτίρια με PCMs. Συγκεκριμένα το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην εισαγωγή των PCMs-και κυρίως παραφινών-στην τοιχοποιία.

Η Αγγλία είναι μία από τις χώρες, όπως και η Γερμανία και η Σουηδία που εκτός από την έντονη ερευνητική δραστηριότητα, είναι παραγωγοί PCM με συνεχώς αναπτυσσόμενη βιομηχανία. Οι προσπάθειες των A.Bromley, E.McKay και J.Wilkins, οι οποίοι ίδρυσαν ερευνητικό οργανισμό και ασχολήθηκαν διεξοδικά με τη μελέτη της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας σε θερμικές εφαρμογές και ιδιαίτερα στα συστήματα αποθήκευσης πάγου, υπήρξαν από τις σημαντικότερες στην εξέλιξη των PCMs.

Τέλος, η Ιαπωνία κατέχει σημαντικό ρόλο στην έρευνα και ανάπτυξη του τομέα των PCM, με σειρά ετών ερευνητικής δραστηριότητας και σημαντική κρατική βοήθεια. Η συνισταμένη της έρευνας των Ιαπώνων επιστημόνων είναι η χρήση PCM σε συστήματα θέρμανσης και έχουν στο παρελθόν αναπτυχθεί πολλά συστήματα χρησιμοποιώντας υλικά όπως ένυδρα άλατα νιτριδίων, άλατα φθορίου, φωσφορικά άλατα και θειικό ασβέστιο, τα οποία πέρασαν μετέπειτα επιτυχώς στο εμπόριο.

Η ερευνητική δραστηριότητα μέχρι τη δεκαετία του 1970 περιοριζόταν στις εφαρμογές θέρμανσης, ενώ από το σημείο αυτό και μετά αναγνωρίστηκαν και οι προοπτικές σε εφαρμογές ψύξης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 έγιναν εκτεταμένες πειραματικές έρευνες γύρω από την ενσωμάτωση του άλατος του Glauber σε γύψο και άλλα δομικά υλικά.[9],[13].

2.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ PCMs

Τα PCMs όπως ειπώθηκε ήδη, είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Η μεταφορά θερμικής ενέργειας γίνεται κατά την αλλαγή φάσης από στερεή σε υγρή ή από υγρή σε στερεή. Μεγάλος αριθμός των PCM με διάφορα σημεία τήξεως είναι σήμερα γνωστός για κάθε απαιτούμενη εφαρμογή. Τα υλικά αλλαγής φάσης με σημείο τήξεως μεταξύ 20°C και 32°C για παράδειγμα χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη στα κτίρια. Ωστόσο, καθώς προορίζονται για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας, τα υλικά αυτά οφείλουν να πληρούν κάποιες επιθυμητές θερμοδυναμικές κινητικές και χημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές είναι οι εξής:

Θερμοδυναμικές ιδιότητες:

- 1.Θερμοκρασία τήξεως μέσα στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας.
- 2.Μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας μετάβασης σε άλλη φάση.
- 3.Υψηλή θερμική αγωγιμότητα στερεής και υγρής φάσης για αποτελεσματική φόρτιση και αποφόρτιση του συστήματος.
- 4.Μικρή μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσεως.
- 5.Ομοιόμορφη τήξη του υλικού αλλαγής φάσης για σταθερή αποθηκευτική ικανότητα του υλικού σε κάθε κύκλο τήξεως/πήξεως.
- 6.Υψηλή πυκνότητα.

Κινητικές ιδιότητες:

- 1.Επαρκής βαθμός ανάπτυξης κρυστάλλων.
- 2.Υψηλός βαθμός πυρηνοποίησης για να αποφευχθεί υπέρψυξη της υγρής φάσης(φαινόμενο supercooling).

Χημικές ιδιότητες:

- 1.Χημική σταθερότητα μεγάλης διάρκειας,δηλαδή απουσία χημικής αποικοδόμησης μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων τήξεως/πήξεως.
- 2.Συμβατότητα με τα υλικά κατασκευής.
- 3.Μη τοξικά,μή εύφλεκτα και μη εκρηκτικά υλικά για λόγους ασφαλείας.

Οικονομικές ιδιότητες:

1. Αφθονα.

2. Διαθέσιμα.

3. Οικονομικά προσεγγίσιμα. Το χαμηλό κόστος και η υψηλή διαθεσιμότητα των υλικών αλλαγής φάσης είναι ένας πολύ σημαντικός άξονας ανάπτυξης και διάδοσης της εφαρμογής τους. [5],[15],[16].

ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ PCMs:

Ο υπολογισμός των ιδιοτήτων των PCMs είναι ζήτημα εξαιρετικής σημασίας για την επιλογή του κατάλληλου υλικού ανά εφαρμογή.

Οι κυριότερες ιδιότητες του υλικού που πρέπει να εξετάζονται είναι:

- Σημείο τήξεως
- Σημείο τήξεως
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- Ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση
- Λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης-στερεοποίησης
- Βαθμός supercooling
- Βαθμός διαχωρισμού φάσεων(phase segregation)
- Βαθμός διάβρωσης σε διάφορα "κοινά υλικά"

Οι ιδιότητες των PCMs πρέπει να εξετάζονται με δυο κατηγορίες μεθόδων:

- ✓ Μέθοδοι με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε περιορισμένο χρονικό διάστημα και για ένα κύκλο φόρτισης του υλικού
- ✓ Μέθοδοι με τις οποίες εξετάζονται οι ιδιότητες σε εκτεταμένο χρονικό διάστημα και για πολλούς κύκλους φόρτισης του υλικού

Οι συνηθέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του σημείου τήξεως, της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση και της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης είναι:

- Συμβατική θερμιδομετρική μέθοδος (Conventional Calorimetry Method)
- Διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (Differential Scanning Calorimetry or DSC)
- Διαφορική θερμική ανάλυση (Differential Thermal Analysis or DTA)

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

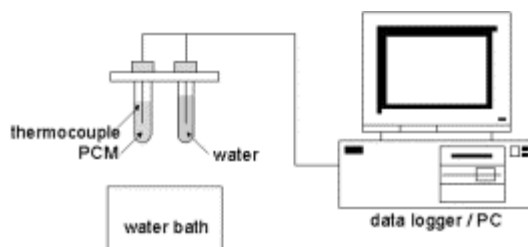
- ✓ Το δείγμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ μικρό, επομένως αν λάβουμε υπόψη ότι ορισμένες ιδιότητες των PCMs επηρεάζονται από το μέγεθος του δείγματος ή από το αν είναι συσκευασμένο ή όχι καθιστά τη μέθοδο λιγότερο αξιόπιστη. Επιπλέον αν το υλικό είναι μη ομογενές γίνεται αναξιόπιστη και η επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος.
- ✓ Σε μια μέτρηση δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα πολλά δείγματα αλλά θα πρέπει να επαναληφθεί το πείραμα για κάθε καινούριο δείγμα.
- ✓ Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι σχετικά πολύπλοκος και μεγάλου κόστους. [5],[14].

Μέθοδος T-history:

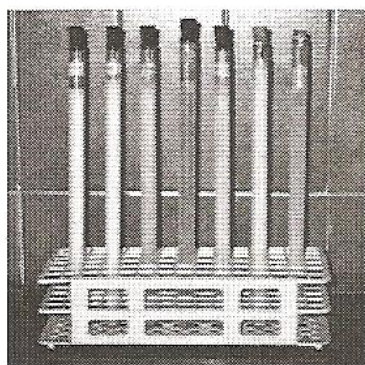
Η μέθοδος T-History, που αναπτύχθηκε από τους Zhang Yinping και Jiang Yi για τη μέτρηση της λανθάνουσας θερμότητας τήξεως ενός υλικού αλλαγής φάσης σε αεροστεγείς σωλήνες, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απλούστατης πειραματικής συσκευής και της ευκολίας εφαρμογής της, απουσία της διαδικασίας δειγματοληψίας.

Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητη η διασφάλιση τέτοιων πειραματικών συνθηκών που θα εξασφαλίζουν αριθμό Biot (αδιάστατος αριθμός που συσχετίζει την

αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και της επιφάνειας ενός σώματος) μικρότερο του 0.1, ώστε μέθοδοι διερεύνησης της ικανότητας συσσώρευσης θερμότητας (lumped heat capacity method) να είναι εφαρμόσιμες. Τούτο συμβαίνει διότι η μέθοδος T-history βασίστηκε στην lumped heat capacity method στην οποία γίνεται παραδοχή ότι η θερμοκρασία του συστήματος σωλήνα-PCM είναι ομοιόμορφη, σταθερή και εξαρτώμενη μόνο από το χρόνο κατά την αποφόρτιση του συστήματος, υπόθεση που για να γίνει αποδεκτή πρέπει η εσωτερική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας να είναι μικρή σε σχέση με την εξωτερική αντίσταση. Η απλή πειραματική διάταξη της μεθόδου t-history, απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα:

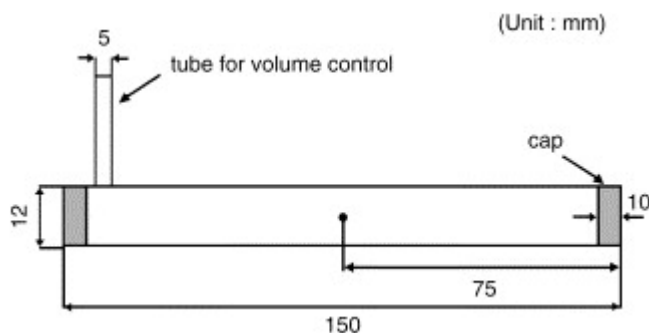


Σχήμα 2.3 Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης T-history

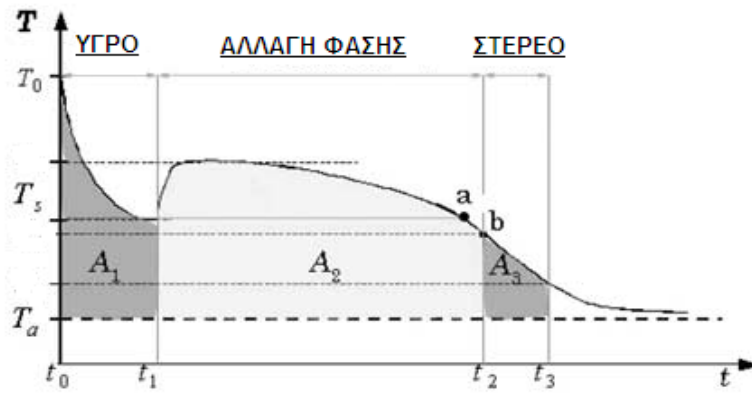


Σχήμα 2.4 Δοκιμαστικοί σωλήνες μεθόδου T-history

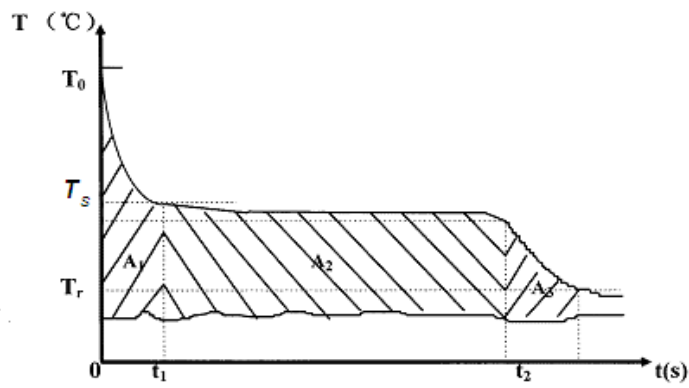
Το πείραμα περιλαμβάνει δυο δοκιμαστικούς σωλήνες που συντηρούνται σε μια θερμοκρασία υψηλότερη από το σημείο τήξεως του PCM σε λουτρό σταθερής θερμοκρασίας. Ο ένας σωλήνας είναι γεμάτος με το εξεταζόμενο PCM και ο άλλος με ένα υλικό αναφοράς (συνήθως καθαρό νερό). Στη συνέχεια, οι δοκιμαστικοί σωλήνες αποσύρονται από το λουτρό, εκτίθενται στην ατμόσφαιρα και οι θερμοκρασίες των δυο σωλήνων και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος καταγράφονται ταυτόχρονα.



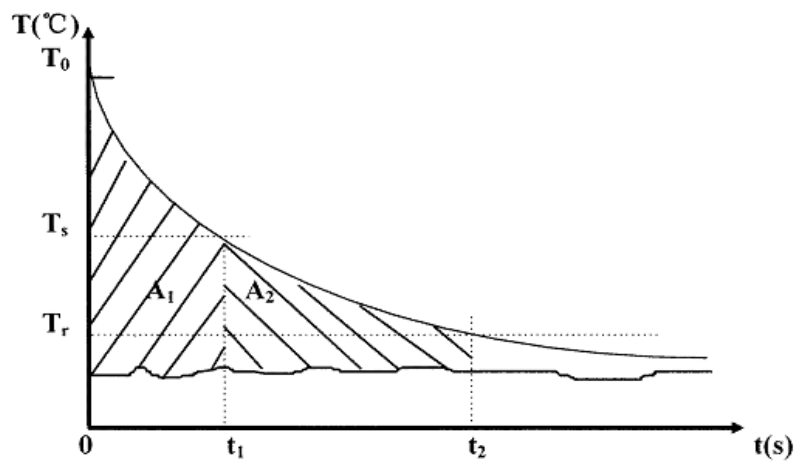
Σχήμα 2.5 Σχηματική παράσταση δοκιμαστικού σωλήνα με διάταξη όγκου διαστολής



Σχήμα 2.6 Ενδεικτική καμπύλη T-method για PCM.



Σχήμα 2.7 Ενδεικτική καμπύλη T-method για PCM (χωρίς υπέρψυξη)



Σχήμα 2.8 Ενδεικτική καμπύλη υλικού αναφοράς(καθαρό νερό)

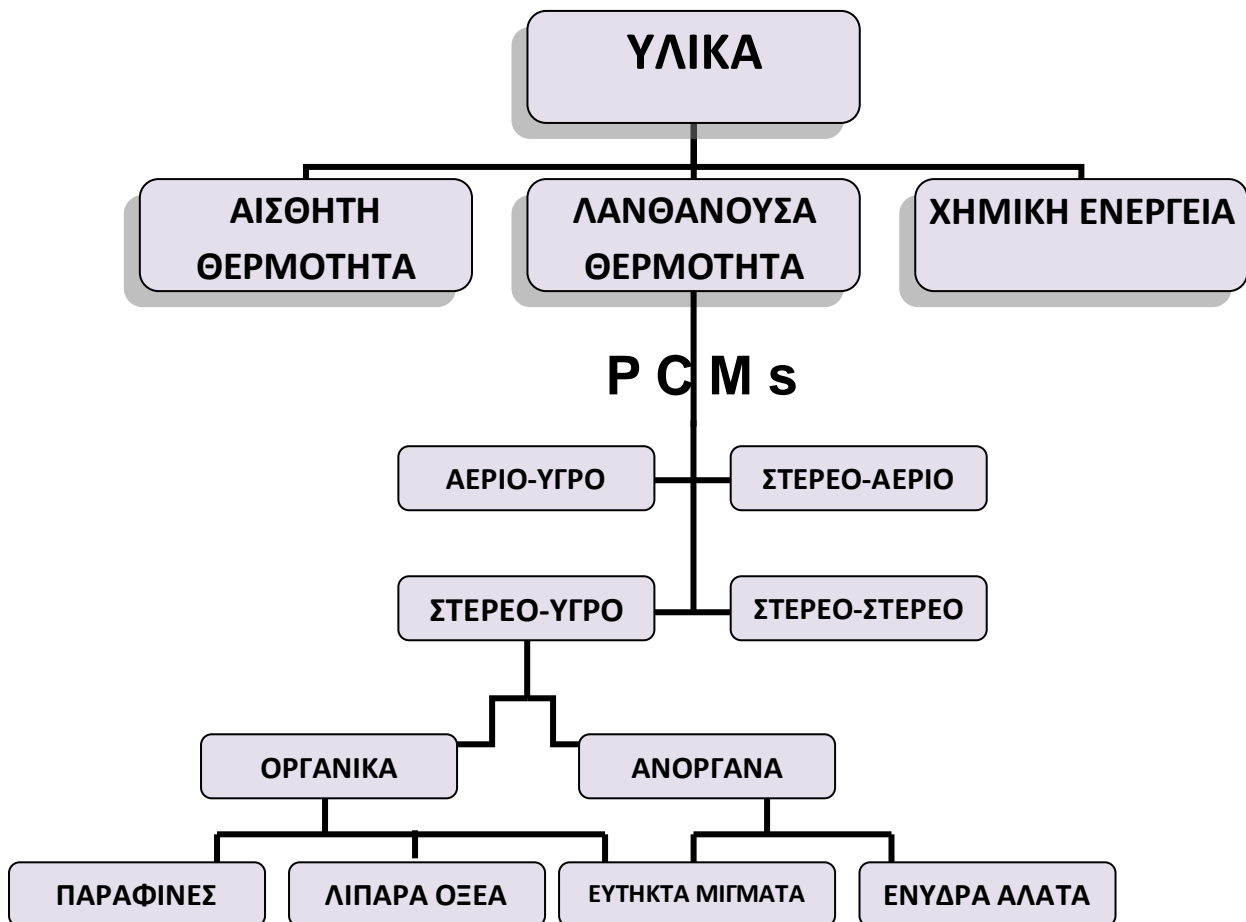
Οι θερμικές ιδιότητες όπως η θερμότητα τήξης και η ειδική θερμοχωρητικότητα, μπορούν να υπολογιστούν από τα μετρημένα πειραματικά δεδομένα και τις καμπύλες αυτές. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι αρκετά όπως η απλότητα και το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού, το συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους μεγάλο μέγεθος του δείγματος, η ταυτόχρονη μέτρηση πολλών δειγμάτων σε ένα πείραμα καθώς και η οπτική παρατήρηση του φαινομένου. Ωστόσο, κάποια βασικά μειονεκτήματα που παρουσιάζει μειώνουν την ακρίβεια του αποτελέσματος καθιστώντας πολλές φορές αδύνατο τον προσδιορισμό της θερμότητας τήξεως κάποιων PCMs. Τέτοιο μειονέκτημα είναι ότι το σφάλμα των μετρήσεων έχει άμεση σχέση με την προσεκτική κατασκευή της διάταξης και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται καθώς και τη διεξαγωγή του πειράματος. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της μεθόδου είναι να υιοθετηθεί το σημείο απελευθέρωσης του φαινομένου της υπέρψυξης (supercooling) ως το τέλος της περιόδου αλλαγής φάσης. Ο βαθμός εμφάνισης supercooling εξαρτάται από συνθήκες όπως η ταχύτητα ψύξεως, η καθαρότητα και οι κραδασμοί και είναι απολύτως ανεξάρτητος από το τέλος της αλλαγής φάσης. Η λύση έρχεται στην τροποποιημένη μέθοδο T-history η οποία χρησιμοποιεί ένα σημείο καμπής ως όριο μεταξύ της περιόδου αλλαγής φάσης και των περιόδων στερεάς κατάστασης, όπου και η πρώτη παράγωγος της καμπύλης T-history του PCM γίνεται ελάχιστη. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή ή μειώνεται σταδιακά καθώς απελευθερώνεται η λανθάνουσα θερμότητα, αλλά μειώνεται ραγδαία στη διαδικασία της ψύξης που συνοδεύει την αισθητή θερμότητα μόνο.[15],[16],[17].

2.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ PCM

Τα υλικά που αλλάζουν φάση και ειδικά αυτά που από στερεά μεταπίπτουν σε υγρά μπορούν να ομαδοποιηθούν με βάση τη σύστασή τους σε: *οργανικά* και *ανόργανα* υλικά. Η κατηγορία των οργανικών υλικών αντιπροσωπεύεται κυρίως από τις παραφίνες και τα μικροκρυσταλλικά κεριά, τα οποία είναι μίγματα παραφινών με αριθμό ατόμων άνθρακα από 19 ως 25, καθώς και από τα λιπαρά οξέα, εστέρες και αλκοόλες λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών, ενώ των ανόργανων υλικών κυρίως από τα διαλύματα ένυδρων αλάτων.

Μια κατηγορία PCMs που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και βρίσκεται υπό έρευνα είναι η κατηγορία που περιλαμβάνει υλικά προερχόμενα από ανακυκλούμενα φυτικά και ζωικά έλαια των οποίων η διαθεσιμότητα αυξάνεται, με την παρατηρούμενη αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής απορριμάτων με μεγάλη περιεκτικότητα τροφίμων στη μάζα τους.

Άλλη κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει σύμφωνα με τις εφαρμογές των υλικών. Ανάλογα με τη θερμοκρασία ή το εύρος των θερμοκρασιών που λαμβάνει χώρα η αλλαγή φάσης (από στερεό σε υγρό) τα PCMs μπορούν να ομαδοποιηθούν σε εκείνα που αλλάζουν φάση κάτω από τους 15°C και χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ψύξης σε εφαρμογές κλιματισμού ή μεταφορά ευπαθών υλικών (ιατρικές εφαρμογές) και σε εκείνα που αλλάζουν φάση πάνω από τους 90°C και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ψύξης με απορρόφηση. Τα υπόλοιπα υλικά με ενδιαμέση τιμή θερμοκρασίας αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογή θέρμανσης σε συνεργασία με ηλιακά συστήματα ή εφαρμογές ομαλοποίησης των φορτίων κλιματισμού καθώς και για αποθήκευση θερμότητας.



Σχήμα 2.9 Κατηγοριοποίηση PCMs.

2.5.1.ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα οργανικά υλικά αλλαγής φάσης διακρίνονται σε εκείνα που περιέχουν παραφίνη και σε εκείνα που δεν περιέχουν. Τα εμπορικά προϊόντα των οργανικών υλικών είναι αρκετά φθηνότερα από τα ένυδρα άλατα με μέτριες τιμές λανθάνουσας θερμότητας (περίπου 150Kj/Kg) και δυνατότητα παραγωγής τους σχεδόν σε όλο το εύρος θερμοκρασιών. Δεν εμφανίζουν σχεδόν καθόλου supercooling, είναι χημικά αδρανή και σταθερά χωρίς να παρουσιάζουν διαχωρισμό φάσεων και εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους. Παρουσιάζουν ομοιόμορφη τήξη. Μειονέκτημά τους αποτελεί η μικρή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας (περίπου 0.2W/m°C), ιδιότητα που περιορίζει τις εφαρμογές τους. Αυτή είναι η αιτία που εξετάζεται σε πολλές περιπτώσεις ο εμπλουτισμός του υλικού με μεταλλικά αντικείμενα διαφόρων σχημάτων ή χρήση δοχείων και σωλήνων με πτερύγια με σκοπό την αύξηση του ρεύματος θερμότητας μέσα στο υλικό.[9],[10],[14],[28].

2.5.1.1. ΠΑΡΑΦΙΝΕΣ

Παραφίνη είναι το σύνηθες όνομα για μια ομάδα κορεσμένων υδρογονανθράκων γνωστούς ως *αλκάνια*, με μοριακό τύπο C_nH_{2n+2} (όπου n τα άτομα άνθρακα). Χρησιμοποιείται σαν όρος για να δηλώσει γενικά ένα αλκάνιο αλλά περισσότερο αναφέρεται στα αλκάνια με γραμμική ανθρακική αλυσίδα (κανονικό αλκάνιο), ενώ υπάρχουν και τα ισοαλκάνια γνωστά ως ισοπαραφίνες. Η παραφίνη με την έννοια του αλκανίου πρέπει να διαχωρίζεται από το ομώνυμο καύσιμο, γνωστό στη Βρετανία και τη Βόρειο Αφρική ως *παραφινέλαιο* ή απλά *παραφίνη*, που καλείται επίσης *κυροζίνη* στο μεγαλύτερο μέρος της Αμερικής, της Αυστραλίας και της Νέας Ζηλανδίας.

Η απλούστερη παραφίνη είναι το *μεθάνιο* με ένα άτομο άνθρακα και μοριακό τύπο CH_4 το οποίο είναι αέριο σε θερμοκρασία δωματίου. Βαρύτερα μέλη της σειράς όπως το οκτάνιο (γενικά από 5 άτομα άνθρακα ως 19) είναι υγρά σε θερμοκρασία δωματίου, ενώ η στερεή παραφίνη γνωστή ως *κερί παραφίνης* περιλαμβάνει τα αλκάνια με άτομα άνθρακα από 20 ως 40. Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των ατόμων που σχηματίζουν την ανθρακική αλυσίδα. Τα αλκάνια δεν είναι ιδιαίτερα δραστικά και έχουν ελάχιστη βιολογική δράση. Το σημείο τήξεώς τους, όπως και το σημείο βρασμού τους, παρουσιάζει σχεδόν γραμμική εξάρτηση από το μέγεθος του μορίου και αυτό γιατί είναι κυρίως συνάρτηση του βάρους του μορίου. Όσο μεγαλύτερο είναι επομένως το μόριό του, τόσο υψηλότερο είναι και το σημείο τήξεως του αλκανίου. Τα αλκάνια με περιττό αριθμό ατόμων άνθρακα παρουσιάζουν χαμηλότερο σημείο τήξεως από τα αλκάνια με άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα και τούτο διότι τα αλκάνια άρτιου αριθμού σχηματίζουν μια καλά οργανωμένη δομή στη στερεά φάση η οποία απαιτεί περισσότερη ενέργεια για να καταρεύσει κατά τη μετάβαση στην υγρή φάση. Αντιθέτως, τα αλκάνια περιττού αριθμού, εξαιτίας της χαλαρότερης δομής τους στη στερεά φάση, δεν απαιτούν μεγάλα ποσά ενέργειας για τη διάσπαση της δομής τους επομένως το σημείο τήξεώς τους είναι χαμηλότερο.

Τα αλκάνια θεωρούνται άπολες ενώσεις και γι' αυτό το λόγο δεν σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου. Για το λόγο αυτό οι παραφίνες δεν διαλύονται σε πολικούς διαλύτες όπως το νερό και οι αλκοόλες. Αντίθετα, διαλύονται εύκολα σε άπολους διαλύτες όπως το βενζόλιο, ο τετραχλωράνθρακας, οι αιθέρες, συγκεκριμένοι εστέρες και άλλα. Δεν αντιδρούν με τα περισσότερα χημικά αντιδραστήρια, αλλά στην υγρή φάση τους είναι ιδιαίτερος εύφλεκτος. Διάφορα αλκάνια μπορούν αναμιχθούν μεταξύ τους σε διάφορες αναλογίες. Επιπροσθέτως, η πυκνότητα των αλκανίων αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των ατόμων άνθρακα αλλά παραμένει μικρότερη από αυτή του νερού. Κατ'αυτὸν τὸν τρόπο, σε ένα μείγμα νερού-παραφίνης, εκείνη διατηρείται πάντα στα ανώτερα στρώματα του μίγματος.

Το κερί παραφίνης είναι ένα ιδιαίτερα ελκυστικό υλικό για εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης. Δύναται να επιτύχει αποθήκευση μεγάλης ποσότητας λανθάνουσας θερμότητας σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και ακόμη σέβεται το περιβάλλον καθώς είναι οικολογικό και μη τοξικό. Ωστόσο, η τήξη του υλικού προκαλεί διαχωρισμό στα θερμικά συστήματα με βάση την κυκλοφορία νερού. Μια νέα εξέλιξη δεσμεύει την παραφίνη σε σταυρωτά δεμένη σπογγοειδή δομή, μορφή που εξασφαλίζει ότι το PCM δεν διαρρέει από την κατασκευή υποστήριξής του ακόμα και όταν αυτό βρίσκεται σε υγρή φάση. Οι παραφίνες είναι ιδανικά υλικά για χρήση ως PCMs. Έχουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος και μπορούν να δημιουργήσουν μέσω μιγμάτων υλικά κατάλληλα να καλύψουν οποιοδήποτε εύρος θερμοκρασιών, ανάλογα με την εκάστοτε

εγκατάσταση. Είναι οργανικές ουσίες, επομένως είναι φτηνές και άφθονες. Έχουν αρκετά καλή αποθηκευτική ικανότητα σε σχέση με άλλα υλικά, όπως επίσης έχουν το πλεονέκτημα να μην υπερψύχονται. Δεν εμφανίζουν το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Τέλος, παρουσιάζουν χαμηλή πίεση ατμοποίησης, γεγονός που ερμηνεύει τις ελάχιστες απώλειες υλικού σε ένα μεγάλο βάθος χρόνου χρήσης. Το πλεονέκτημα αυτό κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό για τις εφαρμογές όπου απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός κυκλικών φορτίσεων του υλικού. Οι παραφίνες παρουσιάζουν άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση χωρίς καμιά υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Δεν παρουσιάζουν πρόβλημα διάβρωσης με κανένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι παραφίνες πραγματοποιούν ολοκληρωμένα την αλλαγή φάσης τους σε θερμοκρασιακό εύρος περίπου 10K (περίπου 9K πριν το σημείο τήξεως και 1K μετά από αυτό). Ένα τέτοιο φαινόμενο αν δεν ληφθεί υπόψιν μπορεί να οδηγήσει σε μη σωστή επιλογή υλικού με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις αναμενόμενες.[9],[20],[21].



Σχήμα 2.10 Πορώδης δομή κόκκων παραφίνης και δοκιμαστικός σωλήνας

2.5.1.2. ΛΙΠΑΡΑ ΟΞΕΑ

Στη χημεία και ιδιαίτερα στη βιοχημεία, ως λιπαρό οξύ καλείται ένα καρβοξυλικό οξύ συχνά με μια μακρά μη διακλαδισμένη αλειφατική ανθρακική αλυσίδα, η οποία είναι είτε κορεσμένη είτε ακόρεστη. Καρβοξυλικά οξέα τόσο μικρά όσο το βουτυρικό οξύ (4 άτομα άνθρακα) συγκαταλέγονται στα λιπαρά οξέα, έστω κι αν τα λιπαρά οξέα που προέρχονται από φυσικά λίπη και έλαια έχουν υποθετικά, τουλάχιστον οκτώ άτομα άνθρακα όπως για παράδειγμα το καπρυλικό οξύ. Τα περισσότερα από τα φυσικά λιπαρά οξέα έχουν άρτιο αριθμό ατόμων άνθρακα καθώς η βιοσύνθεσή τους περιλαμβάνει ακετυλικό-CoA, ένα συνένζυμο που φέρει μια δυατομική ανθρακική ομάδα. Τα λιπαρά οξέα παράγονται με υδρόλυση των συνδέσμων εστέρα σε λίπος ή βιολογικό έλαιο (και τα δυο από τα οποία είναι τριγλυκερίδια) με την αφαίρεση της γλυκερίνης. Υπάρχουν δυο ειδών λιπαρά οξέα, τα κορεσμένα και τα ακόρεστα λιπαρά οξέα, ανάλογα με την ύπαρξη ή μη διπλού δεσμού στην ανθρακική αλυσίδα. Διαφέρουν επίσης και στο μήκος. Ορισμένα παραδείγματα ακόρεστων λιπαρών οξέων είναι το μυριστολεϊκό, το παλμιτολεϊκό, το ολεϊκό, το

λινολεϊκό, το αλφα-λινολεϊκό και άλλα, ενώ κορεσμένα είναι το βουτυρικό, το βαλερικό, το καπρωϊκό, το καπρυλικό, το μυριστικό, το παλμιτικό οξύ και αρκετά ακόμα.

Το ενδιαφέρον για τη χρήση λιπαρών οξέων στην αποθήκευση ενέργειας με χρήση PCM έχει αυξηθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, καθώς παρουσιάζουν τα επιθυμητά θερμοδυναμικά και κινητικά κριτήρια για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα λιπαρά οξέα έχουν ανώτερες ιδιότητες σε σχέση με πολλά άλλα PCMs όπως ομοιόμορφη τήξη, καλή χημική σταθερότητα και δεν είναι τοξικά. Το πλέον σημαντικό από τα χαρακτηριστικά τους είναι η μικρή αλλαγή στον όγκο τους κατά την αλλαγή φάσης τους, η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξεως ανά μονάδα μάζας και το κατάλληλο θερμοκρασιακό εύρος τήξεως για εφαρμογές σε παθητικά ηλιακά συστήματα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των λιπαρών οξέων ως υλικά αλλαγής φάσης είναι ότι τα περισσότερα παράγονται από τα κοινά φυτικά και ζωικά λίπη, γεγονός που εξασφαλίζει το διαρκή εφοδιασμό τους σε αντίθεση με την έλλειψη πηγών καυσίμων. Μεταξύ των ερευνηθέντων λιπαρών οξέων, το καπρινικό, το δωδεκανικό, το μυριστικό, το παλμιτικό και το στεατικό οξύ είναι πιθανά υλικά για αποθήκευση θερμότητας σε ηλιακά συστήματα και συστήματα θέρμανσης νερού από την άποψη της θερμοκρασίας τήξεώς τους και τη θερμική τους συμπεριφορά. Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης τους, η έλλειψη του φαινομένου supercooling και του φαινομένου διαχωρισμού των φάσεων, η αποθηκευτική τους ικανότητα και η συμβατότητά τους με το δομικό υλικό του συστήματος στο οποίο χρησιμοποιούνται είναι μερικές από τις αξιοσημείωτες πτυχές τους καθώς αυτές οι εκτιμήσεις επηρεάζουν τη ζωή του συστήματος αποθήκευσης. Το Βουτυρικό οξύ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κτιριακές εφαρμογές και έχει χρησιμοποιηθεί σε πειράματα, όμως το κόστος του είναι τουλάχιστον 2 με 2,5 φορές μεγαλύτερο από την παραφίνη με αντίστοιχες θερμικές ιδιότητες. Στα μειονεκτήματά τους μπορεί να συμπεριληφθεί ότι τα λιπαρά οξέα σε θερμοκρασία δωματίου, υπόκεινται σε μία χημική αντίδραση, γνωστή σαν αυτό-οξειδωση, κατά την οποία το λιπαρό οξύ σπάει σε υδαάνθρακες, κετόνες, αλδεΐδες και μικρότερες ποσότητες αλκοολών και εποξικών. Ένα ακόμη μειονέκτημα αυτής της ομάδας υλικών είναι η κακοσμία, γεγονός που όπως γίνεται κατανοητό περιορίζει δραματικά τη χρηστικότητα του χώρου στον οποίο αυτά εγκαθίστανται. Ωστόσο, τα προβλήματα αυτά θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη συσκευασία των PCMs ανάγοντάς τα λιπαρά οξέα εκ νέου σε ιδανικά υλικά αλλαγής φάσης.[9],[22],[29].

Συμπερασματικά, στα πλεονεκτήματα των οργανικών υλικών μπορούν να αναφερθούν συνοπτικά:

- ✓ Μη διαβρωτικά με τα περισσότερα υλικά
- ✓ Μικρός κίνδυνος ρύπανσης του νερού
- ✓ Αμελητέα η ανύπαρκτη εμφάνιση φαινομένου Supercooling
- ✓ Χημική και θερμική σταθερότητα
- ✓ Χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με άλλες κατηγορίες PCMs
- ✓ Παραγωγή των υλικών σε διάφορες μορφές για τις εμπορικές εφαρμογές (σκόνη, κόκκοι, πλάκες)

Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η χαμηλή λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης, ο χαμηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, η αναφλεξιμότητα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και η χαμηλή πυκνότητα.[5],[27]

2.5.2.ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΥΛΙΚΑ

2.5.2.1 ΕΝΥΔΡΑ ΑΛΑΤΑ

Τα ένυδρα άλατα είναι ο κύριος εκπρόσωπος των ανόργανων αλάτων. Παρουσιάζουν σχετικά μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας (περίπου 250Kj/Kg) σχετικά μεγάλη τιμή συντελεστού θερμικής αγωγιμότητας (περίπου 0.6W/mK), μέτριο κόστος παραγωγής αλλά υψηλό κόστος πώλησης σε σχέση με τις παραφίνες λόγω της επιβεβλημένης ενσωμάτωσής τους σε προστατευτικό κάλυμα και χρήση προσθέτων ουσιών σταθεροποίησης των ιδιοτήτων τους. Αρκετά ένυδρα άλατα χαμηλού κόστους έχουν μελετηθεί για χρήση ως υλικά αλλαγής φάσης για εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων των: χλωρίδιο του ασβεστίου ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), θειικό άλας νατρίου ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), οξικό άλας νατρίου και τροποποιημένων ποικιλιών που καλύπτουν ένα θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης από 8 μέχρι 58°C.

Το ένυδρο άλας συνίσταται από ένα άλας συνδεδεμένο με κρύσταλλο νερού. 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 PCM, η οποία αποβάλλεται με επανακρυστάλλωση του νερού του άλατος. Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που παρουσιάζουν τα ένυδρα άλατα στην αποθήκευση θερμότητας είναι η αδυναμία τους να διατηρήσουν τη θερμοαποθηκευτική τους ικανότητά, η οποία συνήθως μειώνεται με τους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης του υλικού. Αυτός είναι και ο λόγος όπου δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των υλικών. Κύρια αιτία εκφυλισμού των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών είναι ο λεγόμενος **διαχωρισμός των φάσεων** του υλικού και ο πιθανός σχηματισμός άνυδρων αλάτων με δημιουργία ιζήματος. Τούτο συμβαίνει διότι τα περισσότερα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος καθιστώντας τη διαδικασία μη αναστρέψιμη και οδηγώντας κατ'αυτόν τον τρόπο στη διαρκή μείωση της αποθηκευτικής τους ικανότητας και εξασθένηση των ιδιοτήτων τους. Άλλο μειονέκτημα είναι η ασυμβατότητα των ένυδρων αλάτων με τα υλικά συσκευασίας, καθώς είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά, και η αφυδάτωσή τους λόγω της πίεσης των ατμών του νερού που επιφέρει διαχωρισμό φάσεων κατά τη μακρόχρονη χρήση τους. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρήση αεροστεγών δοχείων αποθήκευσης. Συμπερασματικά, τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζει η χρήση των ένυδρων αλάτων δημιουργούνται λόγω της ανεπάρκειας σταθερότητας της χημικής σύνθεσης του υλικού και του φαινομένου της διάβρωσης μεταξύ του υλικού και του υλικού συσκευασίας. Το μεγάλο πλεονέκτημά τους ωστόσο στη χρήση τους ως PCMs είναι η μη αναφλεξιμότητά τους. Σε ό,τι αφορά στις ιδιότητές τους οφείλουμε να αναφέρουμε το ρόλο της πυκνότητας των υλικών που αποτελεί σημαντικό παράγοντα όταν χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις που απαιτούν οικονομία χώρου. Τα ένυδρα άλατα είναι σε γενικές γραμμές πυκνότερα υλικά από τις υπόλοιπες κατηγορίες PCMs για αυτό και παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα όγκου. [5],[9],[25].

Ενδεικτικά αναφέρονται οι πυκνότητες:

- Ένυδρα άλατα: περίπου 1500kg/m³
- Παραφίνες: περίπου 800kg/m³
- Λιπαρά οξέα: περίπου 900kg/m³

2.5.2.2 ΑΛΑΣ GLAUBER

Το άλας του θειικού νατρίου, γνωστό ως άλας του Glauber με χημικό τύπο $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ και σύσταση 44% Na_2SO_4 και 56% H_2O , είναι το άλας του νατρίου του θειικού οξέος και είναι από τα πολυεξετασμένα υλικά για χρήση ως PCM. Με θερμοκρασία τήξεως τους 32.4°C και λανθάνουσα θερμότητα 254Kj/Kg , με μεγάλη χημική σταθερότητα και σχεδόν καθόλου δραστικότητα σε κανονικές θερμοκρασίες, το άλας του Glauber υπήρξε ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για χρήση σε εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας σε κτιριακές εφαρμογές. Παρά ταύτα, και παρά το γεγονός ότι είναι από τα φθηνότερα υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας, από τις πρώτες κιόλας μελέτες έγινε φανερό ότι το υλικό αυτό, λόγω της ανομοιομορφίας τήξης του θα παρουσίαζε πολλές δυσκολίες. Τέτοιες ήταν ο διαχωρισμός των φάσεων, ο σχηματισμός ιζήματος και η εμφάνιση φαινομένου supercooling. Πράγματι, στις μελέτες που έκανε η Δρ.Μ.Telkes στην εφαρμογή του υλικού στο πειραμαικό της κτίριο (βλ. §2.3) διαπιστώθηκε ότι το άλας μετά από κάποιους κύκλους διαχώρισε το άνυδρο μέρος του (θειικό νάτριο), μειώνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο τη θερμική αποθηκευτική του ικανότητα. Τα περισσότερα από τα δοχεία στα οποία είχε τοποθετηθεί το άλας βρέθηκαν διαβρωμένα και είχαν διαρροές, ενώ το νερό κρυσταλλοποίησης είχε χαθεί.

Προσθήκη τετραβορικού νατρίου (βόρακος), τοποθέτηση του υλικού σε δοχείο με περιστρεφόμενο εναλλάκτη θερμότητας ή σε ρηχά, επίπεδα πάνελς, πύκνωση του υλικού με προσθήκη πυριτικού άλατος νατρίου και χρωμικού άλατος κατά της διάβρωσης είναι μερικές μόνο από τις μετέπειτα προσπάθειες για βελτίωση του υλικού ως PCM, όλες όμως παρουσίασαν παρόμοια προβλήματα με τις προηγηθείσες εγκαταστάσεις ως προς την εμφάνιση διαρροών και διαχωρισμού φάσεων. Οι ερευνητές πρότειναν την προσθήκη επιπλέον νερού για την αποφυγή σχηματισμού ιζήματος μέθοδος όμως που μειώνει την πυκνότητα αποθήκευσης. Αντ'αυτού, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλών ειδών ουσίες, ως πρόσθετα σταθεροποίηση με προσπάθεια ταυτόχρονης αύξησης του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας.

Στις προσπάθειες της Δρ. Telkes στη χρήση πηκτικών παραγόντων για την πύκνωση του υλικού ώστε να αποφεύγεται ο διαχωρισμός φάσεων κατά την τήξη, παρατηρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής του υλικού όντως αυξήθηκε εντυπωσιακά, παρέμεινε όμως η ελάττωση της αποθηκευτικής ικανότητας ύστερα από περίπου 1000 κύκλους φόρτισης. Αργότερα, ο S.B.Marks έδειξε ότι με την προσθήκη κάποιου είδους αργίλου το άλας διατηρήθηκε σε περισσότερους κύκλους τήξεως-πήξεως, χωρίς ωστόσο να απαλλάσσεται πλήρως από τα προβλήματα που παρουσίαζε. Ο P.Rueffel χρησιμοποίησε πλέγμα βρυσούρφης, το οποίο ενσωμάτωσε στο PCM, με αποτέλεσμα να είναι τόσο συμβατά τα δύο υλικά που το πλέγμα αυτό τελικά έδρασε σαν ένας άριστος πηκτικός παράγοντας. Ως εξέλιξη αυτής της ιδέας, μια δοκιμή που έγινε από την Boardman Energy Systems τοποθέτησε το υλικό μέσα σε άκαμπτες μήτρες τσιμέντου που διατηρούσαν το υλικό διασυνδεδεμένο σε μικροκυτταρική δομή. Το τηγμένο άλας του Glauber αναμειγνυόταν με τη σκόνη τσιμέντου υποβρύχιων εφαρμογών δημιουργώντας δεσμούς που απέτρεπαν το διαχωρισμό φάσεων. Το υλικό άντεξε 2000 κύκλους χωρίς να χάσει την αποθηκευτική του ικανότητα. Το σύστημα αυτό αποδείχθηκε χημικώς σταθερό και είχε σπουδαίες προοπτικές όσον αφορά στον τομέα της τοιχοποιίας.[9]

Αρκετοί ακόμα παράγοντες πύκνωσης που δοκιμάστηκαν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επίσης, συστήματα που βασίζονταν στη διαρκή περιστροφή του υλικού μέσα σε κυλίνδρους στους οποίους τήκονταν και έπηξε γρήγορα και ολοκληρωμένα, αποδείχθηκαν αποδοτικά καθώς βελτίωναν τη μεταφορά θερμότητας εφόσον η περιστροφή της αναμείξεως διατηρούσε μια ομοιόμορφη εσωτερική θερμοκρασία στο σύστημα και απέτρεπαν τη δημιουργία κρυστάλλων στα τοιχώματα των δοχείων. Με όλους αυτούς τους τρόπους βελτίωσης, το άλας του Glauber κατέληξε να γίνει ένα ικανοποιητικά χρήσιμο υλικό αλλαγής φάσης σε αρκετές εφαρμογές.

2.5.3.ΕΥΤΗΚΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Εύτηκτο μίγμα ονομάζεται το μίγμα του οποίου οι συνιστώσες βρίσκονται σε τέτοιες αναλογίες ώστε το σημείο τήξεως να βρίσκεται όσο το δυνατόν χαμηλότερα στη θερμοκρασιακή κλίμακα. Τα εύτηκτα μίγματα μπορεί να είναι είτε οργανικά, είτε ανόργανα ή ακόμα και μίγματα οργανικών και ανοργάνων PCMs.

Χαρακτηριστικό των εύτηκτων μιγμάτων είναι το λεγόμενο "εύτηκτο σημείο", η θερμοκρασία και η σύσταση δηλαδή του μίγματος τη στιγμή που τα συστατικά του κρυσταλλώνουν ταυτόχρονα στο διάλυμα τετηγμένου μίγματος.

Η ευκολία προσδιορισμού του επιθυμητού σημείου τήξεως για κάθε εφαρμογή είναι ο βασικός λόγος επιλογής τους ως υλικά αλλαγής φάσης. Επιπρόσθετα, εμφανίζουν σχεδόν όλα τα πλεονεκτήματα και των οργανικών και των ανόργανων PCMs, με τάση να εμφανίζουν πολύ λιγότερα από τα μειονεκτήματά τους. Εξετάζονται ως ένυδρα άλατα συνήθως καθώς παρουσιάζουν παραπλήσια συμπεριφορά. Μειονεκτούν, ωστόσο, ως προς το κόστος παραγωγής τους έναντι των απλών ανόργανων ή οργανικών PCMs τα οποία είναι πολύ φθηνότερα. Ενδεικτικά παραδείγματα εύτηκτων PCMs είναι:

$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} / \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ με σημείο τήξεως 25°C

$\text{CaCl}_2 / \text{NaCl} / \text{KCl} / \text{H}_2\text{O}$ με σημείο τήξεως 26.8°C

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} / \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ με σημείο τήξεως 30°C

Συμπερασματικά, τα πλεονεκτήματα των ανόργανων υλικών είναι η μεγάλη τιμή λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης, η μη αναφλεξιμότητα και η υψηλή τους πυκνότητα. Τα μειονεκτήματά τους θα μπορούσαν να συνοψισθούν στα εξής:

- ✓ Είναι διαβρωτικά, καθιστώντας απαραίτητη την αποθήκευση των υλικών σε ενισχυμένη συσκευασία
- ✓ Εμφανίζουν φαινόμενο supercooling
- ✓ Εμφανίζουν διαχωρισμό φάσεων (μεταβλητή τιμή της διαλυτότητας με τη θερμοκρασία) και είναι δυνατή η δημιουργία ιζήματος
- ✓ Έχουν αβέβαιη θερμική σταθερότητα σε κυκλική φόρτιση
- ✓ Το κόστος αγοράς τους είναι αρκετά μεγάλο, κυρίως σε σχέση με τα οργανικά
- ✓ Πρόκειται για υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα τον εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος χρόνου, αν μείνουν εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υγρασία. [5],[9],[10][14],[27].

2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PCMs

Οι εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας έχουν τύχει μεγάλης απήχησης ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Βασικός λόγος είναι η δυνατότητα μεγάλης πυκνότητας αποθήκευσης ενέργειας με τη μικρότερη διακύμανση κατά την ανάκτησή της, με μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά από την πηγή θερμότητας ει δυνατόν και ισοθερμοκρασιακά. Η ελευθερία που δίνει το εύρος θερμοκρασιών που παράγονται τα υλικά, δίνει την ευχέρεια εφαρμογής των PCMs σε πλήθος περιπτώσεων έμμεσης ή άμεσης αποθήκευσης θερμότητας.

Οι πρακτικές δυσκολίες που παρουσιάζονται αφορούν στο χαμηλό συντελεστή αγωγιμότητας, στη μεταβολή της πυκνότητας, στην αξιοπιστία και τη σταθερότητα των ιδιοτήτων σε μακρόχρονη χρήση καθώς και στο διαχωρισμό-αλλαγή της χημικής σύστασης των υλικών και εμφάνιση του φαινομένου supercooling. Η ανεπάρκεια της σταθερότητας των υλικών μπορεί να οφείλεται είτε σε μικρής σταθερότητας χημική σύνθεση του υλικού ή των υλικών που αποτελούν το PCM είτε στο φαινόμενο της διάβρωσης που πιθανόν λαμβάνει χώρα μεταξύ του PCM και των υλικών που έρχεται σε επαφή.

Η αποθήκευση ενέργειας είναι ένα πολύ σημαντικό μέσο εξοικονόμησης ενέργειας, βελτιώνοντας την αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας. Μικρής διάρκειας αποθήκευση είναι απαραίτητη σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές ενώ πλέον μελετώνται και εγκαταστάσεις για μεγάλης διάρκειας αποθήκευση, και ειδικότερα εποχιακή αποθήκευση. Η περιοδικότητα των πηγών ενέργειας στη φύση καθιστά απαραίτητη την πρόβλεψη επαρκούς ποσότητας αποθήκευσης στις εφαρμογές που συνδυάζουν χρήση ηλιακών συστημάτων για την περίσσεια ενέργειας και την ανάκτησή της σε ώρες μη διαθέσιμης ενέργειας. Ομοίως, στα συστήματα ανάκτησης θερμότητας, όπου οι περίοδοι διαθεσιμότητας περίσσειας ενέργειας και ζήτησης συνήθως δεν ταυτίζονται ή ταυτίζονται εν μέρει πρέπει να προβλέπεται επαρκής ποσότητα αποθήκευσης. Το ίδιο ισχύει και για τις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα σε χώρες με ακραίες κλιματικές συνθήκες κυρίως λόγω των οικιακών καταναλώσεων για ανάγκες ψύξεως ή θερμάνσεως. Αυτή η διακύμανση παρουσιάζει συνήθως τις ελάχιστες τιμές της τις μεταμεσονύκτιες ώρες ως τις πρώτες πρωινές. Για το λόγο αυτό, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και το σύστημα διανομής έχουν σχεδιαστεί και διαστασιολογηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανταπεξέρχονται σε περιόδους μέγιστης ζήτησης, οπότε υπολειπόμενες τις νυχτερινές ώρες. Είναι επομένως προφανές ότι καλύτερη διανομή των φορτίων στο εικοσιτετράωρο είναι πάντοτε ευπρόσδεκτη από την εταιρία διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας εύκολος τρόπος μετατόπισης των μεγίστων μιας εγκατάστασης σε περιόδους εκτός των αιχμών του συστήματος είναι η αποθήκευση θερμότητας σε χαμηλή ή υψηλή θερμοκρασία ανάλογα με την εφαρμογή.[5]

2.6.1 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ PCMs

Η χρήση των PCMs στις περισσότερες εφαρμογές απαιτεί την προστασία του υλικού σε κάποιο από τα είδη διαθέσιμης συσκευασίας ώστε να προφυλαχθεί το υλικό από την επίδραση των συνθηκών περιβάλλοντος ή να διευκολύνει τη μετάδοση της αποθηκευμένης θερμότητας. Οι συνηθέστεροι τρόποι συσκευασίας PCMs είναι η

τοποθέτηση του PCM σε κάψουλες ή σε σακούλες, η ενσωμάτωσή του στο πορώδες άλλων υλικών, ή ακόμη η ενίσχυση εναλλακτών θερμότητας με PCM.

Η ενσωμάτωση των PCMs σε κάψουλες ή μικροκάψουλες (σφαιρικές κυλότητες με διάμετρο μικρότερη του 1mm) εξασφαλίζει μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, ελαχιστοποιεί την αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος και των υλικών των δοχείων αποθήκευσης με τα PCMs καθώς επίσης εξασφαλίζει πλήρη έλεγχο της αλλαγής όγκου κατά την αλλαγή φάσης. Το συνήθως χρησιμοποιούμενο υλικό για τη δημιουργία προστατευτικού κεύφους είναι πλαστικό ή συνθετικές ρητίνες.

Η ενσωμάτωση του υλικού σε πορώδες άλλου υλικού που αποτελεί τη βάση του σύνθετου τελικού προϊόντος απαιτεί να μην υπάρχει αλληλεπίδραση του PCM με το υλικό και να περιορίζεται στο ελάχιστο η πιθανότητα διαφυγής του PCM από το πορώδες όταν βρίσκεται σε υγρή φάση.[5],[23].

2.6.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Εκτενείς προσπάθειες έχουν γίνει και γίνονται στο τμήμα εφαρμογών των PCMs με συστήματα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας όπου η απαιτούμενη θερμότητα αποθηκεύεται την ημέρα για να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε ώρες μη ηλιοφάνειας. Η χαμηλή τιμή του συντελεστού αγωγιμότητας δεν βοηθάει την ταχεία απορρόφηση της προσφερόμενης θερμότητας και για το λόγο αυτό εφαρμόζονται πλήθος τεχνικών ενίσχυσής της.

Οι εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως οι εξής:

- ✓ Παράλληλες πλάκες: το PCM τοποθετείται μεταξύ παράλληλων πλακών σε λεπτά και διαδοχικά στρώματα αφήνοντας μεταξύ τους ικανό κενό για τη ροή του μέσου (συνήθως αέρας, νερό, διάλυμα νερού γλυκόλης, λάδι κτλ.)
- ✓ Σωληνώσεις: το PCM τοποθετείται εντός σωληνώσεων μικρής διαμέτρου, σχηματίζοντας δέσμη σωληνώσεων και το ρευστό κινείται κατά μήκος ή καθετα της δέσμης. Οι σωλήνες πολλές φορές φέρουν πτερύγια.
- ✓ Δοχείο διπλού κελύφους: το PCM τοποθετείται στο κέντρο ενός δοχείου αποθήκευσης διπλού κελύφους και το ρευστό κυκλοφορεί περιφερειακά.
- ✓ Πλακοειδής εναλλάκτης: σε μικρή κλίμακα μόνο έχουν χρησιμοποιηθεί και διατάξεις παρόμοιες με πλακοειδή εναλλάκτη. Στην κυψελοειδή διάταξη αντιμετωπίζονται προβλήματα από τις τάσεις που δημιουργούνται με την αύξηση του όγκου κατά την τήξη του υλικού, φαινόμενο που θέτει όρια στις εφαρμογές της.
- ✓ Πτερυγιοφόροι σωλήνες: το PCM τοποθετείται σε δοχείο το οποίο το διαπερνούν πτερυγιοφόροι σωλήνες. Κατ'αυτή τη διάταξη το υλικό καλύπτει όλη την περιοχή μεταξύ δοχείου και σωλήνα καθώς και την απόσταση μεταξύ των πτερυγίων. Τέτοιου είδους διάταξη είναι αρκετά αποδοτική αν το ρευστό που ρέει εντός των σωληνώσεων είναι υγρό και όχι αέριο.
- ✓ Μικρή σφαίρα εντός δοχείου: το PCM βρίσκεται σε μορφή σφαίρας, συνήθως με πλαστικό κέλυφος και τοποθετείται εντός δοχείου. Το ρευστό που μεταφέρει τη θερμότητα εισέρχεται και εξέρχεται από το δοχείο μέσω μιας σωληνώσεως εισαγωγής και εξαγωγής αντίστοιχα ή ένας αεραγωγός εισόδου και εξόδου στην περίπτωση αερίου μέσου. Το

μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μεγάλη πτώση πίεσης που παρουσιάζεται μεταξύ εισόδου και εξόδου.

Η αλλαγή του όγκου των PCM (περίπου 10% είναι μια τυπική τιμή) δε δημιουργεί προβλήματα μόνο κατά την τήξη του υλικού (αύξηση όγκου) αλλά και κατά την πήξη του (μείωση όγκου) διότι υπάρχει πιθανότητα να σχηματιστούν κοιλότητες εντός του υλικού ή ακόμη και μερική αποκόλληση του υλικού από την επιφάνεια συναλλαγής, φαινόμενο που θα μειώσει δραματικά το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Προβλήματα τέτοιας φύσεως εύκολα παρακάμπτονται με τη χρήση σφαιριδίων “ενισχυμένων” με PCM.[5],[24],[26].

2.6.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η ιδέα έχει πραγματοποιηθεί μόνο σε ερευνητικό επίπεδο χρησιμοποιώντας ένυδρο άλας για PCM και λάδι για μέσο μεταφοράς από την πηγή στο σύστημα αποθήκευσης. Στην πειραματική διάταξη φυσαλίδες λαδιού διαπερνούν το PCM μεταφέροντας την απαιτούμενη θερμότητα. Αξιοσημείωτο είναι ότι η αναταραχή που δημιουργούν οι φυσαλίδες μειώνουν και το φαινόμενο του supercooling και του διαχωρισμού των φάσεων.[5],[24],[26].

2.6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ PCMs ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ

Τα υλικά αλλαγής φάσης βρίσκουν εφαρμογή σε τόσο σε παθητικά όσο και σε ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης. Παθητικά είναι εκείνα που δεν χρησιμοποιούν μηχανικά μέσα για την πρόσδοση θερμότητας ή ψύχους ενώ ενεργητικά είναι αυτά που περιλαμβάνουν και μηχανικά μέρη. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη η αποθήκευση θερμότητας ή ψύχους σε για να υπάρξει ισορροπία μεταξύ διαθεσιμότητας και ζήτησης. Οι κύριοι τρόποι χρήσης PCMs σε κτιριακές εφαρμογές είναι οι εξής:

-PCM σε τοιχοποιία

-PCM σε άλλα μέρη του κτιρίου εκτός των τοίχων

-PCM σε μονάδες αποθήκευσης θερμότητας ή ψύχους.

Τα δυο πρώτα είναι παθητικά συστήματα με την έννοια ότι η θερμότητα ή το ψύχος που αποθηκεύονται αυτόματα, απελευθερώνονται όταν η εσωτερική ή εξωτερική θερμοκρασία φθάσει πάνω ή πέσει κάτω από το σημείο τήξεως. Το τρίτο είναι ενεργητικό σύστημα όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή το αποθηκευμένο ψύχος βρίσκεται σε δεξαμενή θερμικά χωρισμένη από το κτίριο σε μόνωση και αποδίδεται μόνο κατόπιν ζήτησης και όχι αυτόματα.

Τοιχοποιία:

Η θερμοκρασία τήξεως του χρησιμοποιούμενου PCM καθορίζει τη βέλτιστη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του τοίχου κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Σύμφωνα με μελέτες, ο αποδοτικότερος τρόπος ρύθμισης του τοίχου επιτυγχάνεται με επιλογή PCM του οποίου η θερμοκρασία τήξεως είναι πολύ κοντά με τη συνολική μέση ημερήσια θερμοκρασία του τοίχου, δηλαδή τη μέση τιμή της ημερήσιας θερμοκρασίας και την μέση τιμή της συνάρτησης της θερμοκρασίας του τοίχου σε

σχέση με το πάχος του, και όχι του περιβάλλοντος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται το μέγιστο της αποθηκευτικής ικανότητας του PCM καθώς και η εξομάλυνση των θερμοκρασιών στον εσωτερικό χώρο.

Ένας τοίχος Trombe με PCM είναι ένα εξαιρετικό παράδειγμα βελτίωσης απόδοσης ενέργειας με χρήση PCM σε παθητικό σύστημα αποθήκευσης έμμεσου κέρδους. Ο κοινός τοίχος Trombe αποτελείται από έναν συμπαγή τοίχο μεγάλης θερμοχωρητικότητας από σκυρόδεμα πάχους 30-40cm, βαμμένο με σκούρο χρώμα συνήθως μαυρό εξωτερικά. Σε απόσταση 3 cm υπάρχει γυάλινη επιφάνεια σε μονό ή διπλό στρώμα ή ενίοτε πλαστική. Η ηλιακή θερμότητα συλλέγεται στο χώρο μεταξύ του τοίχου και του υαλοστασίου και διανέμεται στον εσωτερικό χώρο κατά τη διάρκεια αρκετών ωρών. Στο επάνω και κάτω μέρος του τοίχου υπάρχουν ανοίγματα για τη διακίνηση του αέρα. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία πέσει κάτω από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του τοίχου, η θερμότητα αρχίζει να ακτινοβολείται στο εσωτερικό. Η απώλεια θερμότητας από τον τοίχο μπορεί να ρυθμιστεί με μια μονωτική κουρτίνα που κλείνει τη νύχτα στο χώρο μεταξύ του τοίχου και του υαλοστασίου ώστε να μην φεύγει θερμότητα προς το ψυχρότερο εξωτερικό περιβάλλον. Οι απλοί τοίχοι Trombe στηρίζονται στην αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Η ενίσχυσή τους με PCMs δίνει αρκετά μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας ανά μονάδα μάζας και επομένως αποτελούν μια ελκυστική πρόταση με θετικά αναμενόμενα αποτελέσματα.

Ένας τοίχος Trombe γεμάτος PCM κατασκευάζεται στη νότια πλευρά του σπιτιού. Ο τοίχος θερμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας με εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία λιώνοντας το PCM. Τη νύχτα η θερμότητα εκλύεται θερμαίνοντας τον εσωτερικό χώρο. Για μια δεδομένη ποσότητα αποθήκευσης θερμότητας οι μονάδες αλλαγής φάσης απαιτούν λιγότερο χώρο από τους απλούς τοίχους Trombe και είναι πιο ελαφριές, άρα καθιστούν ευκολότερη τη χρήση τους σε κτιριακές εφαρμογές. Ένυδρα άλατα και παραφίνες είναι τα πιο συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά αλλαγής φάσης σε τοίχους Trombe.

Οι μελέτες και οι εφαρμογές στην τοιχοποιία κατέληξαν στο συμπέρασμα πως ένας σωστά σχεδιασμένος τοίχος PCM περιορίζει αρκετές από τις ανεπιθύμητες επιπτώσεις των τοίχων από μπετόν. Ενδεικτικά αναφέρεται πως πειραματικές μελέτες έδειξαν πως ένας τοίχος PCM πάχους 8.1 cm έχει ελαφρώς καλύτερη θερμική απόδοση από έναν τοίχο από μπετόν πάχους 40 cm.[5],[14].

Δομικά υλικά:

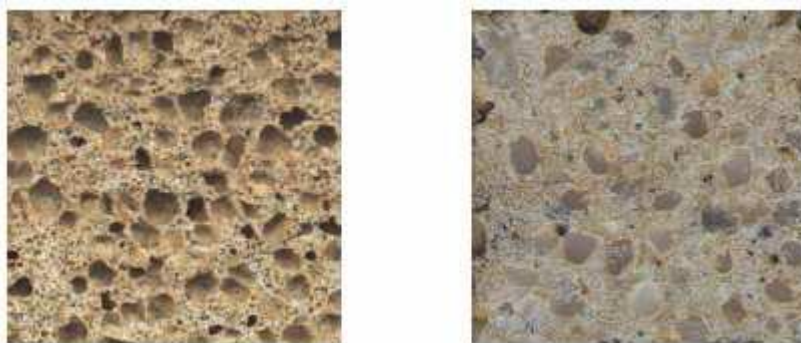
Η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας στην πέτρα ήταν γνωστή από τους αρχαίους χρόνους και αξιοποιηθεί στην κατασκευή των κατοικιών. Η χρήση όμως υλικών που αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα παρουσιάζει διάφορα προβλήματα με κυριότερα την υπερβολική ποσότητα του υλικού που απαιτείται και τις ανεπιθύμητες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στη θερμική συμπεριφορά του κτιρίου. Τα δομικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στα κτίρια παραμένουν στη στερεή κατάσταση σε ολόκληρο το εύρος θερμοκρασιών χρήσης τους. Ομοίως συμπεριφέρονται και τα συμβατικά μονωτικά υλικά τα οποία ως χαρακτηριστικό γνώρισμα έχουν την αντίσταση που παρουσιάζουν στη διάβαση της θερμότητας διαμέσου της μάζας τους. Αντίθετα με αυτή την προσέγγιση μόνωσης των κτιρίων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν υλικά που θα αποθήκευαν τη θερμότητα που εισέρχεται στο κτίριο από το κέλυφος την καλοκαιρινή περίοδο ώστε να μην αυξηθεί η θερμοκρασία των χώρων ή να αποθηκεύουν τη θερμότητα που προσπίπτει στο κτίριο με μορφή ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας κατά την περίοδο του

χειμώνα. Η βασική ιδέα των συστημάτων αποθήκευσης ως μέσα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μετατόπιση των μεγίστων ενεργειακών απαιτήσεων της εγκατάστασης σε ώρες εκτός των περιόδων μέγιστης ζήτησης του συστήματος διανομής ενέργειας ή η εξομάλυνση της καμπύλης ενεργειακής απαίτησης της εγκατάστασης ώστε να μην παρουσιάζονται σημεία αιχμής κατά την εικοσιτετράωρη λειτουργία της. Οι έρευνες καθώς και οι εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί αποδεικνύουν ότι τα δομικά υλικά που έχουν εμποτιστεί με PCM ή δομικές κατασκευές που εμπεριέχουν PCM μπορούν να αποθηκεύσουν 5-14 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά.

Η εφαρμογή τους στις κτιριακές εγκαταστάσεις μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση των PCMs αυτούσια ως στρώμα υλικού μέσα στην τοιχοποιία ή σαν συστατικό σύνθετου υλικού με κύριο συστατικό το γύψο ή το τσιμέντο (π.χ. γυψοσανίδα με πρόσθετο συστατικό PCM, σοβάς με PCM κ.ά.). Ειδικά όταν χρησιμοποιούνται οργανικά PCMs η ενσωμάτωσή τους σε υλικά με υψηλό δείκτη πυραντίστασης εξασφαλίζει εν μέρη τη μη αλάφλεξη των PCMs σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η ενσωμάτωση PCM σε υλικά όπως ο γύψος ή το τσιμέντο εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό τη συγκράτηση του υλικού ακόμη και μετά την πλήρη υγροποίησή του, καθώς και τη μη πρόσληψη υγρασίας από τον αέρα του περιβάλλοντος. Σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα με την κατηγορία του υλικού (λιπαρά οξέα, ένυδρα άλατα) είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση του PCM σε προστατευτικό κάλυμα πριν την ενσωμάτωσή του σε δομικό υλικό. Πειραματικά έχει αποδειχθεί η συμβατότητα των παραφινών με το γύψο και το τσιμέντο και για αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί δομικά υλικά εμποτισμένα με παραφίνες.

Ιδιότητα	Πέτρα	Νερό	Οργανικό PCM	Ανόργανο PCM
Πυκνότητα, kg/m ³	2240	1000	800	1600
Ειδική Θερμοχωρητικότητα, kJ/kg	1.0	4.2	2.0	2.0
Λανθάνουσα Θερμότητα, kJ/kg	–	–	190	230
Λανθάνουσα Θερμότητα, kJ/m ³	–	–	152	368
Μάζα Υλικού για 10 ⁶ J, kg	67.000	16.000	5300	4350
Όγκος Υλικού για 10 ⁶ J, 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

Σχημα 2.11 Ιδιότητες δομικών υλικών



Σχήμα 2.12 Τσιμέντο απλό(αριστερά)και ενισχυμένο με PCM(δεξιά)



Σχήμα 2.13 Τούβλο ενισχυμένο με PCM

Οικοδομικά υλικά εμποτισμένα με PCM χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή κτιρίων οδηγώντας σε μια κατασκευή με μεγάλη θερμική αδράνεια χωρίς την αντίστοιχα μεγάλη μάζα που θα αναμενόταν. Έρευνες έδειξαν πως ένα υλικό συγκολλημένο μέσα σε μπετόν έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με μια ισοδύναμη μάζα τσιμέντου, και ειδικότερα η χρήση δυο τύπων PCM του βουτηλοεστέρα και της εμπορικής παραφίνης. Ακόμη, μελέτες που έγιναν ως προς την κατασκευαστική ευστάθεια για διάφορους θερμικούς κύκλους του σύνθετου συστήματος PCM-τσιμέντου που αποτελείται από ένυδρο θειώδες νάτριο ενσωματωμένο στο τσιμέντο, έδειξαν πως η μεγάλη επιφάνεια αποθήκευσης αποστειρωμένου πορώδους τσιμέντου λειτουργεί σαν ένα καλό καλούπι του τηκόμενου $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (σημείο τήξεως 48°C) και βελτιώνει την κατασκευαστική του ευστάθεια κατά τη διάρκεια των θερμικών κύκλων. [5],[14],[27]

Ταβανοσανίδες

Ένα σύστημα θέρμανσης χώρου που ενσωματώνει υλικά αλλαγής φάσης στην οροφή αναπτύχθηκε από τους Gutherz και Schiler. Ηλιακοί ανακλαστήρες χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν την ηλιακή ενέργεια μέσω των παραθύρων στα υλικά αλλαγής φάσης. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος είναι ότι επιτρέπει σε μια μεγάλη επιφάνεια να αποτελέσει αποθηκευτικό μέσο θερμότητας χωρίς να απαιτούνται μεγάλοι όγκοι αποθηκευτικού μέσου όπως θα απαιτούνταν στην περίπτωση αποθήκευσης αισθητής θερμότητας. Η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει τη δυνατότητα να ανακτήσει 17-36% των θερμικών απωλειών πάνω στα θερμικά κέρδη. Οι ταβανοσανίδες αποτελούν σημαντικό στοιχείο της σκεπής και χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη κτιρίων. Μια προσπάθεια να μειωθεί το φορτίο αιχμής σε ένα

σύστημα κλιματισμού έγινε με χρήση PCM στις ταβανοσανίδες. Την περίοδο ψύξης, ο ψυχρός αέρας από τη μονάδα διαχείρισης αέρα διέρχεται από το κενό στο θάλαμο οροφής για να αποθηκεύσει την ψύξη στις ταβανοσανίδες με PCM. Η ψύξη ανακτάται κατά τη διάρκεια 2 ωρών αιχμής για να ψύξει το δωμάτιο. Βρέθηκε ότι η αύξηση στη θερμοκρασία του δωματίου ήταν μόνο 2 °C ενώ αν δεν γινόταν χρήση PCM η αύξηση στη θερμοκρασία δωματίου θα ήταν 6 °C.[14]

Παντζούρια με PCM

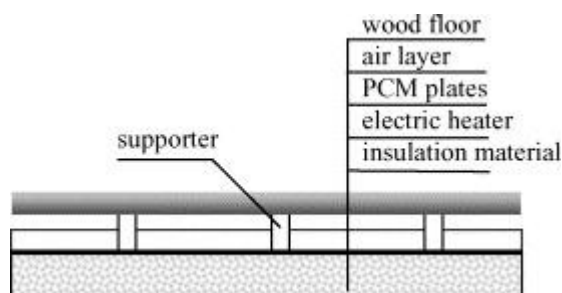
Παντζούρια που περιέχουν PCM στην εσωτερική πλευρά τους τοποθετούνται στο εξωτερικό των παραθύρων. Την ημέρα τα παντζούρια ανοίγουν προς τα έξω και η ηλιακή ακτινοβολία λιώνει το PCM το οποίο απορροφά θερμότητα. Τη νύχτα τα παντζούρια κλείνουν και η αποθηκευμένη θερμότητα στο PCM ανακλάται μέσα στα δωμάτια. Μελέτη που έγινε για τη θερμική απόδοση ενός δοκιμαστικού στοιχείου με και χωρίς PCM έδειξε πως η αποθηκευτική ικανότητα του στοιχείου με χρήση PCM αυξήθηκε μέχρι και 4 °C για 4-5 ώρες συγκριτικά με το στοιχείο χωρίς PCM.[14]

Ενδοδαπέδια θέρμανση

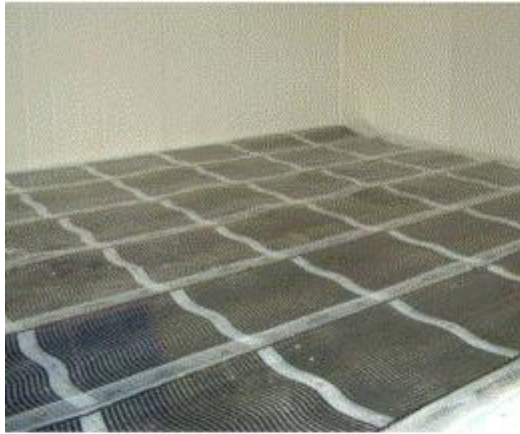
Τα ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης στο δάπεδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε περίοδο εκτός αιχμής στα κτίρια. Η ενδοδαπέδια θέρμανση παρουσιάζει το μεγάλο πλεονέκτημα της ομοιόμορφης θερμικής άνεσης σε ολόκληρο το χώρο που θερμαίνεται για ένα εύρος θερμοκρασιών περίπου 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 δεν παρεμβαίνει στην αισθητική του χώρου οπότε μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδους εσωτερικό χώρο. Η ενδοδαπέδια θέρμανση μπορεί να εφαρμοστεί με δυο τρόπους: με τα συστήματα ύδατος (θερμά-υγρά) και τα ηλεκτρικά (ξηρά). Στα πρώτα, το νερό κατά βάση θερμαίνεται από την καύση πετρελαίου ή φυσικού αερίου και ως εκ τούτου η χρήση PCM δεν προσφέρει κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα όταν πρώτη ύλη αποτελούν τα συμβατικά καύσιμα. Στην περίπτωση όμως που για τη θέρμανση νερού χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη πηγή ενέργειας όπως η ηλιακή ακτινοβολία τότε η θερμική ενέργεια πρέπει να δύναται να αποθηκευτεί. Αν δηλαδή για τη χρονική στιγμή που θερμαίνεται το νερό δεν υπάρχουν απαιτήσεις θέρμανσης του χώρου ή ζεστού νερού χρήσης τότε η θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στο PCM που βρίσκεται στο δάπεδο και να εξασφαλιστεί θερμότητα για μετέπειτα χρήση.

Σε ό,τι αφορά στα ηλεκτρικά συστήματα τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκμεταλλευόμενα το χαμηλό κόστος του ηλεκτρισμού στις ώρες αιχμής. Τα φορτία αιχμής μπορούν να καταναλωθούν κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλότερο. Σε εφαρμογή κεριού παραφίνης σε υποδαπέδιο σύστημα αποθήκευσης σε στρώμα πάχους 30mm μεταξύ της θερμαινόμενης επιφάνειας και των πλακακιών του δαπέδου βρέθηκε πως η θερμότητα που προέρχεται από το έδαφος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από 30 σε 75 W/m² όταν γίνεται χρήση PCM. Η λειτουργία της εγκατάστασης, προορίζεται κυρίως για τις ώρες μη αιχμής, προσφέροντας θερμότητα από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Τη θερμότητα αυτή πρώτα θα απορροφήσει το PCM που περιβάλλει τις ηλεκτρικές

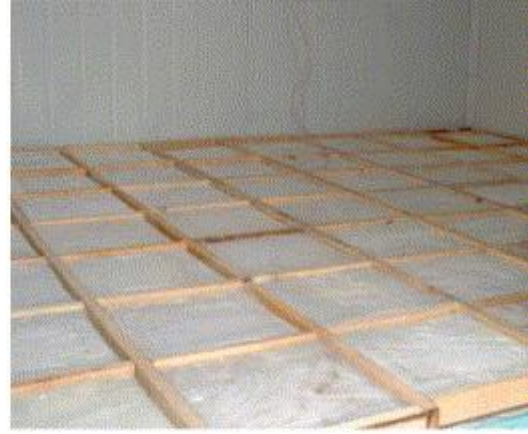
αντιστάσεις. Η θερμότητα αυτή, αρχικά θα αποθηκευτεί με τη μορφή της αισθητής θερμότητας στο PCM, μέχρι να φτάσει το σημείο τήξης του. Μόλις το PCM φτάσει το σημείο τήξης του αρχίζει να λιώνει, αποθηκεύοντας θερμική ενέργεια υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Πρακτικά, ένα μικρό ποσοστό από την παραγόμενη στις αντιστάσεις θερμότητα διαφεύγει από το PCM και κατευθύνεται προς τη βάση του πατώματος, πριν ακόμα το PCM αποκτήσει την ονομαστική λανθάνουσα θερμότητα. Η ροή θερμότητας προς την αντίθετη κατεύθυνση συναντά τη μεγάλη θερμική αντίσταση της θερμομόνωσης και είναι ανεπιθύμητη. Η λειτουργία του συστήματος συνεχίζει φορτίζοντας το PCM μέχρι να αποθηκευτεί η μέγιστη λανθάνουσα θερμότητα στο σύστημα. Από εκείνη τη στιγμή και μετά, όλη η θερμότητα που παράγεται στις ηλεκτρικές αντιστάσεις κατευθύνεται στο χώρο, αφού έχει πρώτα αποθηκευτεί στη βάση του δαπέδου της κατασκευής. Η διαδικασία που αναλύθηκε παραπάνω εμφανίζει ως χρονική καθυστέρηση το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που μπαίνει σε λειτουργία η εγκατάσταση θέρμανσης, μέχρι τη στιγμή που θα φορτιστεί πλήρως το PCM. Αυτήν την χρονική καθυστέρηση πρέπει να εκμεταλλευτούμε για να επιτύχουμε μείωση του κόστους λειτουργίας της εγκατάστασης. Όταν οι ηλεκτρικές αντιστάσεις σταματήσουν να λειτουργούν, το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί. Η θερμότητα που προσφέρεται στο χώρο από το σύστημα προέρχεται από την αποφόρτιση του PCM. Με άλλα λόγια το PCM αρχίζει να αποφορτίζεται, προσφέροντας στο χώρο τη λανθάνουσα θερμότητα που είχε αποθηκεύσει από τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Το χρονικό διάστημα που θα συνεχίσει να λειτουργεί το σύστημα μετά από τη διακοπή λειτουργίας των αντιστάσεων, είναι ο χρόνος αποφόρτισης του PCM.[30],[31].



Σχήμα 2.14 Σχηματική παράσταση ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με χρήση πλακών PCM



(a)



(b)



(c)

(a) electric heaters (b) shape-stabilized PCM plates (c) wood floor

Σχήμα 2.15 Φωτογραφίες της ενδοδαπέδιας εγκατάστασης(PCM σε πλάκες)



Σχήμα 2.16 Ενδοδαπέδια ηλεκτρική εγκατάσταση(PCM σε κόκκους)

2.6.5 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ

Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται συν τοις άλλοις και στις συσκευασίες για τη μεταφορά προϊόντων κυρίως ευαίσθητων στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις που απαιτούν πολύ συγκεκριμένα και στενά θερμοκρασιακά πλαίσια κατά τη μεταφορά τους (π.χ. τρόφιμα, φάρμακα, αίμα κ.ά.). Τα PCMs καθώς μεταπίπτουν από τη στερεή στην υγρή φάση και αντίστροφα, έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία τους. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά κατάλληλη τη χρήση τους στις συσκευασίες αφού μπορούν να προστατεύουν τα προϊόντα από μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Σε γενικές γραμμές, πριν από τη μεταφορά φορτίζονται τα PCMs είτε σε ψυγείο, είτε σε φούρνο, ώστε να είναι έτοιμα για χρήση. Το πολύ θετικό εδώ είναι ότι το PCM παρέχει τη δυνατότητα φόρτισής του καταναλώνοντας ηλεκτρική ενέργεια μη αιχμής, που ως γνωστό, είναι φθηνότερη.

Σε εφαρμογές μεταφοράς τροφίμων για παράδειγμα, έχει χρησιμοποιηθεί ως PCM μοριακό μίγμα αλκανίων. Πρόκειται για στερεό διάλυμα του οποίου τα συστατικά είναι οργανικά. Αυτά τα μοριακά μίγματα έχουν ως πλεονέκτημα ότι επειδή οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με την επιλογή κατάλληλων συστατικών το μίγμα αποκτά τις επιθυμητές ιδιότητες. Η εφαρμογή του κατέληξε σε πολύ καλύτερους (μεγαλύτερους) χρόνους ανόδου της θερμοκρασίας της συσκευασίας σε σύγκριση με τη συμβατική.

Σε συσκευασίες μεταφοράς αίματος επίσης χρησιμοποιείται μοριακό μίγμα αλκανίων. Η διάταξη περιλαμβάνει μια "σακούλα" με διπλό τοίχωμα που περιβάλλει τη σακούλα που περιέχει το αίμα και στη συνέχεια μαζί τοποθετούνται μέσα σε ειδικό κουτί κατάλληλο για μεταφορά. Η αρχή λειτουργίας είναι απλή: στην αρχή η σακούλα με το PCM τοποθετείται σε ψυγείο ώστε το υλικό αλλαγής φάσης να στερεοποιηθεί πλήρως. Στη συνέχεια τοποθετείται στη συσκευασία για τη μεταφορά αίματος όπως ήδη αναφέρθηκε. Στόχος είναι η διατήρηση του αίματος στους 4°C με απόκλιση 2°C κατά τη μεταφορά του για παράδειγμα από το νοσοκομείο στον τελικό του προορισμό, επομένως η θερμοκρασία του PCM πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 2 και 6°C. Σημείο τήξεως του PCM είναι οι 4,8°C. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος υποτίθεται 22°C. Μετά από εφαρμογή παρατηρήθηκε ότι η συσκευασία με PCM δύναται να διατηρήσει το αίμα σε θερμοκρασία κάτω από 10°C για τουλάχιστον 7 ώρες πράγμα που αποδεικνύει ότι το αίμα προστατεύεται 8 φορές περισσότερο χρόνο από όταν χρησιμοποιείται συσκευασία χωρίς PCM.

Η μεταφορά ζεστών γευμάτων απαιτεί μία πηγή θερμότητας. Μία ηλεκτρική θερμαντική μονάδα δεν μπορεί να είναι διαθέσιμη κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες και σε αυτές τις περιπτώσεις τα PCMs προσφέρουν ιδανική λύση, αφού επιτρέπουν την κατασκευή ενός αυτό-θερμαινόμενου σκεύους μεταφοράς.

Οι εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο έχουν αναπτύξει πλήθος τυποποιημένων προϊόντων μεταφοράς τα οποία είναι εφοδιασμένα με εγκοπές. Αυτές οι εγκοπές πέραν της ευελιξίας και ευκολίας στον τομέα της συναρμολόγησης του κιβωτίου μεταφοράς, εμφανίζουν το πρόσθετο πλεονέκτημα της αεροστεγούς κατά το δυνατόν μεταφοράς των αγαθών, γεγονός το οποίο ελαχιστοποιεί τις θερμικές απώλειες. Πέρα όμως από αυτές τις συσκευασίες προσφέρονται και έτοιμα κιβώτια ενισχυμένα με PCMs για τη μεταφορά οσοδήποτε μεγάλου όγκου προϊόντων, ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες οποιουδήποτε πελάτη ή επιχείρησης.[32],[33].



Σχήμα 2.17 Συσσκευασίες μεταφοράς προϊόντων με PCM

2.6.6 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι ηλεκτρονικές συσκευές όπως τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, τα laptops, τα κινητά τηλέφωνα με τον καιρό εξελίσσονται όλο και περισσότερο. Η εξέλιξή τους οδηγεί μεν σε μικρότερα μεγέθη, παράλληλα όμως αυξάνεται η ισχύς τους και επομένως οι θερμικές τους απώλειες. Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που συναντά το ρεύμα καθώς διαπερνά τα καλώδια, τα επίπεδα πυριτίου, τα transistors των επιμέρους ηλεκτρονικών εξαρτημάτων των συσκευών αυξάνουν τη θερμοκρασία τους με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος φθοράς όπως θραύση, τήξη ακόμα και ανάφλεξη των εξαρτημάτων. Οι μηχανικοί στοχεύουν να βρουν τρόπους ώστε να διατηρήσουν τη θερμοκρασία των εξαρτημάτων μέσα στα επιτρεπόμενα όρια (συνήθως μέχρι 50°C) χωρίς να χρειαστεί να αυξηθούν το μέγεθος των συσκευών. Για το λόγο αυτό δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συμβατικές τεχνικές εξαναγκασμένης μεταφοράς θερμότητας που βασίζεται σε ανεμιστήρες και συναφή εξαρτήματα. Αντιθέτως, η χρήση υλικών αλλαγής φάσης φαίνεται ιδιαίτερα κατάλληλη. Όπως είναι γνωστό, τα PCMs δρουν σε τρεις φάσεις: κατά την πρώτη η θερμοκρασία

του στερεού PCM αυξάνεται μέχρι το σημείο τήξεώς του καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντός του και απορροφά θερμότητα. Κατά τη δεύτερη φάση η θερμοκρασία του PCM παραμένει σταθερή καθώς το PCM λιώνει. Κατά τη τρίτη φάση η θερμοκρασία υγρού PCM συνεχίζει να αυξάνεται. Για να εισαχθούν τα PCM επιτυχώς σε ηλεκτρονικές συσκευές θα πρέπει να μην μπουν στην τρίτη φάση αλλά να παραμείνουν στη δεύτερη έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση. Η χρησιμοποίηση PCMs σε αυτά τα συστήματα για την απομάκρυνση των σημείων αιχμής που παρουσιάζει η χρονική κατανομή της θερμοκρασίας του εξαρτήματος, είναι απολύτως αξιόπιστη, καθώς το PCM ανανεώνεται από μόνο του και επανέρχεται στην αρχική κατάσταση, μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων αιχμής της θερμοκρασίας και δεν είναι απαραίτητος κανενός είδους κινητήρας ή διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας. Τα περισσότερα προϊόντα που χρησιμοποιούνται σήμερα σε ηλεκτρονικές διατάξεις θυμίζουν δεσμίδες με μικρά αυτοκόλλητα χαρτιά και έρχονται σε άμεση επαφή με το εξάρτημα για το οποίο προορίζονται.[34],[35].



Σχήμα 2.18 PCM για ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Οι εφαρμογές PCM στους ηλεκτρονικούς και τους φορητούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές προστατεύουν τις συσκευές από υπερθέρμανση του κυρίου επεξεργαστή καθώς και άλλων ηλεκτρονικών τους εξαρτημάτων εναλλασσομένου ρεύματος. Πλέον έχουν αναπτυχθεί προϊόντα που δύνανται να αντικαταστήσουν πλήρως τα μεταλλικά πτερύγια ψύξης του επεξεργαστή. Αν και το κόστος είναι αρκετά αυξημένο λόγω κυρίως του μικρού μεγέθους τους η λειτουργία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και οικονομικά συμφέρουσα ιδίως όσο αυξάνεται ο αριθμός των επεξεργαστών και η αντίστοιχη επεξεργαστική ισχύς οπότε και η αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα. Στους φορητούς υπολογιστές για την αποφυγή της υπερθέρμανσης τοποθετήθηκε μια μικρή αλουμινένια πλάκα η οποία φέρει τέσσερις κυλότητες με PCM. Επάνω στην πλάκα τοποθετείται μια λεπτή στρώση αλουμινίου επάνω στην οποία έχουν τοποθετηθεί τέσσερις θερμαντήρες μέγιστης ισχύος 30W ο καθένας. Η στρώση αλουμινίου αποτελεί καλό αγωγό θερμότητας και τοποθετείται επάνω στην πλάκα με τρόπο ώστε κάθε θερμαντήρας να βρίσκεται πάνω από μια κυλότητα PCM. Ως PCM χρησιμοποιήθηκε το εικοσάνιο με σημείο τήξεως 35.6°C. Έπειτα από πολλαπλά πειράματα στη συσκευή με και χωρίς PCM οι ερευνητές κατέληξαν πως με την κατάλληλη εισαγωγή των PCM σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα μπορεί να διατηρηθεί η θερμοκρασία τους εντός επιτρεπτών ορίων και να αποφευχθεί η υπερθέρμανση. Τα πλεονεκτήματα, συμπερασματικά, στη χρήση PCM σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές

είναι η αύξηση του χρονικού διαστήματος πρώτης εκκίνησης του ανεμιστήρα από τα 20 λεπτά περίπου στις τέσσερις ώρες, μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του υπολογιστή κατά 25 %, αύξηση της ζωής του επεξεργαστή και αύξηση των επιδόσεων του λόγω της ελάττωσης της μέσης θερμοκρασία λειτουργίας του.[34],[35].

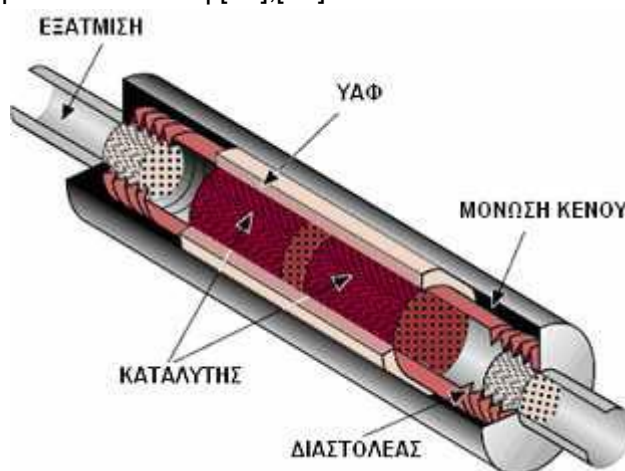
Σε ό,τι αφορά τέλος στις τηλεπικοινωνίες, τα συστήματα τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών περιλαμβάνουν συσκευές και ηλεκτρονικά εξαρτήματα με εξεζητημένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, ακριβά και καταναλωτικά από ενεργειακής απόψεως και πολύ ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες, τα οποία είναι υπεύθυνα για την ευρυθμη λειτουργία του αντίστοιχου δικτύου. Ο πομποδέκτης βάσης (Base Station Subsystem(BBS)) είναι το κομμάτι εκείνο του κλασσικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας το οποίο διαχειρίζεται την κίνηση και το σήμα του δικτύου, καθώς επίσης εκτελεί και εργασίες όπως η αποκωδικοποίηση των συνομιλιών, ο διαχωρισμός των καναλιών του δικτύου από άλλα δίκτυα κ.ά. Ο πομποδέκτης βάσης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στη θερμότητα και ο περιβάλλον χώρος του πρέπει να διατηρείται διαρκώς κάτω από τους 35°C. Σε αρκετές περιπτώσεις και για διάφορους λόγους μπορεί να παρατηρείται συχνή διακοπή ρεύματος αναγκάζοντας τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας να εφοδιάζουν το κουβούκλιο του BSS με ντιζελογεννήτριες για να ενισχύσουν το σύστημα κλιματισμού του στην περίπτωση διακοπής. Τα PCMs που χρησιμοποιούνται σε τέτοια περίπτωση απορροφούν θερμότητα από το εσωτερικό του θαλάμου που παράγεται από τη λειτουργία του BSS ελαχιστοποιώντας ή ακόμη εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης γεννήτριας για κλιματισμό έχοντας μικρότερο κόστος αφού δεν χρησιμοποιούνται συμβατικά καύσιμα για τη γεννήτρια. Το PCM θα επαναφορτιστεί όποτε είναι διαθέσιμη η πηγή ενέργειας οπότε θα δουλεύει το κανονικό σύστημα κλιματισμού επομένως και θα αποβάλει την αποθηκευμένη θερμότητα.[36],[37].

2.6.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΟΧΗΜΑΤΑ

PCMs χρησιμοποιούνται σήμερα και στον τομέα των οχημάτων για την αποφυγή υπερθέρμανσης της μηχανής εσωτερικής καύσης και την προθέρμανσή της πριν την ανάφλεξη, εφαρμογή πολύ χρήσιμη ιδιαίτερα στα πολύ ψυχρά κλίματα. Το PCM τοποθετείται σε λεπτούς σωλήνες κι αυτοί με τη σειρά τους τοποθετούνται σε έναν μεγάλο κύλινδρο. Ο κύλινδρος συνδέεται με το ψυγείο του αυτοκινήτου και αποθηκεύει πλεονάζουσα θερμότητα όταν ο κινητήρας λειτουργεί στα θερμοκρασιακά του όρια, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η υπερθέρμανση. Όταν η μηχανή σταματήσει να λειτουργεί και η θερμοκρασία της μειωθεί τα PCMs απελευθερώνουν θερμότητα αποφορτιζόμενα με αποτέλεσμα να διατηρούν ζεστή τη μηχανή ώστε να είναι ευκολότερη η επόμενη εκκίνηση. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται ο συνολικός συντελεστής κατανάλωσης καυσίμου.

Μια ακόμη εφαρμογή των PCMs στα οχήματα είναι στο σύστημα εξαγωγής τους και συγκεκριμένα στον καταλύτη. Ο καταλύτης σκοπό έχει να εξαλείφει τους υδρογονάνθρακες και τους υπόλοιπους ρύπους από τα καυσαέρια του αυτοκινήτου. Μετατρέπει μέσω της οξειδωσης των ευγενών μετάλλων που περιέχει τα μονοξειδία αζώτου και άνθρακα από την καύση του καυσίμου στον κύλινδρο σε λιγότερο βλαβερά και μη δηλητηριώδη διοξειδία. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει η θερμοκρασία του καταλύτη να είναι πολύ υψηλή γύρω στους 300°C. Αυτή η θερμοκρασία δεν αναπτύσσεται αμέσως κατά την εκκίνηση του αυτοκινήτου στον καταλύτη αλλά μετά από λίγα λεπτά. Έχει παρατηρηθεί ότι κατά την περίοδο της κρύας εκκίνησης εκλύεται

το 60-80% των τοξικών καυσαερίων. Για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα στον καταλύτη εισάγονται υλικά αλλαγής φάσης με σκοπό να αποθηκεύσουν θερμότητα κατά την κίνηση του αυτοκινήτου και να την απελευθερώσουν στην επόμενη εκκίνησή του. Μαζί με τα PCMs τοποθετείται και μια μόνωση η οποία προστατεύει το σύστημα από απώλειες θερμότητας και εμποδίζει την υπερθέρμανση του συστήματος. Η μόνωση αποτελείται από διπλό μεταλλικό κάλυμα εντός του οποίου υπάρχουν ενώσεις υδρογόνου και μετάλλων. Το υδρογόνο είναι καλός αγωγός της θερμότητας. Όταν η θερμοκρασία του καταλύτη αγγίζει τους 900°C το υδρογόνο απελευθερώνεται με αποτέλεσμα να διαφεύγει θερμότητα επομένως να αποφεύγεται η υπερθέρμανση. Η μόνωση αυτή ονομάζεται μόνωση μεταβλητής αγωγιμότητας (V.C.I.Variable Conductance Insulation). Σε οχήματα που εφαρμόστηκε το εν λόγω σύστημα τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά. Οι κινητήρες τέθηκαν σε λειτουργία μετά 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.[38],[39].



Σχήμα 2.19 Εφαρμογή PCM σε καταλύτη αυτοκινήτου

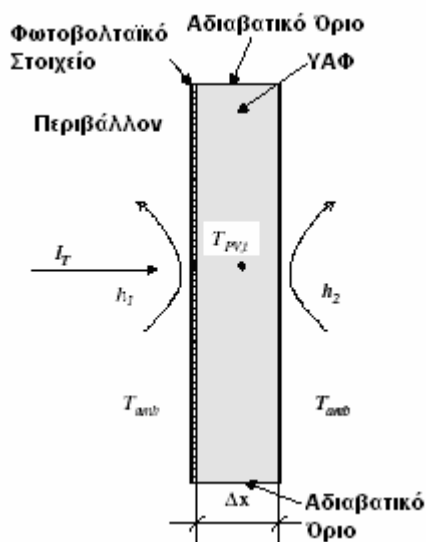
2.6.8 ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΔΥΣΗ

Τα υλικά αλλαγής φάσης χρησιμοποιούνται και στα ρούχα. Η χρήση τους ξεκίνησε από διαστημικές εφαρμογές στις στολές των αστροναυτών για την προστασία τους από τις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές. Σήμερα οι εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης στα ρούχα και γενικότερα στα υφάσματα έχουν επεκταθεί. Χρησιμοποιούνται σε στολές που εκτίθενται σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως σε πυροσβεστικές ή ορειβατικές στολές, αλλά και σε υφάσματα όπως κουβέρτες, παπούτσια, κάλτσες κτλ. Η εισαγωγή PCM στα ρούχα σκοπό έχει να εξασφαλίσει θερμική άνεση, ομοιόμορφα κατανομημένη θερμοκρασία και λιγότερο ιδρώτα. Στα ενδύματα χρησιμοποιούνται κυρίως οργανικά PCMs σε μικροκάψουλες, για να μην εμφανίζονται διαρροές κατά τη μετάβαση στην υγρή φάση. 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 PCMs παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα από τα συνήθη υλικά των ενδυμάτων, αλλά και λόγω του υψηλού κόστους τους, χρησιμοποιείται PCM κατά 20-35% επί του ολικού βάρους του ενδύματος.

Προφανώς για θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο τήξης των PCMs το υλικό βρίσκεται εξ ολοκλήρου στη στερεή του φάση, αν και επειδή το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται σε συνήθεις συνθήκες στους 36°C, προσφέρει συνήθως ένα ποσό θερμότητας στο PCM, το οποίο μπορεί να επανακτήσει στην περίπτωση που η θερμοκρασία του ελαττωθεί. Αν η θερμοκρασία τείνει να αυξηθεί, τότε το PCM απορροφά θερμότητα για να μην υπερθερμανθεί το ανθρώπινο σώμα. Χάρη στα PCMs, η θερμότητα που απορροφάται οδηγεί το υλικό να αλλάξει φάση (από στερεό σε υγρό) αποθηκεύοντας ή απελευθερώνοντας ενέργεια ανάλογα με τη θερμοκρασία του δέρματος. Η θερμότητα αυτή διατηρείται στο PCM και όταν έρθει η ώρα ελευθερώνεται ομοιόμορφα και σταδιακά, δημιουργώντας ένα πολύ πιο αποτελεσματικό θερμομονωτικό στρώμα σταθερής θερμοκρασίας μεταξύ του δέρματος και του εξωτερικού περιβάλλοντος.[40]

2.6.9 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

Έχει παρατηρηθεί, ότι λόγω των υψηλών θερμοκρασιών σε κτίρια, όπου γίνεται χρήση φωτοβολταϊκών, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται με αρκετές απώλειες. 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 ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα έγινε εισαγωγή PCM σε φωτοβολταϊκά στοιχεία με τον κατωτέρω εικονιζόμενο τρόπο. Το PCM τοποθετημένο σε αδιαβατικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, απορροφά την εξέχουσα θερμότητα, περιορίζοντας τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου και βελτιώνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο το βαθμό απόδοσής του.[41]



Σχήμα 2.20 Συνδυασμός PCM και φωτοβολταϊκών.

2.6.10 ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι πηγές ενέργειας στη φύση παρουσιάζουν έντονη περιοδικότητα, γεγονός που καθιστά αναγκαία την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας που δεν χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα τις ώρες με έντονη ηλιοφάνεια, όπου η ζήτηση ενέργειας είναι μικρότερη από αυτή που απορροφάται. Απαραίτητη είναι η δυνατότητα ανάκτησης της ενέργειας αυτής προς ικανοποίηση των θερμικών αναγκών του συστήματος. Η λειτουργία του ηλιακού συστήματος που περιλαμβάνει PCM διαφέρει από το συμβατικό σύστημα μόνο ως προς το δοχείο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Στις ηλιακές εφαρμογές χρησιμοποιούνται εκτενώς τα ένυδρα άλατα. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος βασίζεται στη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου (υγρή σιλικόνη, ορυκτέλαιο κ.ά) από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που παίρνει ο συλλέκτης. Το εργαζόμενο μέσο αφού θερμανθεί, διαβιβάζεται στο PCM και απελευθερώνει το κρυσταλλικό νερό του άλατος. Σχηματίζεται έτσι κορεσμένο υδατικό διάλυμα άλατος και υπάρχει επίπλευση του εργαζόμενου μέσου μέσα σε αυτό. Το εργαζόμενο μέσο οδηγείται κατά ένα μέρος στο συλλέκτη και κατά ένα άλλο μέρος στο δοχείο ανάδευσης όπου αναδεύεται με το υπόλοιπο μέσο και παραλαμβάνει θερμότητα από μια ηλεκτρική αντίσταση αν θεωρηθεί σκόπιμο. Για την ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας, το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στον εναλλάκτη, όπου μεταφέρει θερμότητα σε ένα άλλο μέσο (συνήθως νερό) για τη χρήση της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας. Αφού το εργαζόμενο μέσο ψυχθεί στον εναλλάκτη, διαβιβάζεται στο κορεσμένο διάλυμα για να προσλάβει θερμότητα. Καθώς το κορεσμένο διάλυμα ψύχεται, επανακρυσταλλώνεται και αποδίδει την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια.

Στην περίπτωση χρήσης οργανικού PCM, η διαφορά έγκειται στη φόρτιση και αποφόρτισή του που γίνεται με τήξη και στερεοποίησή του. Προτιμώνται σε εφαρμογές με μικρές θερμοκρασιακές διαφορές και μικρό αποθηκευτικό όγκο. Ένα σύστημα βασισμένο σε PCM προσφέρει μικρότερο όγκο σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα νερού και μεγαλύτερη αποδοτικότητα χάρη στη μικρότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης της ενέργειας.[42],[43],[44].

2.6.11 ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ένα σύνθητες σύστημα κλιματισμού καλείται να καλύψει τις μέγιστες απαιτήσεις για ψύξη κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας συνήθως παραμένει ανενεργό. Οι βιομηχανικές ψυκτικές εγκαταστάσεις διαστασιολογούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν τη μέγιστη στιγμιαία ζήτηση ψύξεως η οποία εμφανίζεται λίγες μέρες μέσα σε ένα χρόνο. Παρέχουν ψύξη για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών εκ των οποίων πολλές απαιτούν μεγάλα ψυκτικά φορτία σε μικρό χρονικό διάστημα. Η εφαρμογή PCM σε τέτοια συστήματα δύναται να μειώσει το μέγιστο φορτίο, δηλαδή το φορτίο για το οποίο διαστασιολογείται η εγκατάσταση μέχρι και 70%, επομένως μειώνεται το συνολικό κόστος της εγκατάστασης.[45],[46].

Τέλος, αναφέρεται πως υπάρχουν πολλές ακόμα εφαρμογές των PCM όπως η εφαρμογή τους σε θερμοκήπια, σε χώρους ξήρανσης φυτών, σε ηλιακούς θερμοσίφωνες, κουζίνες και αρκετά ακόμα, καθώς γνωρίζουν ιδιαίτερη ανάπτυξη εξαιτίας των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν στην εφαρμογή τους σε συνδυασμό με συμβατικά συστήματα.

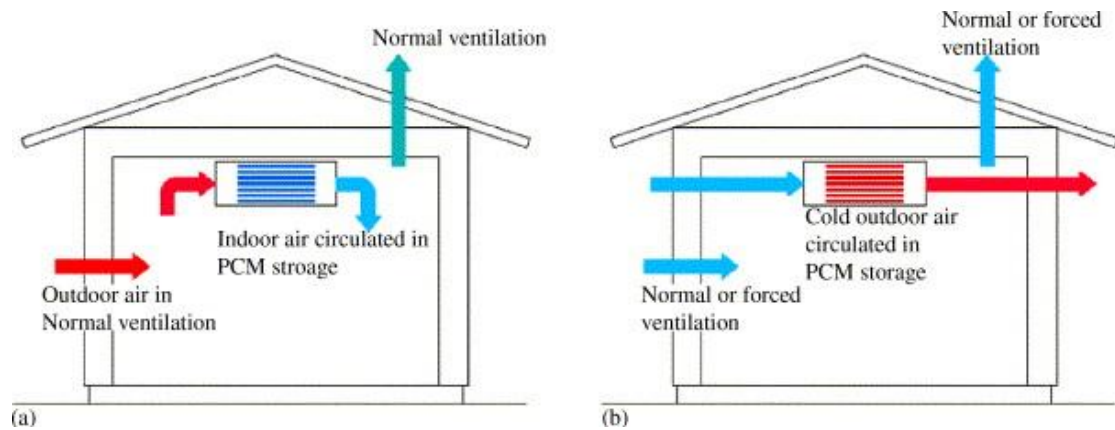
2.6.12 ΣΥΣΤΗΜΑ ΝΥΧΤΕΡΙΝΟΥ ΔΡΟΣΙΣΜΟΥ ΜΕ PCMs

Τα υλικά αλλαγής φάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτενώς σε συστήματα δροσίσιμου κτιρίων, στα οποία γίνεται χρήση της νυχτερινής συσσώρευσης ψύχους σε αυτά. Ο τρόπος αυτός δροσίσιμου των κτιρίων είναι γνωστός και ως "αρχή της ελεύθερης ψύξης" (free cooling principle). Πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί γύρω από την εφαρμογή της μεθόδου σε ταβάνια, πατώματα αλλά και παθητικά συστήματα δροσίσιμου.

PCMs έχουν αναπτυχθεί για να αποθηκεύουν ψύξη για εφαρμογές κλιματισμού. Η αποθήκευση ψυχρής θερμικής ενέργειας αποτελεί έναν καινοτόμο τρόπο αποθήκευσης της νυχτερινής ψυχρής ενέργειας σε ώρες μη αιχμής για χρήση κατά τη διάρκεια των ημερίσιων ωρών αιχμής. Σε πολλές περιπτώσεις, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού κορυφώνεται. Τα συστήματα κλιματισμού είναι ο κύριος λόγος, και σε αρκετές περιοχές φτάνει μέχρι και το μισό της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των θερμών μεσημεριανών ωρών, οπότε και η ενέργεια είναι πιο ακριβή. Αντίθετα, τη νύχτα η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι πολύ φθηνότερη χάρη στην ύπαρξη εφεδρείας ηλεκτρικής ενέργειας. Η ψύξη που συλλέγεται, αποθηκεύεται στο PCM κατά τη διάρκεια της νύχτας και χρησιμοποιείται για να ψύξει το εσωτερικό του κτιρίου κατά τη διάρκεια των πιο θερμών ωρών της ημέρας. Αυτή ακριβώς η ιδέα είναι γνωστή ως *ελεύθερη ψύξη*. Με σκοπό το δροσίσιμο ενός δοσμένου χώρου με κρύο νυχτερινό αέρα, το PCM ενσωματώνεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας το PCM ψύχεται, κρυσταλλώνεται και η ενέργεια εκλύεται. Την ημέρα ο αέρας κυκλοφορεί στη μονάδα, ενέργεια απορροφάται και ο εσωτερικός αέρας ψύχεται. Το αποτέλεσμα από τη μελέτη της μετάδοσης θερμότητας σε ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με PCM είναι πως η αποθήκευση θερμότητας κατά την τήξη δεν παρουσιάζει πρόβλημα κατά τη διάρκεια εφαρμογών θερμικής αποθήκευσης και πως η εξαγωγή θερμότητας κατά τη στερεοποίηση μπορεί να ενισχυθεί αποτελεσματικά με χρήση πτερυγίων.

Σε έρευνα που διεξήχθη σε σύστημα κλιματισμού κτιρίου γραφείων αποδείχθηκε πως κατά τη διάρκεια δυο ωρών αιχμής η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου αυξήθηκε κατά 5°C με χρήση συμβατικής μονάδας ψύξης ενώ αντίθετα με χρήση συστήματος με PCM αυξήθηκε μόνο γύρω στους 2°C. Ένα άλλο καινοτόμο σύστημα ενεργειακής απόδοσης σε κτίρια-νυχτερινός δροσίσιμος με σύστημα αποθήκευσης σε στρώμα συσκευασμένου PCM (NVP)-εξετάσθηκε εκτενώς και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα NVP μπορεί να βελτιώσει το επίπεδο θερμικής άνεσης του εσωτερικού περιβάλλοντος χάρη στο σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας που περιλαμβάνει.

Επιπρόσθετα, μια μελέτη σε χρήση PCM σε σύστημα HVAC (heat, ventilation and air-conditioning system → σύστημα θέρμανσης, εξαερισμού και ψύξης σε μεσαία ή μεγάλα βιομηχανικά κτίρια και γραφεία, είναι γνωστό και ως *σύστημα κλιματικού ελέγχου*) απέδειξε πως σε συνδυασμό με χρήση μακρών πτερυγίων, η ροή θερμότητας ήταν πολύ αποδοτικότερη.



Σχήμα 2.21 Αρχή λειτουργίας του συστήματος νυχτερινού δροσισμού με PCM: (a)περίπτωση ημέρας όπου το PCM τήκεται και (b)περίπτωση νύχτας όπου το PCM στερεοποιείται.

Η χρήση PCM για ελεύθερη ψύξη είναι μια εναλλακτική μέθοδος δροσισμού και εξαερισμού κτιρίων που συνδυάζει υψηλή θερμική μάζα και νυχτερινό δροσισμό. Η θερμική αδράνεια του κτιρίου είναι ενεργά ρυθμισμένη με την ενσωμάτωση του PCM στο επί οροφής σύστημα του κτιρίου. Ο ψυχρός νυχτερινός αέρας χρησιμοποιείται για να ψύξει το εσωτερικό του κτιρίου και το PCM. Ο εξωτερικός νυχτερινός αέρας μπορεί να εισέλθει στο χώρο τοπικά από παράθυρο, από ανεμιστήρες τοίχου ή από κεντρικό σύστημα παροχής αέρα. Την ημέρα ζεστός εσωτερικός αέρας κυκλοφορεί στη μονάδα.

Στόχος της χρήσης PCM προϊόντων είναι να μειώσουν την ενέργεια που χρειάζεται για την ψύξη του κτιρίου, όπου υπάρχει μεγάλη παραγωγή θερμότητας. Η κύρια αρχή δροσισμού με PCMs είναι η απορρόφηση ή η έκλυση μεγάλης ποσότητας ψύξης κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης τους με μια εξαιρετικά μικρή θερμοκρασιακή διαφορά και σε σχετικά σταθερή θερμοκρασία. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται κατά τη διαδικασία τήξεως και τη στερεοποίησης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποθήκευσης ψύξης το PCM στερεοποιείται και κατά τη διάρκεια απόδοσης ψύξης το PCM τήκεται. Για συστήματα ελεύθερης ψύξης πρέπει να επιλέγονται PCMs τέτοια ώστε η θερμοκρασία του ψυχόμενου αέρα να βρίσκεται μέσα στο θερμοκρασιακό εύρος της ανθρώπινης θερμικής άνεσης. Το καλοκαίρι το εύρος θερμικής άνεσης κυμαίνεται μεταξύ 23 και 27°C. Με σκοπό την επίτευξη ικανοποιητικής μεταφοράς θερμότητας, η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας τήξεως του PCM πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 3-5°C. Η θερμοκρασία τήξεως πρέπει να βρίσκεται κοντά στο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συστήματος. Αυτό σημαίνει πως για ένα καλοκαιρινό σύστημα δροσισμού, η θερμοκρασία τήξεως του PCM θα πρέπει να είναι 19-24°C.

Η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως σε κτίρια στα οποία υπάρχει μεγάλη παραγωγή θερμότητας κατά τη διάρκεια της μέρας και δεν χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όπως σχολεία, γραφεία, εμπορικά καταστήματα και βιομηχανικά κτίρια. Ο ψυχρός νυχτερινός αέρας είναι περίπου 10°C ψυχρότερος από τον πρωινό αέρα.

Συστήματα όπου το PCM τοποθετείται σε κάψουλες σε πίνακες τοίχου έχουν ερευνηθεί. Η μονάδα αποθήκευσης με PCM ενεργεί παθητικά στο χώρο. PCM σε συνδυασμό με εξαναγκασμένο νυχτερινό αερισμό έχει επίσης ερευνηθεί. Σε αυτά τα συστήματα, η μεταφορά θερμότητας από το PCM στον αέρα περιβάλλοντος

πραγματοποιείται με φυσική μεταφορά. Το πλεονέκτημα με αυτά τα συστήματα είναι ότι καμία εξωτερική πηγή ισχύος, όπως ανεμιστήρες που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια, απαιτείται για την ανταλλαγή ενέργειας στο PCM. Η τοποθέτηση του συστήματος δροσισμού στο ταβάνι προτιμάται έναντι των τοίχων ή του πατώματος διότι αποφεύγεται το φαινόμενο ύπαρξης αντικειμένων όπως έπιπλα κτλ. που θα μείωναν τη μεταφορά θερμότητας. Ομοίως, αν το PCM τοποθετηθεί σε κάψουλες, ξεχωριστά και αποθηκευθεί σε πλάκες αυτοί θα μειώσουν τη μεταφορά θερμότητας. Για το λόγο αυτό προτιμάται η τοποθέτηση του PCM σε ψευδοροφή που καλύπτεται από μέταλλο.

Μια άλλη προσέγγιση του συστήματος νυχτερινού δροσισμού με PCM είναι να τοποθετηθεί το υλικό αλλαγής φάσης σε μονάδα αποθήκευσης και η ενέργεια να ανταλλάσσεται ενεργά με τη χρήση ανεμιστήρων. Με τον εξαναγκασμό του θερμού/ψυχρού αέρα στη μονάδα επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος λειτουργίας. Ο N.Banard (2002) μελέτησε μια τέτοια εφαρμογή σε ένα σύστημα Cool Deck (ψυχρή γέφυρα) όπως ονομάστηκε. Στο σύστημα αυτό, ο ψυχρός νυχτερινός αέρας προωθείται σε μια κατασκευή σκυροδέματος στο οποίο έχει ενσωματωθεί PCM. Κατ'αντιστοιχία μελετήθηκε και το ThermoDeck στο οποίο ο ψυχρός νυχτερινός αέρας κυκλοφορεί μέσα σε κοίλη γέφυρα από σκυρόδεμα. Ένα μειονέκτημα της χρήσης των ανεμιστήρων στην ανταλλαγή ενέργειας είναι ότι η δύναμή τους μπορεί να υπερβεί την ψυκτική δύναμη του εναλλάκτη. Η κύμανση της δύναμης του εναλλάκτη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία τήξεως του PCM.

Συνήθως, PCM χρησιμοποιούνται σε συστήματα νυχτερινού δροσισμού ενσωματωμένα σε εναλλάκτες θερμότητας. Το αποτέλεσμα στον εσωτερικό αέρα είναι η γραμμική του εξάρτηση από τη ροή αέρα διαμέσου της μονάδας PCM και η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του εσωτερικού αέρα και του PCM, σε ιδανική περίπτωση και ιδανικό PCM.[47],[48].

3.ΜΟΝΩΣΗ ΣΤΗΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ.

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

PCM.

3.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΜΟΝΩΣΕΩΣ ΣΤΑ ΚΤΙΡΙΑ

Οι θερμικές απώλειες προκαλούνται σε ένα κτίριο από τη μετάδοση της θερμότητας του αέρα ενός εσωτερικού χώρου προς την ατμόσφαιρα ή προς ψυχρότερους γειτονικούς χώρους ή/και αντίστροφα. Είναι γνωστό ότι ανάμεσα σε δύο σώματα με διαφορετικές θερμοκρασίες, προκαλείται μία συνεχής ροή θερμότητας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο, κάτι που συμβαίνει το χειμώνα από το εσωτερικό του κτιρίου προς τον εξωτερικό κρύο αέρα, αλλά και το καλοκαίρι, από τον εξωτερικό θερμό αέρα προς το δροσερότερο εσωτερικό του κτιρίου. Αυτή η ροή θερμότητας είναι αδύνατο να εμποδιστεί τελείως και μπορεί μόνο να περιοριστεί ως προς την ένταση και τη διάρκειά της. Αυτό γίνεται εφικτό με την θερμομόνωση του κτιρίου κτιρίου, η οποία επιβραδύνει την ταχύτητα ανταλλαγής θερμότητας μέσα από τις επιφάνειες (τοίχους, στέγες, πατώματα, κουφώματα) που χωρίζουν περιοχές ή χώρους διαφορετικής θερμοκρασίας.

Μία από τις βασικότερες παραμέτρους του σύγχρονου αρχιτεκτονικού σχεδιασμού είναι και η θερμομόνωση. Με την πρόβλεψη για θερμομόνωση στις κτιριακές κατασκευές λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα ώστε να παρεμποδίζεται η διαφυγή της θερμικής ενέργειας από ένα χώρο προς την ατμόσφαιρα ή προς ένα άλλο - ψυχρότερο γειτονικό χώρο ή αντίστροφα - και συγχρόνως δημιουργείται αίσθημα θερμικής άνεσης για τους χρήστες του κτιρίου καθ' όλην τη διάρκεια του έτους. Σε παλαιότερες εποχές, η ανάγκη για μια τέτοια πρόβλεψη δεν ήταν επιβεβλημένη, αφού οι βαριές κατασκευές του περιβλήματος (τοίχοι, στέγη), η διάταξη των χώρων καθώς και η σύνθεση των χαμηλών όγκων των παραδοσιακών κτισμάτων, ήταν καθοριστικοί παράγοντες ρύθμισης της θερμομονωτικής ικανότητας, αλλά και της ροής θερμότητας. Στην σύγχρονη εποχή όπου οι κτιριακές κατασκευές είναι περισσότερο σύνθετες και ελαφρότερες από τα παραδοσιακά πέτρινα κτίρια του παρελθόντος, την προστασία από τις θερμικές μεταβολές ανέλαβαν τα διάφορα τεχνητά συστήματα ελέγχου, όπως η κεντρική θέρμανση και ο κλιματισμός. Η κατανάλωση ενέργειας για την λειτουργία τους δεν αποτελούσε πρόβλημα, μέχρι την Ενεργειακή Κρίση. Οι ενεργειακές πηγές – ουσιαστικά το πετρέλαιο – έπαψαν να είναι φτηνές και όλοι συνειδητοποιούμε πλέον τη μεγάλη σημασία της θερμομόνωσης στην εξοικονόμηση ενέργειας. Όλα τα κτίρια που κατασκευάστηκαν στην Ελλάδα μετά το 1980 είναι μονωμένα βάσει του Κανονισμού Θερμομόνωσης, όμως σχεδόν όλα τα κτίρια που έχουν κατασκευαστεί πριν το 1980 (σχεδόν το 82% των κτιρίων στην Ελλάδα) δεν έχουν μόνωση. Η αναλογία κατανάλωσης ενέργειας (και του κόστους της φυσικά) για τις ανάγκες θέρμανσης-ψύξης μεταξύ κτιρίων με και χωρίς μόνωση είναι 1 προς 3.

Η εξοικονόμηση ενέργειας από κάθε επέμβαση στο κέλυφος του κτιρίου, εξαρτάται από τη χρήση του κτιρίου, τα αρχιτεκτονικά του χαρακτηριστικά και το κλίμα της περιοχής. Στις περισσότερες χώρες με ψυχρότερα κλίματα ισχύουν εδώ και πολλά χρόνια κανονισμοί και τεχνικές προδιαγραφές, που καθορίζουν τις απαιτήσεις, τις ιδιότητες και τον τρόπο σύνθεσης των υλικών. Οι κανονισμοί αυτοί, μαζί με τις τεχνικές προδιαγραφές εξασφαλίζουν μία τεχνοοικονομικά σωστή θερμομόνωση.

Ως τέτοια, θεωρείται εκείνη που για να γίνει δεν απαιτείται υπερβολικά μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης και η οποία, ωστόσο, εξασφαλίζει μακροχρόνια οικονομία στη χρήση του κτιρίου και περιορισμό στην εφαρμογή ενεργοβόρων τεχνητών συστημάτων ελέγχου του εσωτερικού περιβάλλοντος.

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

- ✓ Την υγιεινή, άνετη κι ευχάριστη διαβίωση, χωρίς να διαταράσσεται το θερμικό ισοζύγιο του ανθρώπινου σώματος και να προκαλούνται σοβαρές θερμικές αλληλοεπιδράσεις κρύου ή ζέστης ανάμεσα σ' αυτό και στο χώρο που το περιβάλλει. Το θερμικό ισοζύγιο είναι αυτό που κυρίως καθορίζει το αίσθημα άνεσης του ανθρώπινου οργανισμού.
- ✓ Την οικονομία στην κατανάλωση ενέργειας, με τον περιορισμό των θερμικών απωλειών από το κέλυφος του κτιρίου.
- ✓ Τον περιορισμό του αρχικού κόστους κατασκευής της εγκατάστασης του συστήματος κεντρικής θέρμανσης ή κλιματισμού.
- ✓ Την ταυτόχρονη προστασία από τους θορύβους, αφού τα περισσότερα από τα θερμομονωτικά υλικά είναι και ηχομονωτικά.
- ✓ Τη βελτίωση της προστασίας του περιβάλλοντος γενικότερα, αφού μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας ελαττώνεται αντίστοιχα και η ποσότητα των εκλυόμενων καυσαερίων προς την ατμόσφαιρα. [49],[50],[51]

3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΕΩΣ ΚΤΙΡΙΟΥ

Πριν καταφύγει κανείς σε οποιοσδήποτε βοηθητικές οικοδομικές κατασκευές για τον έλεγχο των θερμικών απωλειών πρέπει, κατά το σχεδιασμό, να έχει υπόψη τους βασικότερους παράγοντες που τις προκαλούν. Τέτοιοι παράγοντες είναι:

- ✓ Η τοποθεσία και ο προσανατολισμός του κτιρίου μέσα στον περιβάλλοντα χώρο. Έτσι όσο περισσότερο εκτεθειμένο είναι ένα κτίριο στους ανέμους τόσο μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας εμφανίζει. Επίσης, όσο περισσότερο προσβάλλεται από την ηλιακή ακτινοβολία τόσο οι απώλειες ψύξης των εσωτερικών χώρων του είναι μεγαλύτερες.
- ✓ Το μέγεθος των επιφανειών του εξωτερικού περιβλήματος του κτιρίου που είναι άμεσα εκτεθειμένες στις καιρικές συνθήκες, σε συνάρτηση με τον όγκο του κτιρίου. Ένα ελεύθερο στο χώρο κτίριο εμφανίζει πολύ μεγαλύτερες απώλειες από ένα άλλο που είναι ενταγμένο σε ένα συνεχές σύστημα δόμησης.
- ✓ Το πόσο εκτεθειμένοι στο ύπαιθρο είναι οι διάφοροι χώροι του κτιρίου. Χώροι τελείως εσωτερικοί θεωρείται ότι δεν παρουσιάζουν θερμική μεταβολή. Αντίθετα, χώροι που εκτείνονται σε δύο ή περισσότερους ορόφους, όπως για παράδειγμα τα κλιμακοστάσια, παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες.
- ✓ Τα εξωτερικά κουφώματα, τα οποία, ανάλογα με το μέγεθος, τον αριθμό και τη θέση τους στις όψεις ενός κτιρίου, επηρεάζουν τη ροή της θερμότητας και η κακή συναρμογή τους επιτρέπει τη διείσδυση ρευμάτων αέρα.

Ο ρυθμός ροής θερμότητας διαμέσου του κελύφους ενός κτιρίου εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από το σύνολο των κατασκευαστικών μέτρων που λαμβάνονται και κυρίως από τα υλικά που χρησιμοποιούνται.

Η μελέτη και η σωστή εφαρμογή της θερμομόνωσης βασίζεται στο βέλτιστο συνδυασμό των μεθόδων και υλικών κατασκευής, τα οποία προσδίδουν συγκεκριμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες στα δομικά στοιχεία του κτιρίου.

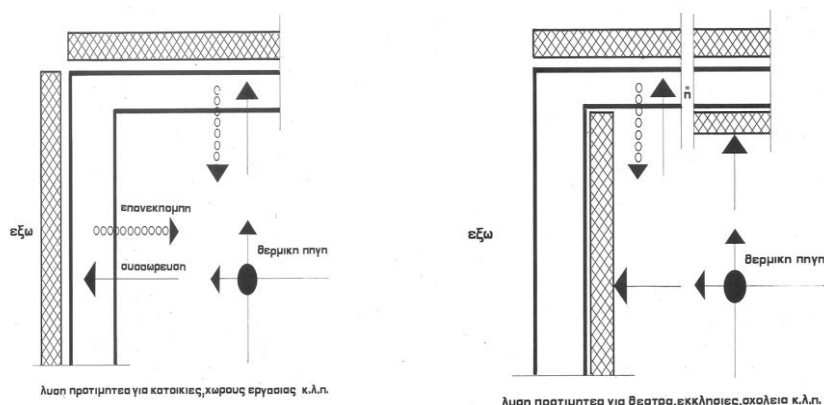
Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των δομικών στοιχείων καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη θερμική συμπεριφορά του κελύφους του κτιρίου και είναι:

- η *θερμομονωτική ικανότητα*, δηλαδή η αντίσταση θερμοδιαφυγής που εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα (συντελεστής k), την περιεκτικότητά τους σε υγρασία και το πάχος τους,
- ο *βαθμός διαπερατότητας* του αέρα διαμέσου των δομικών στοιχείων, που εξαρτάται από το είδος της κατασκευής που διαμορφώνει το περίβλημα ενός χώρου, την επιφάνεια των ανοιγμάτων και τον τρόπο συναρμογής των κουφωμάτων,
- η *θερμοχωρητικότητα* (c) των δομικών στοιχείων του κτιρίου, που συμβάλλει στον περιορισμό του ρυθμού μεταβολής της θερμοπερατότητας των στοιχείων.

Όταν οι τοίχοι και οι οροφές έχουν μεγάλη θερμοχωρητική ικανότητα, τότε η θερμότητα που συγκεντρώνουν, ενόσω λειτουργεί η θέρμανση, αποβάλλεται όταν αυτή σταματήσει, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η γρήγορη ψύξη των χώρων. Το αντίθετο συμβαίνει το καλοκαίρι, όταν οι χώροι ψύχονται.

Ανάλογα με τη θέση της μόνωσης - στην εξωτερική ή εσωτερική επιφάνεια - οι τοίχοι και οι οροφές ενεργούν:

- **Ως συσσωρευτές θερμότητας**, όταν η θερμική μόνωση τοποθετείται στην εξωτερική τους επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή, συσσωρεύουν επί ένα μεγάλο χρονικό διάστημα τη θερμότητα, για να την αποβάλουν και πάλι μέσα στο χώρο με ακτινοβολία. Με τη διαδικασία αυτή αυξάνεται αντίστοιχα η διάρκεια μεταβολής της θερμοκρασίας σε χώρους, στους οποίους είναι απαραίτητο να δημιουργείται αίσθημα άνεσης (κατοικίες, χώροι εργασίας, κ.λπ.).
- **Ως φράγμα προστασίας**, όταν η θερμική μόνωση τοποθετείται στην εσωτερική τους επιφάνεια, στις περιπτώσεις που δεν μας ενδιαφέρει η διάρκεια αποθέρμανσης ή απόψυξης των χώρων (θέατρα, εκκλησίες κ.λπ.), αλλά αντίθετα επιθυμούμε τη γρήγορη θέρμανση ή ψύξη των χώρων αυτών.



Σχήμα 3.1 Θερμοχωρητικότητα δομικών στοιχείων ανάλογα με τη θέση της θερμικής μόνωσης (εσωτερικά ή εξωτερικά)

- Τέλος, οι τιμές των συντελεστών *θερμικής αγωγιμότητας* και *αντίστασης θερμοδιαφυγής* των διαφόρων υλικών που συγκροτούν μια κατασκευή.

Η κατασκευή της θερμομόνωσης ενός κτιρίου πρέπει να εκτελείται σύμφωνα με ορισμένες προϋποθέσεις που καθορίζονται από τη μελέτη θερμομόνωσης, τη θέση της επιφάνειας που πρόκειται να προστατευθεί, τη θέση της μονωτικής στρώσης μέσα στην κατασκευή (εσωτερικά ή εξωτερικά). Είναι ευνόητο ότι δεν μπορούν να αγνοηθούν και οι προϋποθέσεις που επιβάλλουν οι απαιτήσεις προστασίας από την υγρασία. Για το λόγο αυτό, το πρόβλημα της θερμομόνωσης –όπως ήδη τονίστηκε– δεν μπορεί να εξετάζεται μεμονωμένα, αλλά σε συνδυασμό με άλλες απαιτήσεις προστασίας. Από τα πλέον ευάλωτα στοιχεία ενός κτιρίου, που έχουν ανάγκη θερμικής προστασίας, είναι η οροφή και τα πλαϊνά εξωτερικά τοιχώματα.

Η **οροφή (επίπεδη ή κεκλιμένη) και η στέγη** παρουσιάζουν μεγάλες θερμικές απώλειες, μια και είναι τα μέρη εκείνα του κτιρίου που δέχονται άμεσα όλες τις επιδράσεις των καιρικών συνθηκών.

Τα **εξωτερικά τοιχώματα** υπόκεινται σε μια σειρά επιδράσεων και τα οποία ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, προκαλούν μεγάλες θερμικές απώλειες.[49]

3.2.1 ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η προστασία των εξωτερικών τοιχωμάτων μπορεί να γίνει *εσωτερικά ή εξωτερικά*, ανάλογα με τη χρήση των χώρων που προστατεύουν και το βασικό μέρος της δομής τους. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις τοιχωμάτων, στις οποίες η θερμική μόνωση τοποθετείται ανάμεσα σε δυο κατακόρυφα στρώματα ομοιογενών ή ανομοιογενών υλικών και είναι σχετικά απλή λύση η οποία όμως, όπως και οι προηγούμενες, έχει και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επομένως, οι βασικοί τρόποι θερμομόνωσης της εξωτερικής τοιχοποιίας, δοκών και υποστυλωμάτων είναι οι ακόλουθοι:

- Θερμομόνωση στην εσωτερική επιφάνεια
- Θερμομόνωση στην εξωτερική επιφάνεια
- Θερμομόνωση στον πυρήνα
- Χρήση θερμομονωτικών τούβλων

Η εσωτερική θερμομόνωση τοποθετείται σε κτίρια στα οποία μας ενδιαφέρει η άμεση απόδοση του συστήματος κλιματισμού χωρίς χρονική υστέρηση, και δεν μας ενδιαφέρει η απόδοση θερμότητας από τα δομικά στοιχεία μετά τη διακοπή του κλιματισμού, δηλαδή παραθεριστικές κατοικίες, σχολεία, κτίρια γραφείων ημερήσιας λειτουργίας, κ.λπ. Η εσωτερική θερμομόνωση καλύπτεται με συνδυασμό πλέγματος και επιχρίσματος, με γυψοσανίδα κ.λπ.

Στα πλεονεκτήματά της συγκαταλέγεται το γεγονός ότι είναι μια απλή και γρήγορη κατασκευή, οικονομικότερη σε σχέση με την εξωτερική θερμομόνωση, συμβάλει στην άμεση απόδοση του συστήματος θέρμανσης / ψύξης και τα μονωτικά υλικά δεν χρειάζονται προστασία από εξωτερικές επιδράσεις (άνεμοι, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία κ.λπ.)

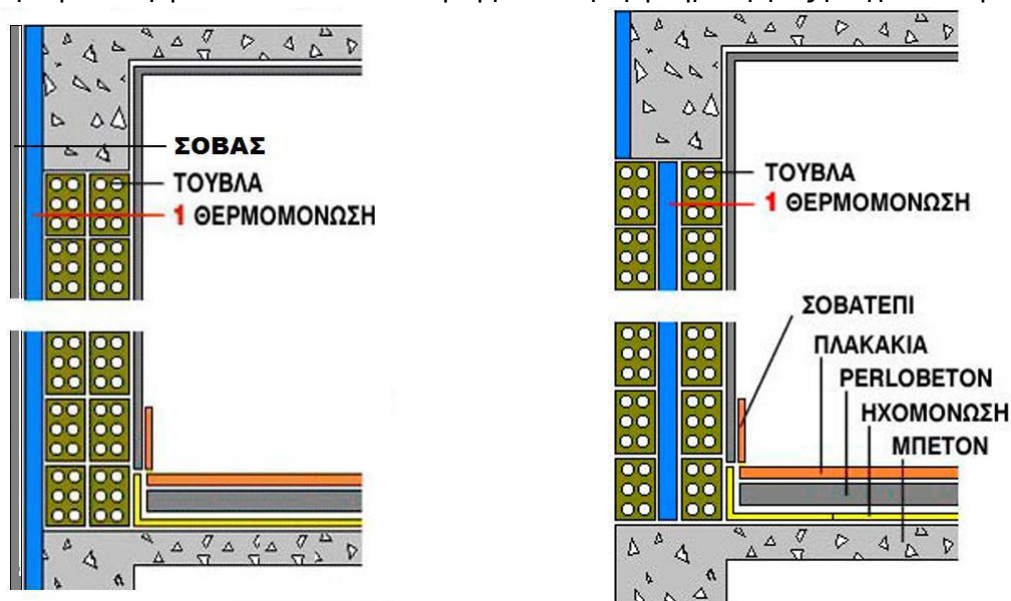
Ως μειονεκτήματα παρατηρούνται η γρήγορη ψύξη του χώρου μετά τη διακοπή της θέρμανσης, η αδυναμία προστασίας δομικών στοιχείων από συστολές – διαστολές λόγω εξωτερικών θερμοκρασιακών μεταβολών, η πιθανότητα δημιουργίας επιφανειακής υγρασίας από συμπύκνωση υδρατμών που για να αποφευχθεί απαιτείται η τοποθέτηση φράγματος υδρατμών (φύλλα αλουμινίου, ασφαλτόπανο, νάιλον κ.λπ.) μπροστά από το μονωτικό υλικό και προς την κλιματιζόμενη πλευρά του χώρου, η δυσκολία (όχι ωστόσο αξεπέραστη) στο να κρεμαστούν ράφια, πίνακες κ.λπ. μεγάλου βάρους και τοποθέτηση ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων. Τέλος, στην περίπτωση που εφαρμοστεί σε υφιστάμενα κτίρια, εμποδίζει την ομαλή λειτουργία του εσωτερικού χώρου κατά την κατασκευή και μειώνει το ωφέλιμο εμβαδόν του.

Η εξωτερική θερμομόνωση τοποθετείται σε κτίρια στα οποία δεν μας ενδιαφέρει η άμεση απόδοση του συστήματος κλιματισμού, ενώ μας ενδιαφέρει η απόδοση θερμότητας από τα δομικά στοιχεία και μετά τη διακοπή του κλιματισμού, δηλαδή σε κατοικίες μόνιμης διαμονής, νοσοκομεία κ.λπ. Η χρήση της σε υφιστάμενα μη θερμομονωμένα κτίρια, πρέπει να γίνεται με προσοχή, λόγω δυσκολίας κατασκευής, υψηλού κόστους και αύξησης περιμέτρου του κτιρίου που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα συντελεστή δόμησης.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της κατασκευής είναι η διατήρηση της θερμότητας στο χώρο και μετά τη διακοπή της θέρμανσης λόγω της θερμοχωρητικότητας των δομικών στοιχείων, η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας λόγω μικρότερης χρονικά χρήσης του συστήματος κλιματισμού εξαιτίας της αποθήκευσης ενέργειας στα νότια κυρίως δομικά στοιχεία από τον ήλιο εφόσον εξασφαλίζεται η απαιτούμενη θερμοχωρητικότητα με την κατασκευή τοιχοποιίας, δοκών και υποστυλωμάτων

επαρκούς πάχους, η προστασία εξωτερικών επιφανειών τοίχων από συστολές και διαστολές λόγω εξωτερικών θερμοκρασιακών μεταβολών. Τέλος, σε περίπτωση που εφαρμοστεί σε υφιστάμενα κτίρια, αφενός μεν δεν εμποδίζει τη λειτουργία του εσωτερικού χώρου κατά την κατασκευή και αφετέρου δεν μειώνει το ωφέλιμο εμβαδόν του.

Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η δυσκολία/αδυναμία εφαρμογής σε κτίρια με έντονες εξωτερικές μορφολογικές όψεις, η απαίτηση προστασίας από καιρικές συνθήκες, το αυξημένο κόστος κατασκευής, η απαίτηση προσεκτικής κατασκευής (ορθή επιλογή υλικών και τοποθέτηση με αποφυγή δημιουργίας ρωγμών στην όψη).



Σχήμα 3.2 Εξωτερική θερμομόνωση και θερμομόνωση πυρήνα

Θερμομόνωση πυρήνα εξωτερικής τοιχοποιίας: Η εξωτερική τοιχοποιία με διάκενο, συνήθως αποτελείται από δύο επιμέρους τοίχους που ενώνονται μεταξύ τους. Ο εξωτερικός τοίχος είναι, συνήθως, από τούβλο, όπως και ο εσωτερικός. Για συμμόρφωση με τις ελάχιστες απαιτήσεις θερμομόνωσης που ισχύουν, θα πρέπει να τοποθετηθεί θερμική μόνωση στο διάκενο. Ο εσωτερικός επιμέρους τοίχος από τούβλο θα απορροφήσει και θα συγκρατήσει τη θερμική ενέργεια, ενώ το κτίριο θερμαίνεται. Ο τοίχος θα επιστρέψει τη θέρμανση αυτή στα δωμάτια, όταν το κτίριο δεν θερμαίνεται, διατηρώντας έτσι μια πιο ομοιόμορφη εσωτερική θερμοκρασία. Ο τοίχος από τούβλα είναι πορώδης. Σε μακρές περιόδους βροχοπτώσεων, το νερό της βροχής θα διεισδύσει από τον εξωτερικό τοίχο και μπορεί να τρέξει στο εσωτερικό μέτωπο του τοίχου αυτού. Για να αποφευχθεί το πέρασμα της υγρασίας από τον εξωτερικό τοίχο στο θερμομονωτικό υλικό, θα πρέπει να υπάρχει ένα σαφές διάκενο μεταξύ του εξωτερικού τοίχου και των θερμομονωτικών πλακών. Ένα καθαρό κενό πάχους 5 cm είναι κατάλληλο για όλους τους βαθμούς έκθεσης. Για ορισμένες περιπτώσεις, ένα καθαρό κενό των 2,5 cm θα είναι αρκετό για να αποτρέψει την είσοδο της υγρασίας στο θερμομονωτικό υλικό. Η χρήση θερμομονωτικών υλικών εντός ενός διακένου που δεν αερίζεται, δεν προδικάζει τις ιδιότητες πυραντοχής του τοίχου. Οι πλάκες του θερμομονωτικού υλικού είναι απίθανο να αναφλεγούν, αν η φωτιά διεισδύσει σε ένα κενό που δεν αερίζεται. Η εξάπλωση της φλόγας θα είναι ελάχιστη, αφού δεν θα υπάρχει αρκετός αέρας για να διατηρήσει την καύση. Η θερμομόνωση πυρήνα πλεονεκτεί έναντι της εξωτερικής και εσωτερικής μονώσεως

ως προς το γεγονός ότι προσφέρει καλύτερη στήριξη της μόνωσης, παρά εκείνη που γίνεται απευθείας επάνω στο επίχρισμα.

Πάντως σε όλες τις περιπτώσεις τοποθέτησης της μόνωσης πλευρικών εξωτερικών τοιχωμάτων παίρνονται μέτρα για:

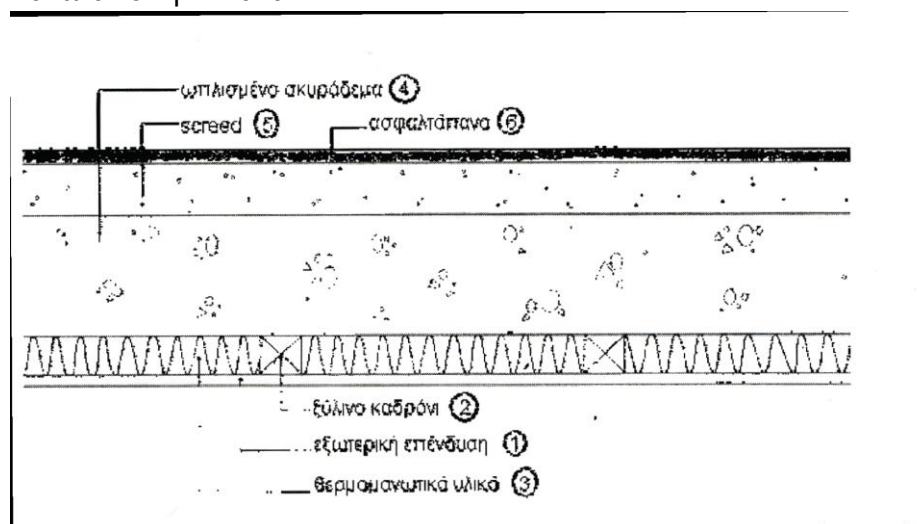
- Παροχή επαρκούς θερμικής αντίστασης ώστε να πληρούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις θερμομόνωσης, και συνεχούς θερμομονωτικού στρώματος χωρίς θερμογέφυρες.
- Προστασία του θερμομονωτικού υλικού από συμπύκνωση και δρόσο, με φράγμα υδρατμών.
- Παρεμπόδιση της διείσδυσης νερών βροχής, που θα έχει ως συνέπεια την πρόκληση ανεπανόρθωτης ζημιάς στο θερμομονωτικό υλικό, και
- Αποφυγή της δημιουργίας θερμογεφυρών που αυξάνουν τις θερμικές απώλειες και δημιουργούν θερμικές τάσεις στα επιμέρους υλικά που συνθέτουν την κατασκευή.

Επιπλέον πρέπει να αποφεύγεται η διάτρηση των εξωτερικών τοιχωμάτων για να περάσουν σωληνώσεις εγκαταστάσεων ή άλλου είδους κατασκευές. Όπου αυτό είναι απαραίτητο, τότε επιβάλλεται ιδιαίτερη μέριμνα για την προστασία των ευάλωτων αυτών στοιχείων, τόσο από τη θερμότητα όσο και από την υγρασία.[49]

3.2.2 ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΣΗ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΟΡΟΦΗΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το θερμομονωτικό υλικό μπορεί να τοποθετηθεί:

- Κάτω από την πλάκα (δηλαδή το στρώμα οπλισμένου σκυροδέματος)
- Πάνω από την πλάκα



Σχήμα 3.3 Θερμομόνωση επίπεδης οροφής κάτω από την πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος.

Η θερμομόνωση κάτω από την πλάκα τοποθετείται σε περιπτώσεις κτιρίων στα οποία μας ενδιαφέρει η άμεση απόδοση του συστήματος κλιματισμού (εξοχικές κατοικίες, γραφεία, καταστήματα κ.λπ.). Το μονωτικό υλικό καλύπτεται με συνδυασμό πλέγματος και επιχρίσματος ή με γυψοσανίδα ή με όποιου τύπου ψευδοροφή, εφόσον το επιτρέπει το ύψος του χώρου.

Στα πλεονεκτήματα περιλαμβάνονται η άμεση απόδοση συστήματος κλιματισμού και το γεγονός ότι τα μονωτικά υλικά δεν χρειάζονται προστασία από εξωτερικές επιδράσεις (άνεμοι, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία).

Μειονεκτήματα είναι η γρήγορη ψύξη του χώρου μετά τη διακοπή της θέρμανσης και η πιθανότητα δημιουργίας υγρασίας και μούχλας στις γωνιές λόγω συμπύκνωσης των υδρατμών.

Η θερμομόνωση πάνω από την πλάκα τοποθετείται σε κτίρια στα οποία δεν μας ενδιαφέρει η άμεση απόδοση του συστήματος κλιματισμού, ενώ μας ενδιαφέρει η απόδοση από τα δομικά στοιχεία και μετά τη διακοπή του κλιματισμού.

Το θερμομονωτικό υλικό, ανάλογα με τη συμπεριφορά του στην υγρασία, τοποθετείται κάτω από τη στεγάνωση (περίπτωση κλασσικής μόνωσης) ή πάνω από αυτήν (ανεστραμμένη μόνωση).

Στην πρώτη περίπτωση, όποιο στεγνωτικό και να χρησιμοποιηθεί απαιτείται φράγμα υδρατμών πάνω από την πλάκα.

Πλεονεκτήματα είναι η διατήρηση της θερμότητας στον χώρο και μετά τη διακοπή της θέρμανσης λόγω της θερμοχωρητικότητας της πλάκας, η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας λόγω μικρότερης χρονικά χρήσης του συστήματος κλιματισμού, εξαιτίας της αποθήκευσης ενέργειας στην πλάκα, η προστασία εξωτερικής επιφάνειας πλάκας από συστολές και διαστολές λόγω εξωτερικών θερμοκρασιακών μεταβολών. Τέλος, στην περίπτωση που εφαρμοστεί σε υφιστάμενα κτίρια, αφενός μεν δεν εμποδίζει τη λειτουργία του εσωτερικού χώρου κατά την κατασκευή και αφετέρου δεν μειώνει το ωφέλιμο ύψος του.

Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως απαιτείται μεγάλη προσοχή στην κατασκευή σε συνδυασμό με τη στεγάνωση.[49]

3.3 ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Η επιλογή των θερμομονωτικών υλικών θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη τις διάφορες καταπονήσεις (μηχανικές, υγροθερμικές και φυσικοχημικές) που υφίστανται τα υλικά στο συγκεκριμένο έργο, νοουμένου ότι οι συγκεκριμένες καταπονήσεις επηρεάζουν άμεσα τη θερμική απόδοσή τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση του βέλτιστου συνδυασμού των κριτηρίων επιλογής θερμομονωτικών υλικών τα οποία είναι:

α. Θερμοτεχνικά Χαρακτηριστικά

β. Τρόπος Εφαρμογής

- Προκατασκευασμένα προϊόντα ή κατασκευή επί τόπου.
- Απαιτούμενα προστατευτικά μέτρα
- Δυνατότητα ελέγχου κατά την κατασκευή.

γ. Μηχανικές Ιδιότητες

- Αντοχή σε θλίψη, κάμψη και δονήσεις.
- Αλλοιώσεις με το χρόνο (γήρανση).
- Πυκνότητα.
- Ελαστικότητα, ευθραυστότητα.

δ. Χημική συμπεριφορά-ανθεκτικότητα

- Αντίσταση στη διάβρωση, στους μικροοργανισμούς, έντομα, κ.λπ.
- Συμπεριφορά στην υγρασία
- Συμπεριφορά στη φωτιά και μέγιστες επιτρεπόμενες θερμοκρασίες λειτουργίας.
- Βαθμός ευαισθησίας σε υπεριώδη ακτινοβολία, σε διάφορα αέρια και σε διάφορους διαλύτες ή το θαλασσινό νερό, κ.λπ.

ε. Οικονομικά Στοιχεία

- Επιπρόσθετο κόστος προμήθειας και εγκατάστασης.
- Χρόνος απόσβεσης δαπάνης.
- Ποσοστό προστιθέμενης αξίας στην όλη κατασκευή.

Τα πλέον συνήθη χρησιμοποιούμενα υλικά μονώσεων είναι:

- Εξηλασμένη πολυστερίνη
- Διογκωμένη πολυστερίνη
- Υαλοβάμβακας
- Πολυουρεθάνη
- Αφρώδες Γυαλί
- Περλιτοειδή
- Πετροβάμβακας
- Φελλός
- PVC
- Κυψελωτό σκυρόδεμα
- Θερμομονωτικά τούβλα
- Πλάκες περλιτοϋαλου[49]

3.4 ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCMs) ΩΣ ΘΕΡΜΟΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Η εισαγωγή υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε κτιριακές κατασκευές θεωρείται ένας από τους δυνατούς και αποδοτικούς τρόπους μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης και τις εκπομπές CO₂ στον κτιριακό τομέα.

Η θεώρηση των συστημάτων ΑΠΕ ως δομικών στοιχείων του εξωτερικού κελύφους ενός κτιρίου, τα καθιστά σημαντικούς παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τόσο τη θερμική συμπεριφορά όσο και τη διάρκεια ζωής των στοιχείων του κτιρίου. Ειδική μελέτη αναφέρεται στη συμβολή των ΑΠΕ ως δομικό στοιχείο του κελύφους του κτιρίου. Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να αναδείξει τους παράγοντες αυτούς που συμβάλλουν στην επιτυχή ενσωμάτωσή τους στο εξωτερικό περίβλημα του κτιρίου, με απώτερο στόχο την εξοικονόμηση αλλά και την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

Η παθητική αρχιτεκτονική μπορεί να ερμηνευθεί ως η αρχιτεκτονική που μετριάζει το εξωτερικό περιβάλλον με σκοπό τη δημιουργία ενός σχετικά σταθερού εσωτερικού περιβάλλοντος στο κτίριο. Για το λόγο αυτό, ένα παθητικά σχεδιασμένο κτίριο που ενσωματώνει χαρακτηριστικά όπως εκτεθειμένα τοιχώματα, οροφή και πλάκες δαπέδου με δυνατότητες ενεργειακής αποθήκευσης, μπορεί να βοηθήσει στη σταθεροποίηση του εσωτερικού περιβάλλοντος και να μειώσει επομένως την ενεργειακή κατανάλωση. Η ενσωμάτωση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs) σε κτιριακές κατασκευές έχει μελετηθεί και παρουσιαστεί ως μια δυνατή μέθοδος μείωσης την ενέργειας σε παθητικά σχεδιασμένα κτίρια.

Τα χαρακτηριστικά των υλικών αλλαγής φάσης (PCMs), τα καθιστούν αυτόματα κατάλληλα για χρήση σε σκοπούς ενεργειακής προστασίας, χωρίς τους περιορισμούς που παρουσιάζουν άλλες συσκευές θερμικής αποθήκευσης όπως ξεχωριστός χώρος ή ευρύχωρα δωμάτια.

Αν και οι αρχές αποθήκευσης της λανθάνουσας θερμότητας μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε πορώδες δομικό υλικό, η μεγαλύτερη έρευνα για τα PCMs έχει κινηθεί γύρω από την ενσωμάτωσή τους με γυψοσανίδες και κομμάτια σκυροδέματος. Έρευνες έχουν δείξει πως ενσωμάτωση PCM στην τοιχοποιία μπορεί να μειώσει τη μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία δωματίου σε ένα παθητικά σχεδιασμένο κτίριο μέχρι και 4°C κατά τη διάρκεια της ημέρας και επίσης να μειώσει αισθητά το θερμικό φορτίο τη νύχτα. Αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης PCMs σε δομικά υλικά είναι η μείωση της μέγιστης/ελάχιστης θερμοκρασίας που επικρατούν στον περιβάλλοντα εσωτερικό χώρο, η μείωση διακύμανσης της θερμοκρασίας, καθώς και η χρονική μετατόπιση θερμικών φορτίων. Τα PCMs μπορούν να εφαρμοστούν ανεξάρτητα σε ειδικά πάνελς ή σε κάποιον από τους τρόπους συσκευασίας που έχουν προαναφερθεί, μπορούν ωστόσο να χρησιμοποιηθούν αναμειγμένα με άλλα δομικά μονωτικά υλικά, με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους.

Με σεβασμό στα κριτήρια θερμικής άνεσης, οι A.K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Hanu και D. Feldman ερευνήσαν την επιρροή του ενσωματωμένου σε σκυρόδεμα PCM. Αποδείχθηκε βελτίωση στη θερμοκρασία εσωτερικού αέρα. Οι K. Darkwa και P.W. O'Callaghan μελέτησαν την εφαρμογή PCM σε φύλλα και σε ανάμειξη με άλλα δομικά υλικά σε παθητικά σχεδιασμένα κτιριακά κελύφη.

Σήμερα εξετάζεται η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας σε πλακίδια μαρμάρου με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCMs), τα οποία έχουν τη δυνατότητα ετεροχρονισμού

της διαθέσιμης και απαιτούμενης θερμότητας για θέρμανση και ψύξη ενός δομικού στοιχείου.

Τα PCMs εμφανίζουν πολλά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την εφαρμογή τους στην τοιχοποιία ως *μονωτικά υλικά* και ως μέσα αποθήκευσης και διαχείρισης της θερμικής ενέργειας του κτιριακού κελύφους.

Η χρήση PCM στη θερμομόνωση είναι επιτρεπτή και αποδοτική εφόσον η θερμοκρασία τήξεώς του είναι μικρότερη από την ανώτατη αποδεκτή θερμοκρασία δωματίου και γενικά βρίσκεται σε αποδεκτά όρια. Η διαδικασία αλλαγής φάσης πρέπει να είναι πλήρως αναστρέψιμη και μόνο θερμοκρασιακά εξαρτώμενη. Το χρησιμοποιούμενο υλικό οφείλει να έχει μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και υψηλή θερμική αγωγιμότητα, να είναι χημικά σταθερό, μή τοξικό, μή διαβρωτικό και μή εύφλεκτο. Επίσης, πρέπει να είναι διαθέσιμο σε μεγάλη ποσότητα με μικρό κόστος. Οι ουσιαστικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται για την εφαρμογή του PCM είναι η μηχανική αντοχή και σταθερότητα, η ασφάλεια σε περίπτωση πυρκαγιάς, η υγιεινή και η προστασία στο περιβάλλον, η προστασία έναντι θορύβων και βέβαια πρωτίστως η ενεργειακή εξοικονόμηση και η διατήρηση θερμότητας. Εφόσον το υλικό έχει τα παραπάνω χαρακτηριστικά δύναται να εφαρμοστεί στην τοιχοποιία για θερμομονωτικούς σκοπούς.[49],[52].

Στην παρούσα εργασία,εξετάζεται η χρήση ενός PCM με μεταβλητή θερμοχωρητικότητα c [J/kgK] και σταθερά υπόλοιπα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά (ειδική θερμική αγωγιμότητα k [W/mK], πυκνότητα ρ [kg/m³]), στην τοιχοποιία ως μονωτικό υλικό ,συγκρίνεται με απλή μόνωση και εξετάζεται η συμπεριφορά του τόσο σε έναν τυπικό καλοκαιρινό μήνα όσο και σε έναν χειμερινό.

Η μελέτη γίνεται για εφαρμογή μονωτικού στρώματος στο εσωτερικό των τοιχωμάτων και της οροφής του κτιριακού κελύφους, ωστόσο παρουσιάζεται και η περίπτωση εφαρμογής του στο εξωτερικό και γίνεται σύγκριση εκ νέου με την απλή μόνωση.

Πρέπει εδώ να τονισθούν **οι παραδοχές** που γίνονται στο παρόν πρόβλημα που εξετάζεται και αυτές είναι:

- Όλες οι θερμοφυσικές ιδιότητες (πλην της θερμοχωρητικότητας c [J/kgK] του PCM) διατηρήθηκαν σταθερές.
- Η αγωγή θερμότητας από και προς το δάπεδο θεωρείται αμελητέα.
- Η θερμότητα δια ακτινοβολίας μεταξύ επιφανειών δεν ελήφθη υπόψιν.

Παρακάτω,παρουσιάζεται η μελέτη της εφαρμογής υλικών αλλαγής φάσης στη μόνωση κτιρίων.

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

4. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

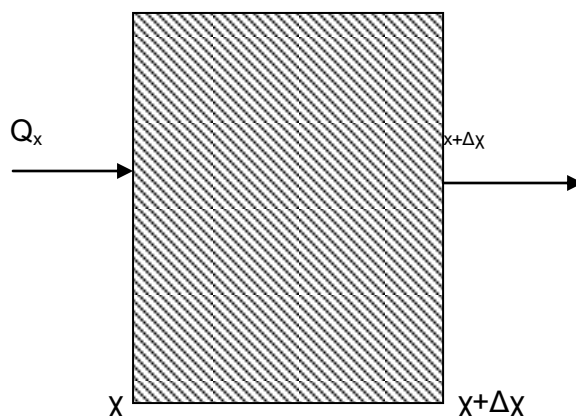
ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΟΣ- ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

4.1 Φαινόμενο αγωγής θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας με *αγωγή* βασίζεται στη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των ατόμων ή των μορίων ενός σώματος ανάλογα με την κατάστασή του. Στα μέταλλα η ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ των μικρών σωματιδίων με διάχυση ηλεκτρονίων ενώ στα αέρια σχεδόν αποκλειστικά με διάχυση μορίων. Στα υγρά παρατηρείται ο ίδιος μηχανισμός με τη διαφορά ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων είναι εντονότερες και συχνότερες απ'ότι στα αέρια.

Στα στερεά, η αγωγή θερμότητας αποδίδεται στη δραστηριότητα των μορίων τα οποία εκτελούν ταλαντώσεις και παράγουν κύματα, σύμφωνα με τη σύγχρονη αντίληψη περί μεταφοράς ενέργειας.

Με τη βοήθεια κατάλληλων σχέσεων περιγράφεται γενικά το φαινόμενο, υπολογίζεται η θερμότητα που μεταφέρεται με αγωγή στη μονάδα του χρόνου μέσα στο σώμα και προσδιορίζεται το πεδίο θερμοκρασιών που προκύπτει από τις οριακές συνθήκες, δηλαδή τις συνθήκες που επικρατούν στα όρια του σώματος. Ο νόμος του Fourier είναι μια εξίσωση ρυθμού η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό της ροής θερμότητας λόγω αγωγής αν γνωρίζουμε την κατανομή της θερμοκρασίας στο μέσο, δηλαδή τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο και τη θέση μέσα στο μέσο. Εξετάζεται στερεό ομογενές μέσο στο οποίο η θερμοκρασία T εξαρτάται από το χρόνο t και μεταβάλλεται κατά μήκος του x -άξονα. Η θερμοκρασιακή κατανομή εκφράζεται σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Στο σώμα εκλύεται θερμότητα $\Phi(x,t)$ από πηγές που εμπεριέχονται σε αυτό. Θεωρούμε μονοδιάστατο στοιχείο του σώματος, πάχους dx και επιφάνειας A κάθετης προς τον άξονα x . [53],[54].



Σχήμα 4.1 Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας

Το ρεύμα θερμότητας λόγω αγωγής που δημιουργείται από τη θερμοκρασιακή διαφορά στο στοιχείο είναι ίσο με:

$$q_x = -kA \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \quad (4.1)$$

Το ρεύμα που διαπερνά τη δεξιά επιφάνεια ελέγχου(σχ.4.1) είναι:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx} = -A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \quad (4.2)$$

Η σχέση 4.2 δηλώνει ότι το ρεύμα θερμότητας σε απόσταση $x+dx$ είναι ίσο με το ρεύμα θερμότητας στη θέση x προσαυξημένο κατά τη μεταβολή που υπέστη στη διαδρομή dx .

Η εκλυόμενη από πηγές θερμότητα είναι:

$$\Phi(x,t) = qA dx$$

Η εσωτερική ενέργεια του στοιχείου αυξάνεται λόγω της χρονικής μεταβολής της θερμοκρασίας κατά:

$$\text{Ενέργεια που προστίθεται στην εσωτερική} = A \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx$$

με: C_p ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση [J/kgK]

ρ πυκνότητα του υλικού σώματος [kg/m³]

t χρόνος [sec]

Ο τελευταίος όρος εκφράζει την ανά μονάδα χρόνου μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια του στοιχειώδους όγκου.

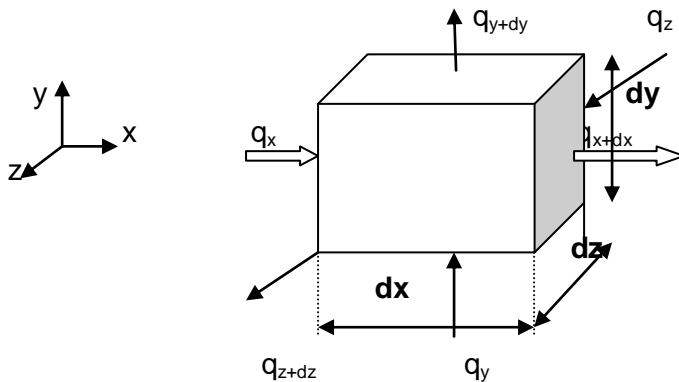
Για το στοιχειώδες σώμα διατυπώνεται ο ενεργειακός ισολογισμός, σύμφωνα με τον οποίο το ρεύμα θερμότητας λόγω αγωγής που διέρχεται από την επιφάνεια ελέγχου μαζί με την εκλυόμενη από τις πηγές θερμότητα ισούται με την ενέργεια που αποθηκεύεται στο σώμα και προκαλεί μεταβολή της θερμοκρασίας του με το χρόνο, δηλαδή την αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας. Είναι δηλαδή:

$$\left\{ -A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] - \left[-kA \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right] \right\} qA dx = \rho C_p A \frac{\partial T}{\partial t} dx \Leftrightarrow \quad (4.3)$$

$$\Leftrightarrow \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

Η εξίσωση 4.3 που αποτελεί την εξίσωση της μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας, είναι μια διαφορική εξίσωση της οποίας η λύση δίνει τη θερμοκρασιακή κατανομή στο σώμα.

Κατά τη μελέτη αγωγής της θερμότητας σε ένα σώμα εκείνο που ενδιαφέρει ιδιαίτερα είναι ο προσδιορισμός του θερμοκρασιακού πεδίου το οποίο προκύπτει από τις συνθήκες οι οποίες επικρατούν στα όρια του σώματος. Με τη βοήθεια της σχέσης Fourier όπως προείπαμε, υπολογίζεται το ρεύμα θερμότητας σε κάθε σημείο του σώματος όταν είναι γνωστή η κατανομή θερμοκρασίας και δύναται ακόμη να υπολογιστεί το οικονομικό πάχος της μόνωσης ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή λύση μειώνοντας εκ παραλλήλου τις απώλειες θερμότητας στο επιθυμητό επίπεδο. Στην τρισδιάστατη αγωγή θερμότητας, εξετάζεται αντίστοιχα με τη μονοδιάστατη στοιχειώδη όγκος σε μορφή κύβου με διαστάσεις dx, dy, dz .



Σχήμα 4.2 Τρισδιάστατη αγωγή θερμότητας σε στοιχειώδη όγκο

Ο ενεργειακός ισολογισμός στον κύβο είναι: η θερμότητα που εισέρχεται δια αγωγής στις τρεις επιφάνειες μαζί με τη θερμότητα που εκλύεται στον όγκο από τις περιεχόμενες σε αυτόν πηγές ισούται με τη θερμότητα που εγκαταλείπει τον στοιχειώδη όγκο από τις αντίστοιχες τρεις απέναντι επιφάνειες, προστιθέμενης σε εκείνη η οποία εναποθηκεύεται σε αυτόν και προκαλεί χρονική μεταβολή της θερμοκρασίας του. Με άλλα λόγια:

$$q_x + q_y + q_z + \Phi dx dy dz = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (4.4)$$

με:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}$$

Ομοίως για τις θερμότητες που εξέρχονται από τον όγκο είναι:

$$q_{x+dx} = -[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) dx] dy dz$$

$$q_{y+dy} = -[k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) dy] dx dz$$

$$q_{z+dz} = -[k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) dz] dx dy$$

Επομένως από τον ενεργειακό ισολογισμό στον όγκο αναφοράς προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \Phi dx dy dz \quad (4.5)$$

και αν θεωρήσουμε σταθερή την ειδική θερμική αγωγιμότητα k και ανεξάρτητη της θέσης, η σχέση 4.5 γίνεται:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = k [\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}] + \Phi \quad (4.6)$$

Η εξίσωση 4.6 απλοποιείται περισσότερο ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο εκάστοτε πρόβλημα. Για παράδειγμα σε μόνιμες συνθήκες μηδενίζεται ο όρος του χρόνου, ελλείψει πηγών μηδενίζεται ο όρος Φ και σε περίπτωση μόνιμης αγωγής χωρίς πηγές μηδενίζονται και οι δυο αντίστοιχοι όροι. Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας θα εξετάσουμε τη μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας χωρίς εσωτερικές πηγές.

4.2 Μεταβατική αγωγή θερμότητας

Κατά τη μεταβατική αγωγή θερμότητας, η θερμοκρασία μεταβάλλεται στο χώρο με το χρόνο, πρόκειται δηλαδή για μια συνάρτηση $T(x,t)$. [53].

Η μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας εκφράζεται από τη διαφορική εξίσωση:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (4.7)$$

με: $T(x,t)$ η θερμοκρασία [°C], t ο χρόνος [sec], x η διάσταση του χώρου [m], ρ η πυκνότητα του σώματος [kg/m³], c η θερμοχωρητικότητα [J/kgK] και k η ειδική θερμική αγωγιμότητα [W/mK]. Οι οριακές και οι αρχικές συνθήκες για μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας σε μονοστρωματικό τοίχο περιλαμβάνουν το συνδυασμό αγωγής και συναγωγής θερμότητας, καθώς η θερμότητα μεταφέρεται από μια οριακή επιφάνεια ενός σώματος με συναγωγή σε περιβάλλον γνωστής ειδικής συναγωγιμότητας h . Για τις θερμοροές δια μέσου του τοίχου θα ισχύει:

$$q_0(x,t) = -k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = h_0 [T_0(t) - T(x,t)], \quad \text{για } x=0 \text{ και } t>0 \quad (4.8)$$

$$q_i(x,t) = -k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = h_i [T_i(x,t) - T(x,t)], \quad \text{για } x=L \text{ και } t>0 \quad (4.9)$$

$$T(x,t) = f(x), \quad \text{για } 0 \leq x \leq L \text{ και } t=0 \quad (4.10)$$

με:

L [m] το πάχος του τοίχου, q_0 η θερμοροή που εισέρχεται στον τοίχο, q_i η θερμοροή που εξέρχεται [$W/m^2 \cdot ^\circ C$], h_0 και h_i οι ειδικές συναγωγιμότητες (δηλαδή οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας) στην εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια αντίστοιχα [$W/m^2 \cdot ^\circ C$], $T_0(t)$ και $T_i(t)$ οι θερμοκρασίες εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος αντίστοιχα [$^\circ C$] που μεταβάλλονται συναρτήσεως του χρόνου με τυχαίο τρόπο. Τέλος, η αρχική συνθήκη είναι το θερμοκρασιακό πεδίο στο χρόνο $t=0$ που είναι μια συνάρτηση της απόστασης x , $f(x)$ σε [$^\circ C$].

Η διαφορική εξίσωση της μεταβατικής αγωγής θερμότητας μπορεί να επιλυθεί με αναλυτικές μεθόδους ή με χρήση συναρτήσεων φαινομένων μεταφοράς. Η επίλυση της ωστόσο με μια από τις παραπάνω μεθόδους μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολη έως και αδύνατη και σίγουρα χρονοβόρα, για αυτό οδηγούμεθα συχνά σε χρήση υπολογιστικών (αριθμητικών) μεθόδων. Παρακάτω, αναφέρονται πολύ συνοπτικά η αναλυτική μέθοδος και οι συναρτήσεις μεταφοράς για να επιδειχθεί η δυσκολία επίλυσης τους και στη συνέχεια παρουσιάζεται η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης με χρήση πεπερασμένων διαφορών.

4.3 Μέθοδοι επίλυσης διαφορικής εξίσωσης μεταβατικής αγωγής θερμότητας

4.3.1. Αναλυτική επίλυση

Η αναλυτική λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης προκύπτει από τη λύση της [55]:

$$T(x,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \exp[-(k/\rho c)\beta_m^2 t] K(\beta_m, x) [F(\beta_m)] + \int_0^t \exp(a\beta_m^2 t) A(\beta_m, t) dt \quad (4.11), (4.12)$$

και

$$q(x,t) = -k\sqrt{2} \sum_{m=1}^{\infty} (\exp(-k/\rho c)\beta_m^2 t) \beta_m [H_0 \cos(\beta_m x) - \beta_m \sin(\beta_m x)] [F(\beta_m) + \int_0^t \exp(a\beta_m^2 t) A(\beta_m, t) dt]$$

όπου β_m οι θετικές ρίζες της εξίσωσης:

$$\tan(\beta L) = \frac{\beta(H_0 - H_i)}{\beta^2 - H_0 H_i}$$

με:

$$H_0 = h_0 / k$$

$$H_i = h_i / k$$

$$K(\beta_m, x) = \sqrt{2} [\beta_m \cos(\beta_m x) + H_0 \sin(\beta_m x)] / K(\beta_m)$$

$$K(\beta_m) = [(\beta_m^2 + H_0^2)(L + \frac{H_i}{\beta_m^2 + H_i^2}) + H_0]^{0.5}$$

$$F(\beta_m) = \int_0^L K(\beta_m, x) f(x) dx$$

και

$$A(\beta_m, t) = (k/\rho c) [K(\beta_m, 0) H_0 T_0(t) + K(\beta_m, L) H_i T_i(t)]$$

Είναι προφανής η δυσκολία επίλυσης των παραπάνω εξισώσεων, αρκετά χρονοβόρα και απαιτεί υψηλές γνώσεις μαθηματικών. Η μέθοδος είναι δύσχρηστη για αυτό και χρησιμοποιείται σπάνια για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας.

4.3.2.Συναρτήσεις μεταφοράς

Η γενική μορφή των συναρτήσεων μεταφοράς για τη θερμοροή που συχνά χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταβατικής μεταφοράς θερμότητας σε δομικά στοιχεία, όταν οι θερμοκρασίες εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος μεταβάλλονται κατά τυχαίο τρόπο είναι[54],[55]:

$$q_{i,t} = \sum_{j=0}^N X_j T_{i,t-j} - \sum_{j=0}^N Y_j T_{0,t-j} + R q_{i,t-1} \quad (4.13)$$

με X,Y οι συναρτήσεις ή συντελεστές μεταφοράς.

Εμείς θα δούμε εκτενέστερα εδώ την εφαρμογή της συνάρτησης μεταφοράς στα ελληνικά κτίρια[55]:

Η ροή θερμότητας μέσω ενός τοίχου ή μιας οροφής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{q}_{e,t} = A \left[\sum_{n=0} b_n T_{e,t-n\Delta} - \sum_{n=1} d_n \frac{\dot{q}_{e,t-n\Delta}}{A} - T_r \sum_{n=0} c_n \right] \quad (4.14)$$

με $q_{e,t}$ το θερμικό κέρδος του χώρου μέσω τοίχου ή οροφής κατά την ώρα t, [W]

A η σωτερική επιφάνεια τοίχου ή οροφής,[m²]

Δ το χρονικό βήμα,[h],(συνήθως μια ώρα)

t ο χρόνος,[h]

η δείκτης άθροισης:η άθροιση έχει τόσους όρους όσο το πλήθος των μη μηδενικών συντελεστών

$T_{e,t-n\Delta}$ η θερμοκρασία ηλίου-αέρος κατά την ώρα t-nΔ

T_r σταθερή εσωτερική θερμοκρασία,[°C]

b_n, c_n, d_n συντελεστές συνάρτησης μεταφοράς,οι δυο πρώτοι [W/m²],ο τελευταίος αδιάστατος αριθμός.

Οι συντελεστές της συνάρτησης μεταφοράς για 40 τύπους ορόφων, 103 τύπους εξωτερικών τοίχων και 47 τύπους εσωτερικών χωρισμάτων παρέχονται σε πίνακες της ASHRAE.

Η ισοδύναμη θερμοκρασία εξωτερικού τοίχου που περιέχεται στην παραπάνω εξίσωση προκύπτει από την υπέρθεση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια τοίχου, της συναλλαγής θερμότητας δια ακτινοβολίας με τον ουρανό και τα γύρω αντικείμενα και της συναλλαγής δια συναγωγής μεταξύ επιφάνειας και του εξωτερικού αέρα. Ο υπολογισμος της θερμοκρασίας εξωτερικού τοίχου γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$T_e = T_o + \frac{a}{h_o} I_t - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad (4.15)$$

με

a/h_o ο λόγος της ηλιακής απορροφητικότητας προς τη συναγωγιμότητα,[m²°C/W]

T_o η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα,[°C]

I_t η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη επιφάνεια A,[W/m²]

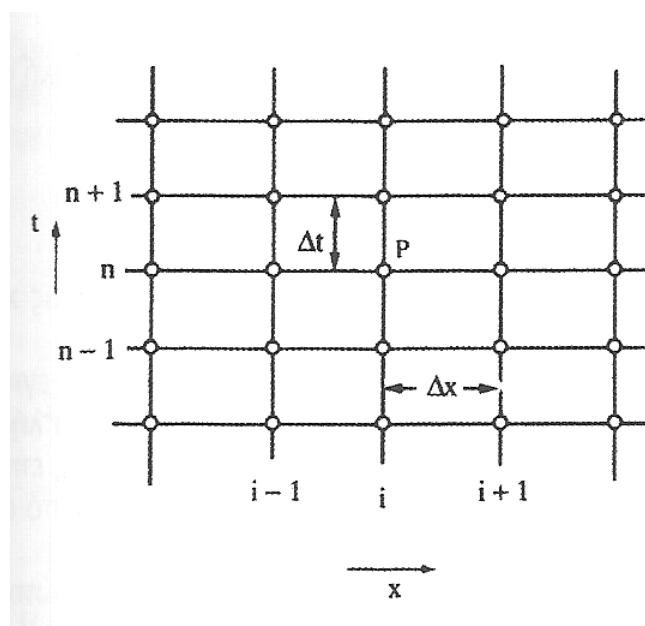
εΔR/h_o διορθωτικός όρος,[°C].

Όπως παρατηρείται στην παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς για τον υπολογισμό της ροής θερμότητας κατά τη χρονική στιγμή t , πρέπει να γνωρίζουμε την ισοδύναμη εξωτερική θερμοκρασία τόσο την ίδια όσο και προηγούμενες χρονικές στιγμές, καθώς και την αντίστοιχη ροή θερμότητας κατά τις προηγούμενες χρονικές στιγμές, απαιτείται επομένως γνώση της ιστορίας του τοίχου ή της οροφής, πράγμα όχι πάντα εφικτό και σίγουρα χρονοβόρο.

4.3.3.Αριθμητική επίλυση

Η δυσκολία της ήδη χρονοβόρας επίλυσης ή ακόμα και η αδυναμία επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τα φαινόμενα μεταφοράς οδηγεί στη χρήση υπολογιστικών (αριθμητικών) μεθόδων. Οι πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες υπολογιστικές μέθοδοι είναι η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και η μέθοδος οριακών στοιχείων. Για προβλήματα φαινομένων μεταφοράς, η περισσότερο διαδεδομένη μέθοδος είναι η *μέθοδος πεπερασμένων διαφορών*, η οποία έλαβε μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η μέθοδος λειτουργεί ως εξής:

- ✓ Η περιοχή επίλυσης χωρίζεται αρχικά σε υποπεριοχές, σχηματιζόμενες από πλέγμα γραμμών (Σχ.4.3)
- ✓ Η διαφορική εξίσωση σε κάθε υποπεριοχή αντικαθίσταται από αλγεβρική εξίσωση συνδέουσα τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής T επί των γειτονικών σημείων τομής (κόμβων) των γραμμών του πλέγματος, ώστε να προκύψουν αλγεβρικές εξισώσεις ισάριθμες των κόμβων του πλέγματος.
- ✓ Τέλος, με την επίλυση του συστήματος των αλγεβρικών εξισώσεων προκύπτει η λύση της διαφορικής εξίσωσης με τη μορφή των τιμών της T επί των κόμβων [53],[56].



Σχήμα 4.3 Διδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα

4.4 Μέθοδοι διακριτοποίησης διαφορικών εξισώσεων

Με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών η συνεχής πληροφορία που παρέχεται από την αναλυτική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης, αντικαθίσταται από διακεκριμένες τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής T επί των κόμβων, γίνεται επομένως "διακριτοποίηση" της κατανομής της T . Η έννοια της διακριτοποίησης επεκτείνεται και στην αλγεβρική εξίσωση η οποία αντικαθιστά τη διαφορική σε κάθε κόμβο, καθώς επίσης και στην περιοχή επίλυσης. Κατ'αυτόν τον τρόπο έχουμε "διακριτοποιημένες εξισώσεις" και "διακριτοποιημένη περιοχή επίλυσης".

Κάθε διακριτοποιημένη εξίσωση είναι μια αλγεβρική εξίσωση που συνδέει τις τιμές της T μιας ομάδας γειτονικών κόμβων. Επομένως, η τιμή της T σε κάθε κόμβο επιδρά μόνο στις τιμές των γειτονικών κόμβων. Αυξανόμενου του πλήθους των κόμβων, αναμένεται ότι η λύση του συστήματος των διακριτοποιημένων εξισώσεων θα προσεγγίζει την ακριβή (αναλυτική) λύση της διαφορικής εξίσωσης. Από την ίδια διαφορική εξίσωση μπορούν να προκύψουν διαφορετικές εκφράσεις διακριτοποιημένων εξισώσεων ανάλογα με τη μέθοδο σχηματισμού τους. Αυξανόμενου, ωστόσο, του πλήθους των κόμβων, όλες οι μορφές οφείλουν να συγκλίνουν στην ίδια λύση.

Η μετατροπή της διαφορικής εξίσωσης που διέπει το φαινόμενο μεταφοράς σε σύστημα διακριτοποιημένων εξισώσεων είναι κοινό χαρακτηριστικό των μεθόδων πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων και οριακών στοιχείων. Προκειμένου περί της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών, οι διακριτοποιημένες εξισώσεις ονομάζονται "εξισώσεις διαφορών", διότι μπορούν να προκύψουν από διαφορική εξίσωση δια προσεγγίσεως των διαφορικών τελεστών με αλγεβρικές διαφορές [53],[56].

4.4.1 Μεταβολική μέθοδος

Αποδεικνύεται ότι η επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης $L(\Phi)=0$ ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση μιας κατάλληλης συνάρτησης X η οποία περιέχει την προς υπολογισμό ποσότητα Φ . Για παράδειγμα, στην περίπτωση της εξίσωσης μόνιμης αγωγής θερμότητας σε διδιάστατη περιοχή R είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (4.16)$$

Η κατάλληλη προς ελαχιστοποίηση συνάρτηση είναι η:

$$X = \iint_R \frac{1}{2} \left[k_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + QT \right] dx dy \quad (4.17)$$

με:

$k_x(x,y), k_y(x,y)$ είναι η θερμική αγωγιμότητα κατά τις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα, Q είναι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας μέσα στην περιοχή R .

Αν η συνάρτηση X ελαχιστοποιηθεί ως προς την τιμή της θερμοκρασίας ενός κόμβου

($\frac{\partial X}{\partial T_{\text{κόμβου}}} = 0$) προκύπτει η διακριτοποιημένη εξίσωση του κόμβου αυτού. Ο

σχηματισμός διακριτοποιημένων εξισώσεων κατ'αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιείται κυρίως στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η μεταβολική μέθοδος σχηματισμού διακριτοποιημένων εξισώσεων έχει δύσκολη φυσική εξήγηση στην περιοχή φαινομένων μεταφοράς, απαιτεί σχετικά πολύπλοκους αλγεβρικούς μετασχηματισμούς και δεν χρησιμοποιείται κατά τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.

4.4.2 Μέθοδος σταθμισμένων υπολοίπων

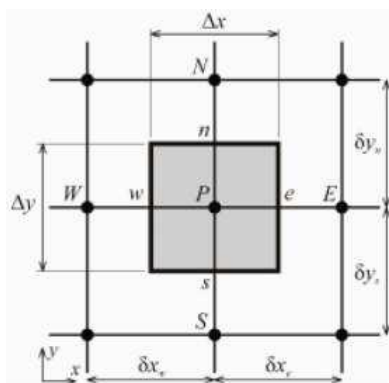
Οι μέθοδοι σταθμισμένων υπολοίπων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διακριτοποίηση διαφορικών εξισώσεων εάν η έκφραση της προσεγγιστικής λύσης:

$\bar{T} = \alpha_1 T_1(\chi) + \alpha_2 T_2(\chi) + \dots + \alpha_m T_m(\chi)$, αντί να ληφθεί ενιαία σε ολόκληρη την περιοχή επίλυσης, σχηματισθεί από τμήματα αναφερόμενα σε υποπεριοχές της περιοχής επίλυσης και περιέχοντα, ως αγνώστους παραμέτρους τις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής T επί των κόμβων.

Ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος κατάστρωσης εξισώσεων διαφορών είναι η μέθοδος της ολοκλήρωσης σε όγκο αναφοράς. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προκύψει από τη μέθοδο των σταθμισμένων υπολοίπων εάν η περιοχή επίλυσης χωρισθεί σε υποπεριοχές και ληφθεί συνάρτηση στάθμισης $W=1$ στην εκάστοτε εξεταζόμενη περιοχή και $W=0$ σε όλες τις άλλες[53].

4.4.3 Μέθοδος όγκου αναφοράς

Στη μέθοδο αυτή ορίζεται ένας όγκος αναφοράς διαστάσεων Δx , Δy στον οποίο θα ολοκληρωθεί η διαφορική εξίσωση. Στον όγκο αυτόν περικλείεται ο κόμβος P του υπολογιστικού πλέγματος. Οι γειτονικοί κόμβοι, οι οποίοι βρίσκονται ανατολικά, δυτικά, βόρεια και νότια του κόμβου P συμβολίζονται με τα γράμματα E, W, N, S αντίστοιχα (από τις αγγλικές λέξεις προσανατολισμού East, West, North και South αντίστοιχα), όπως φαίνεται και στο σχήμα:



Σχήμα 4.4 Όγκος αναφοράς

Οι πλευρές του όγκου αναφοράς διέρχονται από τα σημεία e, w, n και s τα οποία διχοτομούν (συνήθως αλλά όχι κατ'ανάγκη) τις αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ του κόμβου P και των γειτονικών E, W, N, S.

Αφού ορισθεί ο όγκος αναφοράς, ακολουθεί ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης στον όγκο αυτόν από την οποία προκύπτει η διακριτοποιημένη μορφή της διαφορικής εξίσωσης. Η εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών που προκύπτει με την παραπάνω μεθοδολογία εκφράζει την αρχή διατήρησης της ιδιότητας T στον πεπερασμένο όγκο αναφοράς, όπως ακριβώς η αντίστοιχη διαφορική εξίσωση εκφράζει την αρχή διατήρησης σε απειροστό όγκο αναφοράς. Ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της μεθόδου του όγκου αναφοράς αποτελεί το γεγονός ότι η προκύπτουσα λύση ικανοποιεί την αρχή διατήρησης της ιδιότητας T όχι μόνο σε κάθε όγκο αναφοράς αλλά και σε οποιαδήποτε ομάδα όγκων αναφοράς και προφανώς σε ολόκληρη την περιοχή επίλυσης για οποιαδήποτε λεπτότητα υπολογιστικού πλέγματος.

Να σημειωθεί εδώ πως στο υπολογιστικό πλέγμα, οι αποστάσεις των κόμβων του πλέγματος δεν είναι απαραίτητως ίσες. Αντιθέτως, ενδείκνυται ανομοιόμορφο πλέγμα με πύκνωση των κόμβων στις περιοχές μεγάλων μεταβολών της εξαρτημένης μεταβλητής, καθώς με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται ακριβής λύση με μικρό αριθμό κόμβων και συνεπώς επιτυγχάνεται οικονομία χρόνου και μνήμης ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Αυξανόμενη της λεπτότητας του ομοιόμορφου ή ανομοιόμορφου πλέγματος η αριθμητική επίλυση τείνει προς την ακριβή (αναλυτική) λύση της διαφορικής εξίσωσης. Πέραν ενός βαθμού λεπτότητας του πλέγματος, περαιτέρω εκλέπτυνση του πλέγματος προκαλεί αμελητέες μεταβολές στη λύση και συνεπώς έχει πλέον επιτευχθεί λύση ανεξάρτητη της λεπτότητας του πλέγματος[53],[56].

4.4.4 Μέθοδος σειράς Taylor

Ο σχηματισμός εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών με τη μέθοδο της ανάπτυξης σε σειρά Taylor συνίσταται στην πρόσέγγιση των παραγώγων $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, κτλ. που περιέχονται στις διαφορικές εξισώσεις, με αποκομμένες σειρές Taylor. Αναφερόμενοι εκ νέου στο παραπάνω υπολογιστικό πλέγμα, η ανάπτυξη σε σειρά Taylor περί τον κόμβο P κατά τη διεύθυνση x δίδει:

$$T_E = T_P + \delta x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_P + \frac{(\delta x)^2}{2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_P + \frac{(\delta x)^3}{6} \left(\frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right)_P + \frac{(\delta x)^4}{24} \left(\frac{\partial^4 T}{\partial x^4} \right)_P + \dots$$

$$T_W = T_P - \delta x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_P + \frac{(\delta x)^2}{2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_P - \frac{(\delta x)^3}{6} \left(\frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right)_P + \frac{(\delta x)^4}{24} \left(\frac{\partial^4 T}{\partial x^4} \right)_P - \dots$$

(4.18),(4.19)

Από τα αναπτύγματα αυτά προκύπτουν οι παρακάτω εκφράσεις πεπερασμένων διαφορών των παραγώγων:

Έκφραση 1^{ης} παραγώγου προς τα εμπρός:

Επιλύοντας το πρώτο ανάπτυγμα(4.18) ως προς $(\frac{\partial T}{\partial x})_P$ προκύπτει:

$(\frac{\partial T}{\partial x})_P = \frac{T_E - T_P}{\delta x} + E(\delta x)$ όπου $E(\delta x)$ οι υπόλοιποι όροι της σειράς,δηλαδή της τάξεως δx και ανωτέρας. Παραλείποντας από την παραπάνω εξίσωση τον όρο $E(\delta x)$ προκύπτει η προς τα εμπρός έκφραση της παραγώγου $(\frac{\partial T}{\partial x})_P$ με σφάλμα αποκοπής τάξεως δx .

Έκφραση 1^{ης} παραγώγου προς τα πίσω:

Επίλυση του δευτέρου αναπτύγματος(4.19) ως προς $(\frac{\partial T}{\partial x})_P$ δίδει:

$$(\frac{\partial T}{\partial x})_P = \frac{T_P - T_W}{\delta x} + E(\delta x) \quad (4.20)$$

Παραλείποντας τον όρο $E(\delta x)$ προκύπτει η προς τα πίσω έκφραση με σφάλμα αποκοπής τάξεως δx .

Κεντρική έκφραση 1^{ης} παραγώγου:

Με αφαίρεση της εξίσωσης (4.19) από την (4.18) και επίλυση ως προς $(\frac{\partial T}{\partial x})_P$ προκύπτει:

$$(\frac{\partial T}{\partial x})_P = \frac{T_E - T_W}{2(\delta x)} + E(\delta x^2) \quad (4.21)$$

Εάν αμεληθεί ο όρος $E(\delta x^2)$ προκύπτει η κεντρική έκφραση της 1^{ης} παραγώγου με σφάλμα αποκοπής τάξεως (δx^2) , δηλαδή μικρότερο από το σφάλμα αποκοπής των δυο προηγούμενων περιπτώσεων.

Έκφραση 2^{ας} παραγώγου:

Πρόσθεση των εξισώσεων (4.18),(4.19) και επίλυση ως προς $(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2})_P$ δίδει:

$$(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2})_P = \frac{T_E - 2T_P + T_W}{(\delta x)^2} + E(\delta x^2) \quad (4.22)$$

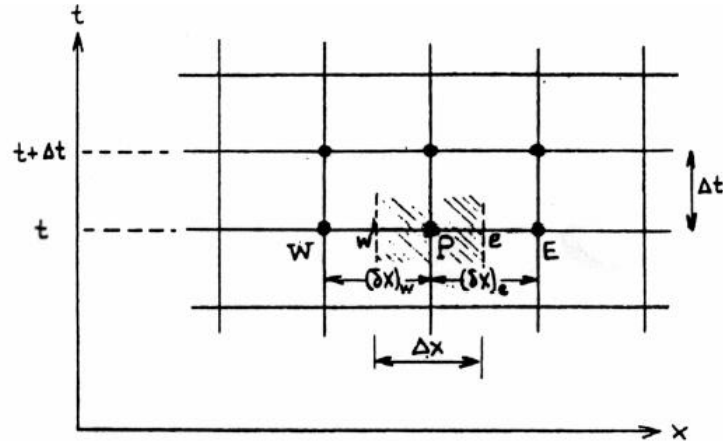
Παραλείποντας το $E(\delta x^2)$, το σφάλμα αποκοπής είναι της τάξεως (δx^2) .

Αντικατάσταση των παραπάνω εκφράσεων 1^{ης} και 2^{ας} παραγώγου στις διαφορικές εξισώσεις, αφού πρώτα παραλειφθούν οι όροι E που δηλώνουν το σφάλμα αποκοπής, δίδουν τις αντίστοιχες εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου,περιλαμβάνεται το γεγονός πως πρόκειται για μια μαθηματική μέθοδο μή παρέχουσα σαφώς τη φυσική ερμηνεία των όρων, απαιτείται συνέχεια της συνάρτησης T και των παραγώγων της και κυρίως ότι απαιτείται ομοιόμορφο υπολογιστικό πλέγμα κατά τις κατευθύνσεις των συντεταγμένων, δηλαδή πλέγμα με ίσες αποστάσεις μεταξύ των πλεγματικών γραμμών. Ο τελευταίος αυτός περιορισμός αποκλείει την πύκνωση του πλέγματος σε περιοχές μεγάλων μεταβολών της T . Στην περίπτωση ομοιόμορφου πλέγματος, οι εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών που προκύπτουν με τη μέθοδο του όγκου αναφοράς ταυτίζονται με αυτές που δίδει η ανάπτυξη σε σειρά Taylor.

4.5 Γενικευμένη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Εξετάζεται η επίλυση, με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών της διαφορικής εξίσωσης μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας (σχέση 4.7). Το πρόβλημα έγκειται στον υπολογισμό του θερμοκρασιακού πεδίου, δηλαδή των τιμών της θερμοκρασίας επί των κόμβων του υπολογιστικού πλέγματος κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$, με γνωστές τις τιμές κατά την προηγούμενη χρονική στιγμή t , όπου Δt είναι το χρονικό βήμα[53]. Το σχετικό υπολογιστικό πλέγμα φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 4.5 Υπολογιστικό πλέγμα μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας

Έστω T_W^o, T_P^o, T_E^o οι γνωστές τιμές της θερμοκρασίας επί των κόμβων W, P, E κατά τη χρονική στιγμή t και T_W^1, T_P^1, T_E^1 οι αντίστοιχες τιμές κατά την επόμενη χρονική στιγμή $t+\Delta t$. Για την κατάσταση της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών ακολουθείται η μέθοδος του όγκου αναφοράς. Υποθέτοντας ρc σταθερό, η ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης στον όγκο αναφοράς που περιβάλλει τον κόμβο P και στο χρονικό διάστημα t με $t+\Delta t$ δίνει:

$$\rho c \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad (4.23)$$

Με την υπόθεση σταθερής θερμοκρασίας T_P σε ολόκληρο τον όγκο αναφοράς, το πρώτο μέλος της εξίσωσης γίνεται:

$$\rho c \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial T}{\partial t} dx dt = \rho c \Delta x (T_P^1 - T_P^o) \quad (4.24)$$

Το χωρικό μέρος του ολοκληρώματος του δευτέρου μέλους της εξίσωσης (4.23) γίνεται:

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt &= \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[k_e \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - k_w \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt \Leftrightarrow \\ \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt &= \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e (T_E - T_P)}{(\Delta x)_e} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\Delta x)_w} \right] dt \end{aligned}$$

Επομένως τελικά:

$$\rho c \Delta x (T_P^1 - T_P^o) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P - T_w)}{(\delta x)_w} \right] dt \quad (4.25)$$

Για τον υπολογισμό του παραπάνω ολοκληρώματος απαιτείται να γίνει μια υπόθεση σχετικά με τον τρόπο μεταβολής της θερμοκρασίας T_P μετά του χρόνου μέσα στο χρονικό διάστημα t με $t+\Delta t$. Γίνονται οι παρακάτω τρεις διαφορετικές υποθέσεις:

- T_P σταθερά και ίση προς T_P^o κατά τη χρονική στιγμή t
- T_P σταθερά και ίση προς T_P^1 κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$
- T_P μεταβαλλόμενη γραμμικά με το χρόνο.

Και οι τρεις υποθέσεις εκφράζονται από τη σχέση:

$$\int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [f T_P^1 + (1-f) T_P^o] \Delta t \quad (4.26)$$

όπου ο παράγων στάθμισης f λαμβάνει τιμές από 0 ως 1. Οι τιμές $f=0$, 1 και 0.5 αντιστοιχούν στις παραπάνω υποθέσεις. Χρησιμοποιώντας για τις θερμοκρασίες T_w και T_E όμοιες σχέσεις με την (4.26), η εξίσωση (4.25) γίνεται:

$$\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} (T_P^1 - T_P^o) = f \left[\frac{k_e (T_E^1 - T_P^1)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P^1 - T_w^1)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[\frac{k_e (T_E^o - T_P^o)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_P^o - T_w^o)}{(\delta x)_w} \right]$$

(4.27)

Εκτελώντας τις πράξεις προκύπτει η έκφραση πεπερασμένων διαφορών της εξίσωσης:

$$A_p T_P = A_E [f T_E + (1-f) T_E^o] + A_w [f T_w + (1-f) T_w^o] + [A_p^o - (1-f) A_E - (1-f) A_w] T_P^o$$

(4.28)

με:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e}$$

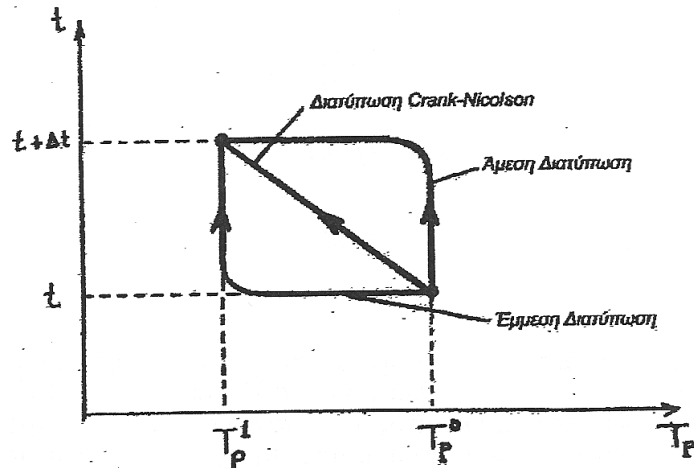
$$A_w = \frac{k_w}{(\delta x)_w}$$

$$A_p^o = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}$$

και

$$A_p = f A_E + f A_w + A_p^o$$

(Χάρην απλότητας παραλήψαμε τους δείκτες "1" στις παραπάνω σχέσεις)



Σχήμα 4.6 Οι τρεις υποθέσεις για τη μεταβολή της θερμοκρασίας T_P

Προκύπτουν τρεις διατυπώσεις της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών ανάλογα με την υπόθεση που έχει γίνει και είναι:

4.5.1 Άμεση διατύπωση

Η άμεση διατύπωση προκύπτει από τη γενικευμένη εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών για $f=0$ δηλαδή:

$$A_P T_P = A_E T_E^o + A_W T_W^o + (A_P - A_E - A_W) T_P^o$$

με:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad (4.29)$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}$$

$$A_P = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι η άγνωστη θερμοκρασία δεν συνδέεται με άλλες άγνωστες τιμές (T_E, T_W) και επομένως υπολογίζεται αμέσως συναρτήσει των γνωστών θερμοκρασιών T_W^o, T_P^o, T_E^o της προηγούμενης χρονικής στιγμής. Για την άμεση διατύπωση έχει γίνει η υπόθεση ότι η θερμοκρασία διατηρεί την τιμή T_P^o καθ'όλο το χρονικό βήμα Δt και λαμβάνει αποτόμως την τιμή T_P κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει η άμεση διατύπωση είναι ο άμεσος υπολογισμός των τιμών T_P χωρίς να απαιτείται επίλυση συστήματος εξισώσεων αλλά μειονεκτεί στο ότι ο συντελεστής $(A_P - A_E - A_W)$ της T_P^o ενδέχεται να γίνει αρνητικός με αποτέλεσμα να προκύψει φυσικώς απαράδεκτη τιμή θερμοκρασίας T_P . Επιβάλλεται επομένως ένας περιορισμός για την αποφυγή αυτής της περίπτωσης ο οποίος είναι $A_P - A_E - A_W > 0$, που για σταθερή θερμική αγωγιμότητα k και $(\delta x)_e = (\delta x)_w = \Delta x$ γίνεται:

$\Delta t < (\rho c (\Delta x)^2 / 2k)$, δηλαδή απαιτείται μικρό χρονικό βήμα Δt ή μεγάλο χωρικό Δx . Ο τελευταίος περιορισμός αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα της διατύπωσης διότι η μείωση του Δx με σκοπό την αύξηση της χωρικής ακρίβειας απαιτεί σημαντική μείωση του χρονικού βήματος κάνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο τη μέθοδο αντιστοιχομική[53].

4.5.2 Έμμεση διατύπωση

Η έμμεση διατύπωση των πεπερασμένων διαφορών προκύπτει από τη γενική μορφή για $f=1$ δηλαδή:

$$A_p T_p = A_E T_E + A_W T_W + A_p^o T_p^o$$

με:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e} \quad (4.30)$$

$$A_W = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}$$

$$A_p = A_E + A_W + A_p^o$$

Από την εξίσωση (4.30) φαίνεται ότι η άγνωστη θερμοκρασία T_p κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$, εκφράζεται συναρτήσει των επίσης αγνώστων θερμοκρασιών T_E και T_W που αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή, συνεπώς ο υπολογισμός της T_p γίνεται μόνο εμμέσως δηλαδή με επίλυση του συστήματος εξισώσεων. Το σύστημα αυτό είναι τριδιαγωνίου μορφής όπως θα αναλυθεί διεξοδικότερα παρακάτω.

Για την έμμεση διατύπωση γίνεται η υπόθεση πως κατά τη χρονική στιγμή t η θερμοκρασία στον κόμβο P μεταπίπτει απότομα από την τιμή T_p^o στην τιμή T_p την οποία διατηρεί καθ'όλο το χρονικό βήμα Δt .

Η έμμεση διατύπωση προτιμάται από την άμεση καθώς δεν υφίσταται ο περιορισμός της αμέσου δηλαδή το χρονικό βήμα Δt μπορεί να ληφθεί οσοδήποτε μεγάλο εξοικονομώντας έτσι χρόνο ηλεκτρονικού υπολογιστή. Παρ'όλα απαιτείται επιπλέον χρόνος για την επίλυση του συστήματος.

4.5.3 Διατύπωση Crank-Nicolson

Η διατύπωση αυτή προκύπτει από τη γενική μορφή της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών για $f=0.5$, δηλαδή:

$$A_p T_p = \frac{A_E}{2} (T_E + T_E^o) + \frac{A_W}{2} (T_W + T_W^o) + (A_p^o - \frac{A_E}{2} - \frac{A_W}{2}) T_p^o$$

με:

$$A_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e}$$

$$A_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}$$

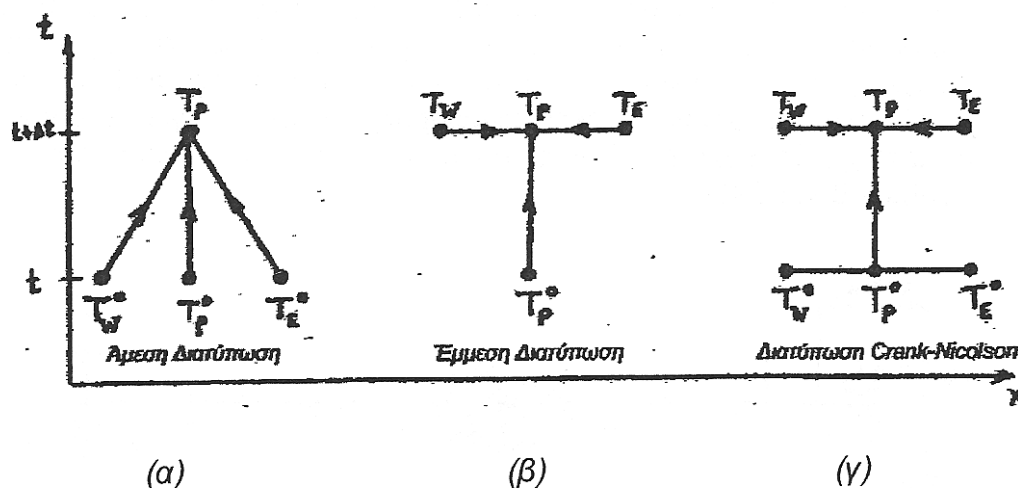
$$A_p^o = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}$$

$$A_p = \frac{A_E}{2} + \frac{A_W}{2} + A_p^o$$

Όπως και στην έμμεση διατύπωση, η θερμοκρασία T_p εκφράζεται συναρτήσει των αγνώστων θερμοκρασιών T_E και T_W , επομένως απαιτείται επίλυση συστήματος

τριδιαγωνίου μορφής. Κατά τη διατύπωση Crank-Nicolson έχει υποθεθεί γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας με το χρόνο κατά το χρονικό βήμα Δt .

Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια, δηλαδή σφάλμα αποκοπής χρονικής και χωρικής παραγωγού της τάξης του $(\Delta t)^2$ και $(\Delta x)^2$ αντιστοίχως, έναντι των (Δt) και $(\Delta x)^2$ των άλλων μεθόδων. Παρ'όλα αυτά και παρά το γεγονός ότι η μέθοδος δίδει μαθηματικώς ευσταθή λύση για οσοδήποτε μεγάλο χρονικό βήμα Δt , η λύση αυτή ενδέχεται να μην είναι φυσικώς δεκτή, συμπερασματικά από τις τρεις διατυπώσεις που αναφέρθηκαν προτιμάται η έμμεση διατύπωση της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών.



Σχήμα 4.7 Σχηματική παρουσίαση των τριών διατυπώσεων της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών για μεταβατικά φαινόμενα

Άλλες διατυπώσεις προκύπτουν από τη γενική εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για άλλες τιμές του συντελεστή στάθμισης $f=0 \div 1$, πλην των 0, 0.5, 1 που ήδη εξετάστηκαν. Άμεση διατύπωση δίδει προφανώς μόνο η τιμή $f=0$, δηλαδή οδηγεί σε έκφραση της θερμοκρασίας κάθε κόμβου συναρτήσει μόνο γνωστών θερμοκρασιών του προηγούμενου χρονικού επιπέδου. Αποδεικνύεται πως για $0.5 \leq f \leq 1$ οι προκύπτουσες διατυπώσεις είναι μαθηματικώς ευσταθείς χωρίς περιορισμό μεγέθους του χρονικού βήματος Δt . Επίσης, άλλες διατυπώσεις προκύπτουν με χρήση τριών χρονικών επιπέδων $(t-\Delta t, t, t+\Delta t)$, ή ακόμη χρησιμοποιείται η εκθετική μεταβολή της θερμοκρασίας με το χρόνο αντί των προηγούμενων υποθέσεων [53], [56].

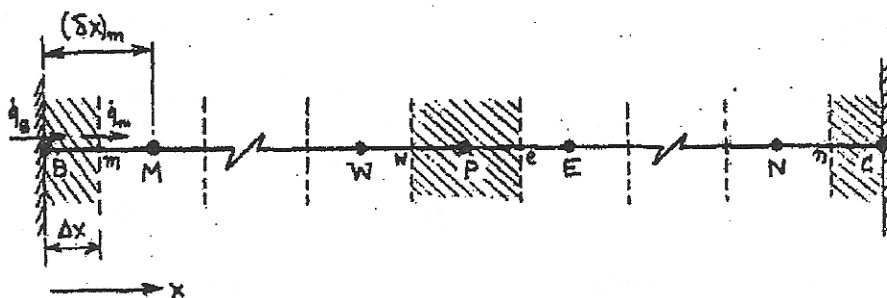
4.5.4 Οριακές συνθήκες

Από τα προηγούμενα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η εφαρμογή μεθόδου πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση της λύσης μιας διαφορικής εξίσωσης, καταλήγει σε (γραμμικό ή μη) σύστημα εξισώσεων. Το σύστημα αυτό όμως είναι από μόνο του μη επιλύσιμο.

Οι διαφορικές εξισώσεις αγωγής θερμότητας με και χωρίς πηγές επιτρέπουν τον προσδιορισμό της κατανομής θερμοκρασίας σε ένα σώμα στα όρια του οποίου επικρατούν ορισμένες συνθήκες γνωστές ως *οριακές συνθήκες*.

Οι εξισώσεις που εκφράζουν τις οριακές συνθήκες είναι απαραίτητες για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών ώστε ο αριθμός των αγνώστων θερμοκρασιών να είναι ίσος με τον αριθμό των εξισώσεων του συστήματος.

Υποθέτουμε μονοδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα σε πρόβλημα μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας. Για την τιμή της θερμοκρασίας T_P σε κάθε εσωτερικό κόμβο P μπορεί να γραφεί μια εξίσωση πεπτερασμένων διαφορών και κατ'αυτόν τον τρόπο καταστρώνεται σύστημα με εξισώσεις ισάριθμες των εσωτερικών κόμβων. Ωστόσο, η επίλυση του συστήματος δεν είναι δυνατή διότι πλὴν των αγνώστων τιμών της θερμοκρασίας επί των εσωτερικών κόμβων, περιέχονται και οι εξισώσεις και οι θερμοκρασίες επί των οριακών κόμβων B και C (σχ 4.8). Οι δυο εξισώσεις που απαιτούνται για τη συμπλήρωση του συστήματος παρέχονται από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος[53].



Σχήμα 4.8 Εσωτερικός και οριακοί όγκοι αναφοράς

Στο σχήμα απεικονίζεται μονοδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα, το οποίο φέρει κόμβους B και C πάνω στα δυο όρια. Στο πλέγμα σημειώνονται με διαγράμμιση ο τυπικός εσωτερικός όγκος αναφοράς περί τον κόμβο P καθώς και οι οριακοί όγκοι αναφοράς οι οποίοι γειτονεύουν με τα αντίστοιχα όρια και εκτείνονται μόνο προς τη μια πλευρά των οριακών κόμβων B και C.

Οι οριακές συνθήκες χωρίζονται σε τρία είδη, όπως περιγράφονται παρακάτω:

1) Συνθήκη Dirichlet:

Είναι γνωστές οι τιμές της θερμοκρασίας στα όρια B και C οπότε προφανώς δεν απαιτούνται επί πλέον εξισώσεις.

2) Συνθήκη Neumann:

Είναι γνωστές οι τιμές των θερμοροών των ορίων \dot{q}_B και \dot{q}_C . Σε αυτή την περίπτωση καταστρώνονται δυο εξισώσεις περιέχουσες τις άγνωστες τιμές T_B και T_C με ολοκλήρωση της διαφορικής εξίσωσης πάνω στους οριακούς όγκους αναφοράς. Στον κόμβο B θα είναι:

$$\dot{q}_B - \dot{q}_m + (S_2 + S_1 T_B) \Delta x = 0 \Rightarrow \dot{q}_B - \frac{k_m (T_B - T_M)}{(\delta x)_m} + (S_2 + S_1 T_B) \Delta x = 0$$

άρα :

$$A_B T_B = A_M T_M + B$$

με :

(4.32)

$$A_M = \frac{k_m}{(\delta x)_m}$$

$$A_B = A_M - S_1 \Delta x$$

$$B = S_2 \Delta x + \dot{q}_B$$

Ομοίως για τον κόμβο C.

3) Συνθήκη συναγωγής στα όρια:

Στην περίπτωση αυτή είναι γνωστές οι συναγωγιμότητες h_B, h_C και οι θερμοκρασίες διερχομένου ρευστού T_{fB}, T_{fC} στα όρια B και C αντίστοιχα.

4.6 Επίλυση συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών

Γράφοντας μια εξίσωση πεπερασμένων διαφορών για κάθε κόμβο του πλέγματος, προκύπτει σύστημα εξισώσεων με ισάριθμους αγνώστους τις τιμές των θερμοκρασιών επί των κόμβων. Το σύστημα των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών μπορεί να είναι πραγματικά γραμμικό ή να έχει τεθεί υπό γραμμική μορφή. Στα γραμμικά προβλήματα μπορούν να εφαρμοστούν *άμεσοι μέθοδοι επίλυσης* όπως η αντιστροφή μητρώου ή η απαλειφή κατά Gauss παρά το γεγονός ότι απαιτούν περισσότερο χρόνο και χωρητικότητα μνήμης υπολογιστή από τις επαναληπτικές. Οι άμεσες μέθοδοι είναι εκείνες που δεν προϋποθέτουν επαναληπτική διαδικασία αλλά επιχειρούν απευθείας λύση του συστήματος. Οι *επαναληπτικές μέθοδοι* χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στα μή γραμμικά συστήματα καθώς οι συντελεστές των εξισώσεων παίρνουν την τελική τιμή τους μετά από κάποιες επαναλήψεις. Οι επαναληπτικές μέθοδοι, όπως η Gauss-Seidel, απαιτούν λιγότερο χρόνο και χωρητικότητα μνήμης ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η μέθοδος αντιστροφής μητρώου προς αντιπροσώπευση των άμεσων μεθόδων, η Gauss-Seidel της επαναληπτικής και η επίλυση γραμμικών εξισώσεων τριδιαγώνιας μορφή που αναφέρθηκε πρώτερα[53].

4.6.1 Μέθοδος αντιστροφής μητρώου

Η τυπική μορφή του συστήματος εξισώσεων διαφορών όταν είναι γραμμικό είναι:

$$\begin{aligned} a_{11}T_1 + a_{12}T_2 + \dots + a_{1n}T_n &= b_1 \\ a_{21}T_1 + a_{22}T_2 + \dots + a_{2n}T_n &= b_2 \\ \dots & \\ a_{n1}T_1 + a_{n2}T_2 + \dots + a_{nn}T_n &= b_n \end{aligned} \quad (4.33)$$

Υπό μορφή μητρώου:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Δηλαδή:

$$[A][T]=[B] \quad (4.35)$$

Οι εξισώσεις του συστήματος (Σχ.4.33) γράφονται μετά από πράξεις:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{1}{a_{11}}(b_1 - \sum_{j=2}^n a_{1j}T_j) \\
 T_2 &= \frac{1}{a_{22}}(b_2 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^n a_{2j}T_j) \\
 &\dots\dots\dots \\
 T_n &= \frac{1}{a_{nn}}(b_n - \sum_{j=1}^{n-1} a_{nj}T_j)
 \end{aligned}
 \tag{4.40}$$

Η επαναληπτική διαδικασία είναι:

- Δίδονται κατ'εκτίμηση τιμές στους αγνώστους $T_1^0, T_2^0, \dots, T_n^0$
- Αντικαθίστανται οι παραπάνω τιμές στα δεξιά μέλη των εξισώσεων (4.40) και υπολογίζονται οι βελτιωμένες τιμές των αγνώστων $T_1^1, T_2^1, \dots, T_n^1$
- Επαναλαμβάνεται το δεύτερο βήμα με τις βελτιωμένες τιμές έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

Η ικανή αλλά όχι αναγκαία συνθήκη για να εξασφαλιστεί σύγκλιση εκφράζεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}
 |a_{ii}| &\geq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |a_{ij}| \quad \text{για } i = 1, 2, \dots, n \\
 |a_{ii}| &> \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |a_{ij}| \quad \text{για μια τουλάχιστον τιμή του } i
 \end{aligned}
 \tag{4.41}, (4.42)$$

Στο πρόγραμμα που συντάσσεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέγεται η έμμεση έκφραση των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών καθώς επίσης η μέθοδος Gauss-Seidel επιλέγεται ως μέθοδος επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων που προκύπτει από εφαρμογή πεπερασμένων διαφορών σε τοίχωμα.

5.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΤΙΡΙΑΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ PCM ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ.

5.1 Περιγραφή στόχου

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου της μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητα στα απλα συμβατικά πολυστρωματικά στοιχεία του κελύφους κτιρίων με απλή μόνωση και σε στοιχεία κελύφους ενισχυμένα με υλικά αλλαγής φάσης (PCM). Εν συνεχεία, επιλέγεται βάσει των αποτελεσμάτων, το καταλληλότερο και πλέον συμφέρον PCM για εφαρμογή σε κτίρια στην περιοχή των Αθηνών. Για το σκοπό αυτό, επιλύεται η διαφορική εξίσωση που διέπει τη μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας με χρήση αριθμητικής μεθόδου, αφού όπως ειπώθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο η αναλυτική έκφραση και η συνάρτηση μεταφοράς αποτελούν ιδιαίτερα χρονοβόρες μεθόδους.

Για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης συντάσσεται κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ο οποίος παρατίθεται και επεξηγείται παρακάτω[57]. Ο κώδικας βασίζεται στην αριθμητική μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, και πιο συγκεκριμένα στην έμμεση διατύπωση, ενώ επιλέγεται η επαναληπτική μέθοδος Gauss-Seidel για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που προκύπτει από τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.

Για τη δημιουργία του κώδικα είναι απαραίτητο να οριστεί το κατάλληλο υπολογιστικό πλέγμα, με τη διακριτοποίηση των στοιχείων (τοίχοι και οροφή) που αποτελούν το κέλυφος του κτιρίου. Ως κτίριο θεωρούμε ένα δωμάτιο χωρίς εσωτερικούς τοίχους και επίπλωση. Το υπολογιστικό πλέγμα είναι μονοδιάστατο, εξετάζεται δηλαδή η ροή θερμότητας μόνο προς τη διεύθυνση x και είναι διαφορετικό για την οροφή και για τα εξωτερικά τοιχώματα αφού αποτελούνται από διαφορετικά στρώματα υλικών. Στο πρόγραμμα έχει καθοριστεί ο προσανατολισμός κάθε τοιχώματος(βορράς, νότος, ανατολή και δύση).

Ως δεδομένα στο πρόγραμμα (input) εισάγονται τα στρώματα από τα οποία αποτελείται το κάθε στοιχείο (τοίχοι, οροφή) και τα θερμικά χαρακτηριστικά του κάθε στρώματος. Με δεδομένο το πάχος L και τον αριθμό των στρωμάτων που αποτελούν το κάθε στοιχείο και για επιλεγμένο χωρικό βήμα Δx υπολογίζεται ο αριθμός N των κόμβων των στρωμάτων. Η αρίθμηση των κόμβων γίνεται από έξω προς τα μέσα με πρώτο κόμβο αυτόν του πρώτου στρώματος που βρίσκεται σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα και τελευταίο κόμβο αυτόν του τελευταίου στρώματος που βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα εσωτερικού χώρου. Επίσης, κάθε στρώμα έχει τη δική του αρίθμηση ώστε να είναι δυνατή η ανεξάρτητη μελέτη του για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τη συμπεριφορά των διάφορων δομικών υλικών. Τελικός σκοπός της μελέτης αγωγής θερμότητας είναι ο προσδιορισμός του θερμοκρασιακού πεδίου του εξεταζόμενου στοιχείου. Για το λόγο αυτό, υπολογίζονται οι τιμές της θερμοκρασίας επί των κόμβων του πλέγματος κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ με γνωστές τις τιμές κατά την προηγούμενη χρονική στιγμή t , όπου Δt είναι το χρονικό βήμα.

5.2 Σχέσεις που διέπουν τη μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας στις οποίες βασίζεται ο κώδικας και η μορφή τους σε αυτόν.

Διαφορική εξίσωση αγωγής θερμότητας :

Η διαφορική εξίσωση που εκφράζει τη μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας στα πολυστρωματικά στοιχεία του κελύφους είναι:

$$\rho_{ej} c_{ej} \frac{\partial T_{ej}(t, x)}{\partial t} = k_{ej} \frac{\partial^2 T_{ej}(t, x)}{\partial x^2}, \quad \text{με } x_j \leq x \leq x_{j+1}, \quad t > 0, j=1, 2, \dots \quad (5.1)$$

Ο δείκτης e αναφέρεται στο στοιχείο του κελύφους και ο δείκτης j στο πλήθος των στρωμάτων που αποτελούν το κάθε στοιχείο. Η μεταβλητή $T_{ej}(t, x)$ είναι η στιγμιαία θερμοκρασία του στρώματος j σε βάθος x , μετρούμενο από την *εξωτερική* επιφάνεια σε $^{\circ}\text{C}$ τη χρονική στιγμή t . Οι σταθερές ρ , c , k είναι η πυκνότητα σε $[\text{kg}/\text{m}^3]$, η ειδική θερμοχωρητικότητα σε $[\text{J}/\text{kgK}]$ και η θερμική αγωγιμότητα του στρώματος j σε $[\text{W}/\text{mK}]$. Οι συντεταγμένες των επιφανειών κάθε στρώματος j εκφράζονται με τις μεταβλητές X_j, X_{j+1} σε $[\text{m}]$.

Οριακές και αρχικές συνθήκες

Όπως ειπώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η θερμοκρασία στους οριακούς κόμβους μπορεί να προκύψει μόνο από τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες, επομένως για να είναι δυνατή η επίλυση της μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής επιβάλλεται η κατάστρωση εξισώσεων οριακών και αρχικών συνθηκών. Στην προκειμένη περίπτωση, η αρχική και οι οριακές συνθήκες για τη διαφορική εξίσωση (5.1) και πιο συγκεκριμένα για τους οριακούς κόμβους των εξωτερικών τοιχωμάτων του κελύφους εκφράζονται από τις εξισώσεις:

Εξωτερική επιφάνεια:

$$q_{0,n}(t) = -k_{e1} \frac{\partial T_{e1}(t, x)}{\partial x} = h_0 [T_0(t) - T_{e1}(t, x)], \quad x = x_1 \quad t > 0 \quad (5.2)$$

με $T_0(t)$, $q_{0,n}(t)$, h_0 η θερμοκρασία εξωτερικού αέρα [$^{\circ}\text{C}$], η θερμοροή [W/m^2] και ο συντελεστής συναγωγής [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου e του κελύφους αντιστοίχως.

Εσωτερική επιφάνεια:

$$q_{i,n}(t) = -k_{ej} \frac{\partial T_{ej}(t, x)}{\partial x} = h_i [T_{ej}(t, x) - T_i(t)] + \sum_s g_{e,s} [T_{ej}(t, x) - T_s(t)], \quad x = x_{j+1}, \quad t > 0 \quad (5.3)$$

με $T_s(t)$, $q_{i,n}(t)$ και h_i η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα [$^{\circ}\text{C}$], η θερμοροή [W/m^2] και ο συντελεστής συναγωγής [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] στην εσωτερική επιφάνεια του στοιχείου e του κελύφους αντιστοίχως. Ο όρος $\sum_s g_{e,s} [T_{e_j}(t, x) - T_s(t)]$, εκφράζει τη μετάδοση θερμότητας δια ακτινοβολίας μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του εκάστοτε στοιχείου και οποιασδήποτε άλλης εσωτερικής επιφάνειας s θερμοκρασίας $T_s(t)$ με συντελεστή ακτινοβολίας $g_{e,s}$. Πρέπει να τονιστεί εδώ πως στην παρούσα εργασία και στο πρόβλημα που εξετάζει, η ακτινοβολία θεωρείται αμελητέα επομένως δε λαμβάνεται υπόψιν στο πρόγραμμα.

Αρχική συνθήκη:

$$T_{e_j}(t, x) = f_{e_j}(x) \quad , x_i \leq x \leq x_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad , t = 0 \quad (5.4)$$

με $f_{e_j}(x)$ το αρχικό θερμοκρασιακό πεδίο του κάθε στρώματος.

Ισολογισμός θερμικής ενέργειας

Ο εσωτερικός ισολογισμός θερμικής ενέργειας εκφράζεται από την εξίσωση:

$$(p_a V_a C_a) \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \sum_n q_{i,n}(t) A_n + Q_i(t), \quad t > 0 \quad (5.5)$$

Το πρώτο μέλος της εξίσωσης εκφράζει την μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας, σε σχέση με το χρόνο, που είναι αποτέλεσμα των εισερχόμενων και εξερχόμενων θερμοροών. Στον όρο περιλαμβάνονται η πυκνότητα του αέρα, ο όγκος που καταλαμβάνει και η ειδική του θερμοχωρητικότητα.

Στο δεύτερο μέλος γράφονται σαν άθροισμα, οι θερμοροές που εισέρχονται ή εξέρχονται δια μέσου των εξωτερικών τοίχων, ενώ ο όρος $Q_i(t)$ εκφράζει το εσωτερικό φορτίο που υπάρχει στο χώρο (αν υπάρχει) δηλαδή θέρμανση το χειμώνα και κλιματισμός το καλοκαίρι.

Στον ισολογισμό μπορεί να προστεθούν και άλλοι όροι ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται κάθε φορά. Στο παρόν πρόβλημα για παράδειγμα, περιλαμβάνονται ακόμα θερμοροές από τέσσερα παράθυρα που βρίσκονται ένα σε κάθε τοίχο και υποθέτουμε ότι καταλαμβάνουν περίπου το 15% της συνολικής επιφάνειας του τοίχου. Η θερμοροή που οφείλεται στα παράθυρα γράφεται στο δεξί μέλος της (5.5).

• Εξήγηση εισαγωγής των παραπάνω σχέσεων στον κώδικα:

Οι σχέσεις (5.1)-(5.5) είναι οι σχέσεις στις οποίες βασίζεται ο κώδικας για την επίλυση του προβλήματος. Επομένως, είναι σημαντικό εδώ να εξηγηθούν οι σχέσεις όπως εισάγονται στο πρόγραμμα:

Στη σχέση (5.1) αυτό που αλλάζει στο πρόγραμμα είναι ο συμβολισμός των δεικτών. Κατ'αυτό τον τρόπο, ο δείκτης e ο οποίος στη σχέση (5.1) εκφράζει τα διάφορα στοιχεία του κελύφους, στο πρόγραμμα αντικαθίσταται από το γράμμα H για την οροφή, ενώ για τους εξωτερικούς τοίχους χρησιμοποιείται ο αντίστοιχος αριθμός: 1 για το βόρειο τοίχο, 2 για το νότιο, 3 για τον ανατολικό και 4 για το δυτικό τοίχο αντίστοιχα. Ο δείκτης j των στρωμάτων του στοιχείου αντικαθίσταται από NUM για τα εξωτερικά πλαινά τοιχώματα και από NUMH για την οροφή. Η θερμοκρασία $T_{e_j}(t, x)$ συμβολίζεται με TP(N(NUM), NUM) για τα πλαινά τοιχώματα και TP(N(NUMH),

NUMH) για την οροφή, όπου N(NUM) και N(NUMH) ο αύξων αριθμός του κόμβου του εκάστοτε στρώματος του κάθε στοιχείου τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Οι σταθερές ρ_{ej} , c_{ej} , k_{ej} συμβολίζονται στο πρόγραμμα με P(NUM), C(NUM), K(NUM) και P(NUMH), C(NUMH), K(NUMH) για τα πλαινά εξωτερικά τοιχώματα και την οροφή αντίστοιχα. Τέλος, οι συντεταγμένες των επιφανειών του κάθε στρώματος j αντιπροσωπεύονται από τις μεταβλητές x_j , x_{j+1} [m] και στο πρόγραμμα έχουν τη μορφή πίνακα που συμβολίζεται με XL(N(NUM), NUM) με N(NUM) τον αριθμό του εκάστοτε κόμβου του υπολογιστικού πλέγματος.

Η διαφορική εξίσωση (5.1) επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών αφού γίνει διακριτοποίηση, καταλήγει δηλαδή σε ένα σύστημα αλγεβρικών διακριτοποιημένων εξισώσεων. Η μορφή της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών όπως εισάγεται στο πρόγραμμα είναι:

$$TP(I, J) = \frac{A}{AI} TP(I-1, J) + \frac{AK}{AI} TP(I+1, J) + \frac{AIO}{AI} T0(I, J) \quad (5.6)$$

όπου J ο αριθμός του εξεταζόμενου στρώματος μετρούμενος από έξω προς τα μέσα, δηλαδή το (NUM), και I είναι ο αριθμός του κόμβου του εκάστοτε στρώματος δηλαδή το (N(NUM)) στο συγκεκριμένο χωρικό και χρονικό σημείο. Η υπολογιζόμενη θερμοκρασία στον κόμβο P είναι TP(I,J) ενώ οι θερμοκρασίες στον προηγούμενο και τον επόμενο κόμβο είναι TP(I-1,J) και TP(I+1,J) αντίστοιχα. Με T0(I,J) συμβολίζεται η θερμοκρασία στον εξεταζόμενο κόμβο την προηγούμενη χρονική στιγμή. Οι συντελεστές της εξίσωσης με τη μορφή που εισέρχονται στο πρόγραμμα είναι:

$$A = \frac{K(J)}{DX}, AK = \frac{K(J)}{DX}, AIO = \frac{P(I)C(I)DX}{DT}, AI = A + AK + AIO \quad (5.7)$$

Σημαντική παρατήρηση: Η εξίσωση αυτή ((5.6)) ισχύει μόνο για τους ενδιάμεσους κόμβους. Αφού το στοιχείο θεωρείται πολυστρωματικό, υπάρχουν ορισμένοι ενδιάμεσοι κόμβοι των οποίων οι γειτονικοί ανήκουν σε επόμενο στρώμα, επομένως τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά ρ_{ej} , c_{ej} , k_{ej} είναι διαφορετικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών τροποποιούνται όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω κατά την ανάλυση του κώδικα.

Στη σχέση (5.2) η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα στο πρόγραμμα συμβολίζεται με TOE και ο συντελεστής συναγωγής στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους συμβολίζεται με HO, ενώ η θερμοροή που εισέρχεται ή εξέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον στο χώρο γράφεται ως διαφορά θερμοκρασίας του πρώτου κόμβου του πρώτου στρώματος και του δεύτερου κόμβου του πρώτου στρώματος, πολλαπλασιασμένη επί τον συντελεστή αγωγής του συγκεκριμένου στρώματος K(1) και διαιρεμένη δια το χωρικό βήμα DX, δηλαδή:

$$\frac{K(1)}{DX} [TP(1,1) - TP(2,1)] = HO[TOE - TP(1,1)] \quad (5.8)$$

Στη σχέση (5.3) ομοίως, με TIO στο πρόγραμμα εκφράζεται η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα και με HI ο συντελεστής συναγωγής στην εσωτερική επιφάνεια του στοιχείου του κελύφους, ενώ η θερμοροή που εισέρχεται ή εξέρχεται από τον εσωτερικό χώρο γράφεται ως διαφορά της θερμοκρασίας του τελευταίου κόμβου του τελευταίου στρώματος και του προτελευταίου κόμβου του τελευταίου στρώματος (υπενθυμίζεται πως η αρίθμηση των κόμβων γίνεται από έξω προς τα μέσα)

πολλαπλασιασμένη επί τον συντελεστή αγωγής του συγκεκριμένου στρώματος $K(NUM)$ και διαιρεμένη δια το χωρικό βήμα DX :

$$\frac{K(NUM)}{DX} [TP(N(NUM), NUM) - TP(N(NUM) - 1, NUM)] = HI[TITO - TP(N(NUM), NUM)] \quad (5.9)$$

Στην αρχική συνθήκη (5.4) προκειμένου να επαληθεύεται η αρχική συνθήκη μέσα στον κώδικα τίθεται η θερμοκρασία σε όλους τους κόμβους των στρωμάτων κατά τη χρονική στιγμή $t=0$ ίση με μια δοθείσα θερμοκρασία, δηλαδή θεωρείται ομοιόμορφο θερμοκρασιακό πεδίο κατά την αρχή του φαινομένου της μεταβατικής αγωγής θερμότητας.

Τέλος, επισημαίνεται ότι στον ισολογισμό θερμικής ενέργειας (5.5) η θερμοροή των παραθύρων εκφράζεται ως $U(T_o(t) - T_{NEW})A_{WIN}$ με U την ολική θερμική διαπερατότητα σε $[W/m^2 \text{ } ^\circ C]$, T_{NEW} η νέα θερμοκρασία εσωτερικού χώρου και A_{WIN} το συνολικό εμβαδό των τεσσάρων παραθύρων $[m^2]$. Η θερμοροή κάθε τοίχου εκφράζεται ως $HI(TP - T_{NEW})A_w$ με HI το συντελεστή συναγωγής και A_w το εμβαδό του τοίχου (χωρίς το παράθυρο).

Βάσει όλων των παραπάνω σχέσεων και με δεδομένο το αρχικό θερμοκρασιακό πεδίο των στοιχείων του κελύφους (οροφή, πλαινά τοιχώματα) μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταβολή της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα καθώς και την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στο φαινόμενο της μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας, τη θερμική συμπεριφορά των δομικών υλικών και τελικά να μελετήσουμε τη βέλτιστη δυνατή σύνθεση στην τοιχοποιία ανάλογα με τις συνθήκες του εκάστοτε προβλήματος.

- **Καθορισμός υπολογιστικού πλέγματος στο εξεταζόμενο πρόβλημα**

Η μεταβατική αγωγή θερμότητας που μελετάται στην παρούσα εργασία θεωρείται μονοδιάστατη. Εφόσον στο συγκεκριμένο πρόβλημα μελετώνται διαφορετικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους (τέσσερις προσανατολισμένοι τοίχοι και οροφή) είναι επόμενο το υπολογιστικό πλέγμα καθενός να διαφέρει. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρείται ωστόσο ίδιο σταθερό χωρικό βήμα $DX=0.001m$. Ο συνολικός αριθμός των κόμβων κάθε στοιχείου προκύπτει αν διαιρεθεί το πάχος $L[m]$ του κάθε στρώματος του εκάστοτε στοιχείου δια του χωρικού βήματος DX , επομένως τα στρώματα που αποτελούν το εκάστοτε τοίχωμα χωρίζονται σε $N(NUM)=L/DX$ κόμβους. Ο συνολικός αριθμός κόμβων των στρωμάτων που αποτελούν το στοιχείο θα είναι

$$N = \sum_1^{NUM} N(NUM). \text{ Όπως ειπώθηκε νωρίτερα, η αρίθμηση των κόμβων γίνεται από}$$

έξω προς τα μέσα, με τον κόμβο 1 σε επαφή με τον αέρα εξωτερικού περιβάλλοντος, και είναι ενιαία. Το πρώτο στρώμα όλων των στοιχείων έχει αριθμό κόμβων $N(1)=(L/DX)+1$.

Το χρονικό βήμα προκαθορίζεται και παραμένει σταθερό ώστε να δίνει μια σχετικά καλή ακρίβεια στον υπολογισμό των θερμοκρασιών σε ένα εικοσιτετράωρο και ο χρόνος υπολογισμού να είναι μέσα στα λογικά πλαίσια. Στο παρόν πρόβλημα το χρονικό βήμα λαμβάνεται ίσο με $DT=6sec$ και το πρόγραμμα τρέχει για ένα

εικοσιτετράωρο ώστε να παρατηρείται η μεταβολή θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου για μια τυπική καλοκαιρινή και μια τυπική χειμερινή ημέρα. Το χωρικό και το χρονικό βήμα καθώς και ο συνολικός χρόνος που θα τρέξει το πρόγραμμα μπορούν πολύ εύκολα να αλλαχθούν και να προσαρμοστούν στις ανάγκες οποιοδήποτε προβλήματος.

5.3 Περιγραφή κτιριακού κελύφους του προβλήματος

Το κτιρικό κέλυφος στο οποίο γίνεται η εφαρμογή του υλικού αλλαγής φάσης PCM στο παρόν πρόβλημα θεωρείται δεδομένων διαστάσεων 10x10x3. Το κτίριο θεωρείται εκτεθειμένο από όλες τις μεριές στο εξωτερικό περιβάλλον, καθένας από τους τέσσερις τοίχους είναι προσανατολισμένος προς βορράν, νότο, ανατολή και δύση αντίστοιχα ενώ θεωρείται κενό, χωρίς εσωτερικούς τοίχους και επίπλωση. Κάθε τοίχος θεωρείται ότι φέρει ένα παράθυρο το οποίο καταλαμβάνει περίπου το 15% της συνολικής επιφάνειας του τοίχου.

Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση τοποθέτησης του στρώματος μονώσεως (απλής ή PCM) στο τρίτο από έξω στρώμα των στοιχείων. Για την επιλογή κατάλληλου PCM, θεωρείται στοιχειώδης δομή τοίχου που αποτελείται από ένα στρώμα 0.020m επίχρισμα, ένα στρώμα τούβλα 0.090m, ένα στρώμα μόνωσης (για την περίπτωση συμβατικού κτιρίου) ή ένα στρώμα PCM (για την περίπτωση κτιρίου με PCM) 0.020m και τέλος ένα ακόμα στρώμα επιχρίσματος 0.020m (από έξω προς τα μέσα). Στην οροφή το μόνο στρώμα που θεωρείται διαφορετικό είναι εκείνο του τούβλου το οποίο αντικαθίσταται από ένα στρώμα σπλισμένου σκυροδέματος 0.070m. Μελετάται η θερμική συμπεριφορά των στοιχείων για μια τυπική καλοκαιρινή (21^η Ιουλίου) και μια τυπική χειμερινή (21^η Φεβρουαρίου) ημέρα. Μετά την επιλογή καταλληλότερου PCM για χειμώνα και καλοκαίρι, γίνεται εφαρμογή του και σε διαφορετική σύνθεση τοίχου (με το στρώμα μόνωσης να είναι το δεύτερο από έξω και περίπτωση διπλού τοίχου, δηλαδή με δυο στρώματα τούβλου, καθώς τεχνικά η προσαρμογή επιχρίσματος απευθείας στη μόνωση ή το PCM δεν είναι ιδιαίτερος σταθερή, μελετάται η συμπεριφορά του με εσωτερικό φορτίο στο χώρο και γίνεται σύγκρισή του με μια αντίστοιχη απλή μόνωση). Τονίζεται ότι για τις περιπτώσεις τοποθέτησης του στρώματος μόνωσης σε άλλο σημείο του τοίχου, ο κώδικας είναι ακριβώς ο ίδιος όπως περιγράφεται παρακάτω, απλά αλλάζουν τα δεδομένα που δίνουμε κατά την εκτέλεσή του

Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των υλικών κάθε στρώματος, όπως προκύπτουν από τη βιβλιογραφία[58], παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω:

ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΠΛΑΪΝΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ:

	ΕΠΙΧΡΙΣΜΑ(σοβάς)	ΤΟΥΒΛΟ	ΜΟΝΩΣΗ
Πάχος[m]	0.020	0.090	0.020
Πυκνότητα[kg/m³]	1860	1920	32
Θερμοχωρητικότητα[J/kgK]	835	840	840
Ειδικήθερμικήαγωγιμότητα[W/mK]	1.2	0.72	0.038

ΟΡΟΦΗ:

	ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
Πάχος[m]	0.070
Πυκνότητα[kg/m ³]	2300
Θερμοχωρητικότητα[J/kgK]	880
Ειδικήθερμικήαγωγιμότητα[W/mK]	2.2

Επισημαίνεται πως το επίχρισμα χρησιμοποιείται για λόγους στεγανότητας αλλά και αισθητικής ενώ το τούβλο και το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούν το βασικό δομικό στοιχείο του τοίχου και του σκελετού ενός κτιρίου αντίστοιχα. Η θερμομόνωση δημιουργεί συνθήκες θερμικής άνεσης για κατοικία, μειώνει το κόστος της θέρμανσης, προστατεύει από την υγρασία ενώ παράλληλα λειτουργεί και ως ηχομόνωση.

PCM:

Στο πρόγραμμα χρησιμοποιούνται θεωρητικά υλικά αλλαγής φάσης, ωστόσο οι ιδιότητές τους ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες θεωρούνται σταθερές[52], πλὴν της θερμοχωρητικότητας η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία και ιδιαίτερα στη διφασική περιοχή. Τα PCMs που εξετάζουμε έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες τήξεως και θα επιλεγεί το καταλληλότερο. Η μεταβολή της θερμοχωρητικότητας του PCM βάσει των K.Darka και P.Callagan[52],

προσεγγίζεται από τη σχέση:
$$C_{eff} = C_s + a \exp[-0.5(\frac{T - T_m}{b})^2] \quad (5.10)$$

με: C_s τη θερμοχωρητικότητα αισθητής θερμότητας[J/kgK], a :την ολική λανθάνουσα θερμότητα[kJ/kg], T_m τη θερμοκρασία τήξεως του PCM[°C], T τη θερμοκρασία του PCM[°C] και b : το θερμοκρασιακό πλάτος μετάβασης του PCM από μια ζώνη στην άλλη[°C].

Παρατηρούμε πως η λανθάνουσα θερμότητα [kJ/kg] στην παραπάνω σχέση αντιμετωπίζεται ως η λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα [kJ/kgK]. Σε ό,τι αφορά στις μονάδες αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί αν σκεφτούμε πως η λανθάνουσα θερμότητα χαρακτηρίζεται από ισοθερμοκρασιακή μεταβολή. Στη σχέση (5.10) η λανθάνουσα θερμοχωρητικότητα του PCM προστίθεται στην αισθητή θερμοχωρητικότητά του και προκύπτει η ολική θερμοχωρητικότητα του PCM. Από τη σχέση (5.10) παρατηρούμε ακόμη πως όταν η θερμοκρασία του PCM απέχει από τη θερμοκρασία τήξης του ($T \gg T_m$ ή $T \ll T_m$) τότε ο όρος της λανθάνουσας θερμοχωρητικότητας μηδενίζεται και η ολική του θερμοχωρητικότητα είναι ίση με την αισθητή θερμοχωρητικότητα.

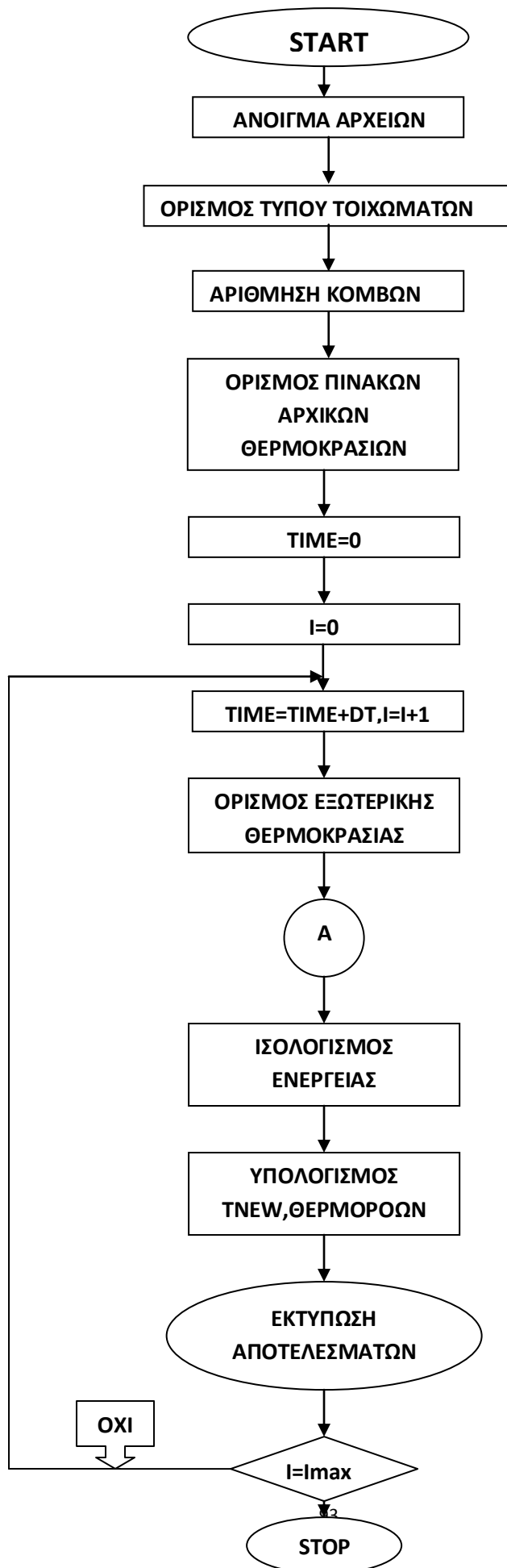
Επομένως, ο όρος της λανθάνουσας θερμοχωρητικότητας συμμετέχει μόνο όταν η T του PCM πλησιάζει την T_m .

	PCM
Πάχος [m]	0.020
Πυκνότητα [kg/m ³] στην υγρή και τη στερεή φάση	900
Θερμοχωρητικότητα αισθητής θερμότητας C_s [J/kgK]	1600
Ειδικήθερμικήαγωγιμότητα [W/mK]	0.15
Λανθάνουσα θερμότητα a [Kj/kg]	100
Θερμοκρασιακό πλάτος μετάβασης από τη μια ζώνη στην άλλη b [°C]	0.7

5.4 Επεξήγηση μεταβλητών που εμφανίζονται στο πρόγραμμα.

NUM	Πλήθος στρωμάτων πλαινών τοιχωμάτων
NUMH	Πλήθος στρωμάτων οροφής
NPCM	Στρώμα PCM
N(1)	Αριθμός κόμβων του πρώτου στρώματος πλαινών τοιχωμάτων
NH(1)	Αριθμός κόμβων του πρώτου στρώματος οροφής
XL	Απόσταση του κάθε κόμβου από τον πρώτο κόμβο του στρώματος
DX	Χωρικό βήμα [m]
DT	Χρονικό βήμα [sec]
TP	Θερμοκρασία κόμβου P [°C]
TPO	Αρχική τιμή θερμοκρασίας των πλαινών τοιχωμάτων [°C]
TITO	Αρχική εσωτερική θερμοκρασία του κελύφους για t=0 [°C]
TOE	Θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος [°C]
Tm	Θερμοκρασία τήξης του PCM [°C]
TE	Θερμοκρασία ηλίου-αέρος(ισοδύναμη θερμοκρασία) [°C]
IT	Προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία [W/m ²]
IDN	Άμεση ηλιακή ακτινοβολία καθέτου επιπέδου [W/m ²]
L,LH	Πάχος εκάστοτε στρώματος πλαινών τοιχωμάτων, οροφής [m]
P,PH	Πυκνότητα εκάστοτε στρώματος πλαινών τοιχωμάτων, οροφής [kg/m ³]
K,KH	Ειδική θερμική αγωγιμότητα εκάστοτε στρώματος πλαινών τοιχωμάτων, οροφής [W/mK]
C,CH	Ειδική θερμοχωρητικότητα εκάστοτε στρώματος πλαινών τοιχωμάτων, οροφής [J/kgK]
HO	Συντελεστής συναγωγιμότητας κελύφους και εξωτερικού περιβάλλοντος [W/m ² K]
HI	Συντελεστής συναγωγιμότητας κελύφους και εσωτερικού περιβάλλοντος [W/m ² K]
PIK	Σταθερά π=3.1415
U	Θερμική διαπερατότητα παραθύρων [W/m ² K]
PA	Πυκνότητα αέρα (εσωτερικού περιβάλλοντος) [kg/m ³]
CA	Συντελεστής ειδικής θερμοχωρητικότητας αέρα(εσωτερικού περιβάλλοντος) [J/kgK]
VA	Όγκος περικλειόμενου αέρα [m ³]
EMBADO1	Μήκος επί ύψος εξεταζόμενου κτιρίου επί 0.85(85% της επιφάνειας τοίχου καθαρό τοίχωμα) [m ²]
EMBADO2	Πλάτος επί ύψος εξεταζόμενου κτιρίου επί 0.85 [m ²]
AW1,AW2	EMBADO1,EMBADO2
AWIN	Ολικό εμβαδό παραθύρων(όλων),καθένα από τα οποία αποτελεί το 15% της συνολικής επιφάνειας του τοίχου.
MHKOS	Μήκος εξεταζόμενου κτιρίου [m]
PLATOS	Πλάτος εξεταζόμενου κτιρίου [m]
H	Ύψος εξεταζόμενου κτιρίου [m]
Cpcm	Ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM(μεταβαλλόμενη με τη θερμοκρασία) [J/kgK]

5.5 Λογικό διάγραμμα του κώδικα



5.6 Αναλυτική παρουσίαση του κώδικα

Στην αρχή του κώδικα, ορίζεται το είδος κάθε μεταβλητής και οι πίνακες αναλόγων διαστάσεων οι οποίοι θα τις συμπεριλάβουν, δηλαδή ο απαιτούμενος χώρος μνήμης για την καταγραφή των τιμών τους. Στη συνέχεια γίνεται άνοιγμα κατάλληλων αρχείων για την καταγραφή των αποτελεσμάτων και την περαιτέρω επεξεργασία τους.

PROGRAM ECOBUILD

```
INTEGER NUM,NPCM,NUMH,NPCMH  
PARAMETER R=450,Y=5  
REAL *8,DIMENSION(Y)::L,P,K,C,LH,PH,KH,CH  
REAL *8,DIMENSION(R,Y)::T,TOT,TP,TPO,XL1,XL2,XL3,XL4,DIAF1,DIAF2,  
,DIAF3,DIAF4,XLH,TH,TOH,TPH,DIAFH,TP1,TP2,TP3,TP4,TPO1,TPO2,TPO3,  
,TPO4,T1,T2,T3,T4  
REAL *8,DIMENSION(R)::Cpcm,Cpcmh  
DIMENSION N1(Y),N2(Y),N3(Y),N4(Y),NH(Y)  
DOUBLE PRECISION TITO,TOE,TE1,TE2,TE3,TE4,IT1,IT2,IT3,IT4,  
,ITH,TEH,TW1,TW2,Z1,Z2,Z3,Z4,AW1,AW2,AWIN,TNEW,ZH  
REAL *8 MHKOS,PLATOS,H,VA,EMBADO,AC  
  
OPEN(12,FILE='OUTCELL.TXT')  
OPEN(13,FILE='TOE.TXT')  
OPEN(16,FILE='TNEW.TXT')  
OPEN(21,FILE='WRIAIA.TXT')  
OPEN(22,FILE='WRIAIAATNEW.TXT')  
OPEN(23,FILE='WRIAIAATOE.TXT')  
OPEN(24,FILE='XN.TXT')  
OPEN(25,FILE='WRIAIAATNEW1.ASCII')  
OPEN(26,FILE='WRIAIAATOE1.ASCII')  
REWIND(12)  
REWIND(13)  
REWIND(16)  
REWIND(21)  
REWIND(22)  
REWIND(23)  
REWIND(24)  
REWIND(25)  
REWIND(26)
```

Εν συνεχεία, εισάγονται μέσω του πληκτρολογίου τα δεδομένα που αφορούν στα είδη των τοιχωμάτων και στα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των υλικών των στοιχείων του κτιριακού κελύφους. Για κάθε στοιχείο (τοίχος ή οροφή) δίνεται ο αριθμός των στρωμάτων που το αποτελούν (NUM και NUMH αντίστοιχα) και ο αριθμός του στρώματος του PCM(N(PCM)). Για κάθε στρώμα δίνονται τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά του υλικού από το οποίο αποτελείται, δηλαδή το πάχος L, η πυκνότητα P, η θερμική αγωγιμότητα K και η ειδική θερμοχωρητικότητα C. Η ειδική

θερμοχωρητικότητα του PCM δε δίνεται από το πληκτρολόγιο αλλά υπολογίζεται μέσα στο πρόγραμμα όπως θα φανεί παρακάτω. Στο σημείο αυτό υπολογίζεται ακόμη ο αριθμός των κόμβων του κάθε στρώματος. Κάθε στρώμα έχει τη δική του αρίθμηση για την ανεξάρτητη μελέτη του. Η αρίθμηση γίνεται από έξω προς τα μέσα. Το πρώτο στρώμα τόσο των εξωτερικών τοίχων όσο και της οροφής έχει αριθμό κόμβων $N(1)=NH(1)=(L/DX)+1$. Ο πρώτος κόμβος του πρώτου στρώματος του κάθε στοιχείου έρχεται σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα και ο τελευταίος κόμβος του τελευταίου στρώματος έρχεται σε επαφή με τον εσωτερικό αέρα. Ζητείται επίσης ο προσδιορισμός των διαστάσεων του κτιρίου (μήκος, πλάτος, ύψος).

C EISAGWGH DEDOMENWN

```

WRITE(*,*)'DWSE ARI8MO STRWMATWN POU SUN8ETOUN TON TOIXO'
READ(*,*)NUM
WRITE(*,*)'POIO STRWMA PCM?DWSE ARI8MO'
READ(*,*)NPCM
WRITE(*,*)'NUM=',NUM, 'NPCM=',NPCM
WRITE(*,*) 'DWSE PAXOS L KA8E STRWMATOS'
WRITE(*,*)'KAI TA XARAKTHRISTIKA P,K,C ANTISTOIXA'
WRITE(*,*)'GIA TO STRWMA ME PCM DWSE THN EIDIKH 8ERMIKH
IKANOTHHTA'
WRITE(*,*)'ISH ME MHDEN C(NPCM)=0'
DO 1 J=1,NUM
READ(*,*)L(J),P(J),K(J),C(J)
WRITE(*,*)L(J),P(J),K(J),C(J)
1 CONTINUE

WRITE(*,*)'DWSE ARI8MO STRWMATWN POU SUN8ETOUN THN OROFH'
READ(*,*)NUMH
WRITE(*,*)'POIO STRWMA PCM?DWSE ARI8MO'
READ(*,*)NPCMH
WRITE(*,*)'DWSE TO PAXOS LH KA8E STRWMATOS'
WRITE(*,*) 'KAI TA XARAKTHRISTIKA PH,KH,CH ANTISTOIXA'
WRITE(*,*)'GIA TO STRWMA PCM DWSE THN EIDIKH 8ERMIKH
IKANOTHHTA'
WRITE(*,*)'ISH ME MHDEN CH(NPCMH)=0'
WRITE(12,*)'C(1)=' ,C(1), 'C(NPCM)=' ,C(NPCM), 'CH(1)=' ,CH(1)

DO 11 J=1,NUMH
READ(*,*)LH(J),PH(J),KH(J),CH(J)
WRITE(*,*)LH(J),PH(J),KH(J),CH(J)

```

11 CONTINUE

DX=0.001

N1=NINT(L/DX)

N2=NINT(L/DX)

N3=NINT(L/DX)

N4=NINT(L/DX)

NH=NINT(LH/DX)

WRITE(*,*)'DWSE MHKOS,PLATOS,UPSOS KTIRIOU'

READ(*,*)MHKOS,PLATOS,H

PA=1.1614

CA=1007

AC=(MHKOS*PLATOS)

VA=AC*H

EMBADO1=H*MHKOS*0.85

EMBADO2=H*PLATOS*0.85

AW1=EMBADO1

AW2=EMBADO2

AWIN=2*H*(MHKOS+PLATOS)*0.15

U=4.6

Έπειτα, ορίζεται μια αρχική θερμοκρασία(για $t=0$) των στοιχείων του κελύφους, ενώ τίθεται αυθαίρετα η θερμοκρασιακή κατανομή τους μετά το πρώτο χρονικό βήμα ($t=t+DT$). Η γνώση της αρχικής θερμοκρασίας των στοιχείων του κελύφους (πίνακες TPO,TOH) και της θερμοκρασιακής τους κατανομής την επόμενη χρονική στιγμή (πίνακες TP,TPH) είναι απαραίτητη για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών με την επαναληπτική μέθοδο. Στο σημείο αυτό του κώδικα αποδίδεται σε κάθε κόμβο κάθε τοίχου και της οροφής η αντίστοιχη τιμή του πάχους του (XL) μετρούμενη από την εξωτερική επιφάνεια. Επισημαίνεται πως κάθε τοίχος (από τους πλαϊνούς εξωτερικούς) αρχίζει από εδώ και έπειτα να αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστό στοιχείο ανάλογα με τον προσανατολισμό του (βόρειος, νότιος, ανατολικός και δυτικός) για λόγους που θα εξηγηθούν στη συνέχεια.

C APODOSH PAXOUS XL SE KA8E KOMBO

C EKSWTERIKOI TOIXOI

C BOREIOS

XL1(1,1)=0.0

PREV1=XL1(1,1)

N1(1)=N1(1)+1

DO 2 J=1,NUM

IF(J.EQ.1)THEN

IM=2


```
JM=N1(1)
ELSE
IM=1
JM=N1(J)
ENDIF
DO 3 I=IM,JM
XL1(I,J)=PREV1+DX
PREV1=XL1(I,J)
```

```
3 CONTINUE
2 CONTINUE
```

C NOTIOS

```
XL2(1,1)=0.0
PREV2=XL2(1,1)
N2(1)=N2(1)+1

DO 21 J=1,NUM
IF(J.EQ.1)THEN
IM=2
JM=N2(1)
ELSE
IM=1
JM=N2(J)
ENDIF
DO 31 I=IM,JM
XL2(I,J)=PREV2+DX
PREV2=XL2(I,J)
```

```
31 CONTINUE
21 CONTINUE
```

C ANATOLIKOS

```
XL3(1,1)=0.0
PREV3=XL3(1,1)
N3(1)=N3(1)+1

DO 22 J=1,NUM
IF(J.EQ.1)THEN
IM=2
JM=N3(1)
ELSE
IM=1
JM=N3(J)
ENDIF
DO 32 I=IM,JM
XL3(I,J)=PREV3+DX
PREV3=XL3(I,J)
```

32 CONTINUE
22 CONTINUE

C DUTIKOS

```
XL4(1,1)=0.0
PREV4=XL4(1,1)
N4(1)=N4(1)+1

DO 23 J=1,NUM
  IF(J.EQ.1)THEN
    IM=2
    JM=N4(1)
  ELSE
    IM=1
    JM=N4(J)
  ENDIF
  DO 33 I=IM,JM
    XL4(I,J)=PREV4+DX
    PREV4=XL4(I,J)
```

33 CONTINUE
23 CONTINUE

C OROFH

```
XLH(1,1)=0.0
PREVH=XLH(1,1)
NH(1)=NH(1)+1

DO 12 J=1,NUMH
  IF(J.EQ.1)THEN
    IM=2
    JM=NH(1)
  ELSE
    IM=1
    JM=NH(J)
  ENDIF
  DO 13 I=IM,JM
    XLH(I,J)=PREVH+DX
    PREVH=XLH(I,J)
```

13 CONTINUE
12 CONTINUE

C ORISMOS PINAKWN ARXIKWN 8ERMOKRASIWN

TITO=24

C BOREIOS

DO 4 J=1,NUM
DO 6 I=1,N1(J)
T1(I,J)=25
TPO1(I,J)=TITO
TP1(I,J)=T1(I,J)
6 CONTINUE
4 CONTINUE

C NOTIOS

DO 140 J=1,NUM
DO 60 I=1,N2(J)
T2(I,J)=25
TPO2(I,J)=TITO
TP2(I,J)=T2(I,J)
60 CONTINUE
140 CONTINUE

C ANATOLIKOS

DO 150 J=1,NUM
DO 62 I=1,N3(J)
T3(I,J)=25
TPO3(I,J)=TITO
TP3(I,J)=T3(I,J)
62 CONTINUE
150 CONTINUE

C DUTIKOS

DO 42 J=1,NUM
DO 65 I=1,N4(J)
T4(I,J)=25
TPO4(I,J)=TITO
TP4(I,J)=T4(I,J)
65 CONTINUE
42 CONTINUE

C OROFH

DO 14 J=1,NUMH
DO 16 I=1,NH(J)
TH(I,J)=25
TOH(I,J)=TITO
TPH(I,J)=TH(I,J)
16 CONTINUE
14 CONTINUE

HO=16
HI=8
PIK=3.1415
TIME=0
KCOUNT=0
DT=6

Η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος (TOE °C) για τον μήνα Ιούλιο με μέση θερμοκρασία 28.08°C προσεγγίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$TOE = 28.08 + 10 \cos\left(\frac{2\pi \frac{t}{3600} - 15}{24}\right), \text{ όπου } t \text{ σε ώρες. (5.11)}$$

Αντίστοιχα, για το μήνα Φεβρουάριο με μέση θερμοκρασία 5°C, προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$TOE = 5 + 5 \cos\left(\frac{2\pi \frac{t}{3600} - 15}{24}\right), \text{ όπου } t \text{ σε ώρες. (5.12)}$$

Κάθε τοίχος έχει διαφορετικό προσανατολισμό. Σύμφωνα με την υπόθεσή μας το κτίριο περιλαμβάνει ένα βόρειο, ένα νότιο, έναν ανατολικό και ένα δυτικό τοίχο. Ο λόγος που κάθε τοίχος μελετάται ξεχωριστά και λαμβάνεται υπόψιν ο προσανατολισμός του είναι ότι η θερμοκρασία κάθε εξωτερικής επιφάνειας δεν είναι η ίδια με αυτή του εξωτερικού αέρα (TOE), αλλά λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και τελικά η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι η λεγόμενη *θερμοκρασία ηλίου-αέρος ή ισοδύναμη θερμοκρασία* [55],[59].

Σύμφωνα με τον ορισμό της, θερμοκρασία ηλίου-αέρος ή ισοδύναμη θερμοκρασία t_e (στο πρόγραμμα TE) είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρος η οποία σε απουσία όλων των θερμικών συναλλαγών δια ακτινοβολίας δίδει σε μια επιφάνεια την ίδια εισερχόμενη θερμότητα με αυτή που προκύπτει με τον πραγματικό συνδυασμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, με τη συναλλαγή θερμότητας δια ακτινοβολίας με τον ουρανό και τα πέριξ και με τη συναλλαγή δια συναγωγής με τον εξωτερικό αέρα. Η σχέση με την οποία αποδίδεται είναι η:

$$t_e = t_0 + \frac{aI_t}{h_0} - \frac{\varepsilon\Delta R}{h_0}, \quad (5.13)$$

με:

- $\varepsilon\Delta R/h_0=3.9^\circ\text{C}$ για οριζόντια επιφάνεια (δηλαδή για οροφή) και 0°C για κατακόρυφη επιφάνεια (δηλαδή για πλαινό εξωτερικό τοίχωμα)
- $aI_t/h_0=0.026$ για ανοιχτόχρωμες και 0.052 για σκούρες επιφάνειες (στο παρόν πρόβλημα θεωρήσαμε ανοιχτόχρωμες επιφάνειες)
- t_0 η θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος (TOE)
- I_t η προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2]

Η προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία I_t υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_t = I_{DN} \cos\theta + I_d + I_r, \quad (5.14)$$

με: I_{DN} την άμεση ηλιακή ακτινοβολία κάθετου επιπέδου, δηλαδή την ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες, $[W/m^2]$

θ τη γωνία πρόσπτωσης της αμέσου ακτινοβολίας δηλαδή τη γωνία μεταξύ προσπίπτουσών ηλιακών ακτίνων σε μια επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια

I_d η διάχυτος εξ ουρανού ηλιακή ακτινοβολία, $[W/m^2]$

I_r η ηλιακή ακτινοβολία εξ ανακλάσεως σε γειτονικές επιφάνειες. Στο παρόν πρόβλημα το I_r θεωρείται αμελητέο.

Το $\cos\theta$ λαμβάνεται ίσο με $\sin\beta$ για οριζόντιες επιφάνειες (δηλαδή για οροφή) και ίσο με $\cos\beta\cos\gamma$ για τις κατακόρυφες επιφάνειες δηλαδή τα εξωτερικά πλαινά τοιχώματα, όπου β το ηλιακό ύψος και γ το αζιμούθιο ηλίου-επιφανείας. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [55]:

$$\cos\theta = -\sin\delta\cos\varphi\cos\omega + \cos\delta\sin\varphi\cos\omega\cos\omega, (5.15)$$

με $\delta=20,6^\circ$ για την 21^η Ιουλίου και $\delta=11,226^\circ$ για την 21^η Φεβρουαρίου, $\varphi=37,97^\circ$ για την περιοχή των Αθηνών (βόρειο γεωγραφικό πλάτος), $\omega=0.25x \min$ (από το ηλιακό μεσημέρι) και αζιμούθιο $\gamma=0^\circ$ για νότο, $\gamma=180^\circ$ για βορρά, $\gamma=-90^\circ$ για ανατολή και $\gamma=90^\circ$ για δύση. Από τη βιβλιογραφία[55], δίνεται η σχέση για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία I_{DN} :

$$I_{DN} = A/\exp(B/\sin\beta), (5.16) \text{ και}$$

$$\sin\beta = \cos\varphi\cos\delta\cos\omega + \sin\varphi\sin\delta, (5.17)$$

ενώ οι συντελεστές A και B λαμβάνονται από την ίδια βιβλιογραφία και εξαρτώνται από τη μέρα του έτους η οποία μελετάται.

$$\text{Τέλος, } I_d = C I_{DN} F_{ss}, (5.18),$$

με C συντελεστή που λαμβάνεται όπως οι A και B από τη βιβλιογραφία[55], και F_{ss} παράγων όρασης κεκλιμένου επιπέδου ίσο με $\frac{1}{2}$ για πλαινό τοίχωμα (κατακόρυφη επιφάνεια) και 1 για οροφή(οριζόντια επιφάνεια).

Επομένως από τα παραπάνω, και για για τον καλοκαιρινό μήνα Ιούλιο (συγκεκριμένα για την 21^η Ιουλίου) καταλήγουμε στις εξής σχέσεις:

$$I_{DN} = 0.9956 * \text{EXP}(- (0.2068 / (0.738 * \cos(2.5 * DT) + 0.216))) \text{ με } DT \text{ το χρονικό βήμα}$$

Εξωτερικοί τοίχοι:

$$t_e = t_0 + 0.26 * I_t$$

Οροφή:

$$t_e = t_0 + 0.26 * I_t - 3.9$$

ενώ το I_t υπολογίζεται για κάθε τοίχο από τις παραπάνω σχέσεις. Ομοίως για την 21^η Φεβρουαρίου που μελετάται στο πρόγραμμα. Το χρονικό βήμα που εισέρχεται στο πρόγραμμα είναι 6sec και το πρόγραμμα τρέχει για 24 ώρες.

DO 500 I=1,14400

TIME=TIME+DT

KCOUNT=KCOUNT+1

TOE=28.08+10*COS(2*PIK*(TIME/3600-15)/24)

IDN=0.9956*EXP(-(0.2068/(0.738*COS(2.5*DT)+0.216)))

Για το χειμώνα, διατυπώνεται η αντίστοιχη σχέση της TOE που αναφέρθηκε παραπάνω.

Ο μετρητής του κυρίως βρόγχου ξεκινά από το 1 και φτάνει τις 14400 επαναλήψεις για να καλύψει ένα 24ωρο και να μας δώσει αποτελέσματα.

Μέσα στον κυρίως βρόγχο του προγράμματος, περικλείονται πέντε εσωτερικοί βρόχοι που υπολογίζουν με επαναληπτική διαδικασία τις θερμοκρασίες στους κόμβους των εξωτερικών τοιχωμάτων και της οροφής αντίστοιχα. Οι βρόχοι είναι όμοιοι μεταξύ τους απλά αναφέρονται σε διαφορετικά στοιχεία.

Στους εσωτερικούς αυτούς βρόγχους συμβαίνουν τα εξής:

Πρώτα αναγράφεται η οριακή συνθήκη του πρώτου κόμβου, έπειτα καλείται η υπορουτίνα SUB1, ακολουθεί η οριακή συνθήκη του τελευταίου κόμβου και τέλος καλείται η υπορουτίνα MAX1.

Στην υπορουτίνα SUB1 γίνεται ο υπολογισμός των θερμοκρασιών TP των ενδιάμεσων κόμβων του στοιχείου με την επίλυση των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών. Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, υπάρχουν μερικοί κόμβοι των οποίων οι γειτονικοί κόμβοι ανήκουν σε διαφορετικό στρώμα, άρα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ρ,k,c. Σε αυτές τις περιπτώσεις διαφοροποιούνται οι εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών και συγκεκριμένα οι εξισώσεις των πρώτων κόμβων όλων των στρωμάτων εκτός του πρώτου στρώματος έχουν τη μορφή:

$$TP(I,J) = \frac{A}{AI} TP(N2, J-1) + \frac{AK}{AI} TP(I+1, J) + \frac{AIO}{AI} TO(I, J), (5.19)$$

με TP(N2,J-1) η θερμοκρασία του τελευταίου κόμβου του προηγούμενου στρώματος και ο συντελεστής A αναφέρεται αντίστοιχα στο προηγούμενο στρώμα $A=K(J-1)/DX$.

Οι εξισώσεις των τελευταίων κόμβων όλων των στρωμάτων εκτός του τελευταίου στρώματος παίρνουν τη μορφή:

$$TP(I,J) = \frac{A}{AI} TP(I-1, J) + \frac{AK}{AI} TP(1, J) + \frac{AIO}{AI} TO(I, J), (5.20)$$

με TP(1,J) η θερμοκρασία του πρώτου κόμβου του επόμενου στρώματος και ο συντελεστής AK αναφέρεται στο επόμενο στρώμα $AK=K(J+1)/DX$.

Επίσης, στο στρώμα του PCM, υπολογίζεται η ειδική του θερμοχωρητικότητα από τη σχέση(5.10) όπως αυτή εισάγεται στο πρόγραμμα:

$$Cp_{cm}(I)=1600.0+100000.0*EXP(-1.02*(TOI(I,J)-Tm)**2)$$

με: TOI(I,J) τη θερμοκρασία του κόμβου την προηγούμενη χρονική στιγμή. Τέλος, η SUB1 επιστρέφει στο πρόγραμμα τις τιμές των θερμοκρασιών των ενδιάμεσων κόμβων.

Εν συνεχεία, καλείται η υπορουτίνα MAX1 στην οποία γίνεται έλεγχος κατά πόσο συγκλίνουν ή όχι οι τιμές των θερμοκρασιών. Υπολογίζεται πρώτα η μέγιστη απόλυτη διαφορά Z, που προκύπτει αν αφαιρεθεί από κάθε θερμοκρασία η αντίστοιχη που τέθηκε αυθαίρετα. Έπειτα, η υπορουτίνα επιστρέφει στο πρόγραμμα την τιμή της μέγιστης απόλυτης διαφοράς. Αν το Z είναι μικρότερο του 10^{-6} τότε έχει επιτευχθεί σύγκλιση και επομένως τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή η θερμοκρασιακή κατανομή του στοιχείου είναι η παραπάνω υπολογισθείσα. Οι υπολογισθείσες τιμές των θερμοκρασιών τίθενται τότε ως ΤΟ αρχικές τιμές για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού πεδίου την επόμενη χρονική στιγμή. Αν το Z είναι μεγαλύτερο του 10^{-6} δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση και συνεχίζεται η επαναληπτική διαδικασία μέχρι σύγκλισης. Στην περίπτωση αυτή για να υπολογιστούν οι νέες τιμές της ίδιας χρονικής στιγμής γίνεται χρήση των πιο πρόσφατων τιμών, σύμφωνα με την επαναληπτική μέθοδο Gauss-Seidel. Όσα περιγράφηκαν παραπάνω παρατίθενται εδώ στον κώδικα, ενώ οι υπορουτίνες παρουσιάζονται στο τέλος του προγράμματος (όπως και γράφονται):

C EKSWTERIKOI TOIXOI

C BOREIOS

DO 90 LN=1,100000000

B=K(1)/DX+HO

IT1=IDN*(0.27736+0.576*COS(2.5*(TIME-43200)))+0.10687)

TE1=TOE+0.026*IT1

TP1(1,1)=(HO*TE1+K(1)/DX*TP1(2,1))/B

GN=K(NUM)/DX+HI

CALL SUB1(TP1,TPO1,NUM,NPCM,N1,K,P,C,Cpcm,DX,DT)

NVV=N1(NUM)

NVA=NVV-1

TP1(NVV,NUM)=(HI*TITO+K(NUM)/DX*TP1(NVA,NUM))/GN

CALL MAX1(Z1,DIAF1,TP1,T1,NUM,N1)

IF(Z1.LT.(0.000001))GO TO 5

T1=TP1

90 CONTINUE

5 TPO1=TP1

WRITE(*,*)'TIME=',TIME

WRITE(*,*)'TP(1,1)=' ,TP1(1,1)

```

WRITE(*,*)'TP(N(NUM),NUM)=' , TP1(NVV,NUM)
WRITE(*,*)'TP(N(NUM)-1,NUM)=' , TP1(NVA,NUM)
WRITE(12,*)'TIME=' , TIME
WRITE(12,*)'TP(N(NUM)-1,NUM)=' , TP1(NVA,NUM)
WRITE(12,*)'TP(1,1)=' , TP1(1,1)
WRITE(12,*)'TP(N(NUM),NUM)=' , TP1(NVV,NUM)
WRITE(12,*)'LN=' , LN
WRITE(12,*)'Z=' , Z1

```

C NOTIOS

```

DO 9 LK=1,100000000
  B=K(1)/DX+HO
  IT2=IDN*(-0.27736+0.576*COS(2.5*(TIME-43200)))+0.10687)
  TE2=TOE+0.026*IT2

  TP2(1,1)=(HO*TE2+K(1)/DX*TP2(2,1))/B
  GN=K(NUM)/DX+HI

  CALL SUB1(TP2,TPO2,NUM,NPCM,N2,K,P,C,Cpcm,DX,DT)

  NVV=N2(NUM)
  NVA=NVV-1
  TP2(NVV,NUM)=(HI*TITO+K(NUM)/DX*TP2(NVA,NUM))/GN

  CALL MAX1(Z2,DIAF2,TP2,T2,NUM,N2)
  IF(Z2.LT.(0.000001))GO TO 17
  T2=TP2

```

9 CONTINUE

```

17 TPO2=TP2
  WRITE(*,*)'TIME=' , TIME
  WRITE(*,*)'TP(1,1)=' , TP2(1,1)
  WRITE(*,*)'TP(N(NUM),NUM)=' , TP2(NVV,NUM)
  WRITE(*,*)'TP(N(NUM)-1,NUM)=' , TP2(NVA,NUM)
  WRITE(12,*)'TIME=' , TIME
  WRITE(12,*)'TP(N(NUM)-1,NUM)=' , TP2(NVA,NUM)
  WRITE(12,*)'TP(1,1)=' , TP2(1,1)
  WRITE(12,*)'TP(N(NUM),NUM)=' , TP2(NVV,NUM)
  WRITE(12,*)'LN=' , LN
  WRITE(12,*)'Z=' , Z2

```

C ANATOLIKOS

```

DO 67 LS=1,100000000
  B=K(1)/DX+HO
  IT3=IDN*(-0.936*SIN(2.5*(TIME-43200)))+0.10687)

```


TE3=TOE+0.026*IT3
TP3(1,1)=(HO*TE3+K(1)/DX*TP3(2,1))/B
GN=K(NUM)/DX+HI

CALL SUB1(TP3,TPO3,NUM,NPCM,N3,K,P,C,Cpcm,DX,DT)

NVV=N3(NUM)
NVA=NVV-1
TP3(NVV,NUM)=(HI*TITO+K(NUM)/DX*TP3(NVA,NUM))/GN

CALL MAX1(Z3,DIAF3,TP3,T3,NUM,N3)
IF(Z3.LT.(0.000001))GO TO 7
T3=TP3

67 CONTINUE

7 TPO3=TP3

WRITE(*,*)'TIME=',TIME
WRITE(*,*)'TP(1,1)=' ,TP3(1,1)
WRITE(*,*)'TP(N(NUM),NUM)=' ,TP3(NVV,NUM)
WRITE(*,*)'TP(N(NUM)-1,NUM)=' ,TP3(NVA,NUM)
WRITE(12,*)'TIME=',TIME
WRITE(12,*)'TP(N(NUM)-1,NUM)=' ,TP3(NVA,NUM)
WRITE(12,*)'TP(1,1)=' ,TP3(1,1)
WRITE(12,*)'TP(N(NUM),NUM)=' ,TP3(NVV,NUM)
WRITE(12,*)'LN=',LN
WRITE(12,*)'Z=' ,Z3

C DUTIKOS

DO 30 LX=1,100000000
B=K(1)/DX+HO
IT4=IDN*(0.936*SIN(2.5*(TIME-43200))+0.10687)
TE4=TOE+0.026*IT4
TP4(1,1)=(HO*TE4+K(1)/DX*TP4(2,1))/B
GN=K(NUM)/DX+HI

CALL SUB1(TP4,TPO4,NUM,NPCM,N4,K,P,C,Cpcm,DX,DT)

NVV=N4(NUM)
NVA=NVV-1
TP4(NVV,NUM)=(HI*TITO+K(NUM)/DX*TP4(NVA,NUM))/GN

CALL MAX1(Z4,DIAF4,TP4,T4,NUM,N4)
IF(Z4.LT.(0.000001))GO TO 8
T4=TP4

30 CONTINUE

8 TPO4=TP4

```
WRITE(*,*)'TIME=',TIME
WRITE(*,*)'TP(1,1)=',TP4(1,1)
WRITE(*,*)'TP(N(NUM),NUM)=',TP4(NVV,NUM)
WRITE(*,*)'TP(N(NUM)-1,NUM)=',TP4(NVA,NUM)
WRITE(12,*)'TIME=',TIME
WRITE(12,*)'TP(N(NUM)-1,NUM)=',TP4(NVA,NUM)
WRITE(12,*)'TP(1,1)=',TP4(1,1)
WRITE(12,*)'TP(N(NUM),NUM)=',TP4(NVV,NUM)
WRITE(12,*)'LN=',LN
WRITE(12,*)'Z=',Z4
```

C OROFH

```
DO 900 LM=1,100000000
BH=KH(1)/DX+HO
ITH=IDN*(0.738*COS(2.5*(TIME-43200))+0.42974)
TEH=TOE+ITH*0.026-3.9
TPH(1,1)=(HO*TEH+KH(1)/DX*TPH(2,1))/BH
GH=KH(NUMH)/DX+HI

CALL SUB1(TPH,TOH,NUMH,NPCMH,NH,KH,PH,CH,Cpcmh,DX,DT)
NV=NH(NUMH)
NVVA=NV-1
TPH(NV,NUMH)=(HI*TITO+KH(NUMH)/DX*TPH(NVVA,NUMH))/GH

CALL MAX1(ZH,DIAFH,TPH,TH,NUMH,NH)
IF(ZH.LT.(0.000001))GO TO 25
TH=TPH
```

900 CONTINUE

25 TOH=TPH

```
WRITE(*,*)'TIME=',TIME
WRITE(*,*)'TPH(1,1)=',TPH(1,1)
WRITE(*,*)'TPH(NH(NUMH),NUMH)=',TPH(NV,NUMH)
WRITE(*,*)'TP(N(NUM)-1,NUM)=',TP(NVA,NUM)
WRITE(12,*)'TIME=',TIME
WRITE(12,*)'TP(NH(NUMH)-1,NUMH)=',TPH(NVVA,NUM)
WRITE(12,*)'TPH(1,1)=',TPH(1,1)
WRITE(12,*)'TPH(NH(NUMH),NUMH)=',TPH(NV,NUMH)
WRITE(12,*)'LM=',LM
WRITE(12,*)'ZH=',ZH
```

Μετά τον υπολογισμό των θερμοκρασιών των κόμβων των στρωμάτων του κάθε στοιχείου για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, υπολογίζεται η θερμοκρασία εσωτερικού αέρα την ίδια χρονική στιγμή. Χρησιμοποιείται ο ισολογισμός ενέργειας που περιγράφηκε παραπάνω, στον οποίον εισέρχονται οι θερμοροές από τους τοίχους, την οροφή και τα παράθυρα ως εξής:

Ισολογισμός ενέργειας στο πρόγραμμα:

$$((\rho_a V_a C_a)/DT)(T_{NEW}-T_{ITO})=HI(TP1-T_{NEW})A_{W1}+HI(TP2-T_{NEW})A_{W1}+HI(TP3-T_{NEW})A_{W2}+HI(TP4-T_{NEW})A_{W2}+U(TOE-T_{NEW})A_{WIN}+HI(TPH-T_{NEW})A_C \quad (5.21)$$

Λύνοντας ως προς T_{NEW} είναι εύκολος ο υπολογισμός της. Να επισημάνουμε, πως στην περίπτωση που μελετάμε την αγωγή θερμότητας με εσωτερικό ψυκτικό ή θερμικό φορτίο Q αυτό προστίθεται στο δεύτερο μέλος του παραπάνω ισολογισμού.

C YPOLOGISMOS THS TNEW

$$TW1=TP1(NVV,NUM)+TP2(NVV,NUM)$$

$$TW2=TP3(NVV,NUM)+TP4(NVV,NUM)$$

$$TC=TPH(NV,NUMH)$$

$$F=(PA*VA*CA)/DT$$

$$DIER=F+U*AWIN+HI*AC+2*HI*AW1+2*HI*AW2$$

$$STNE=(F*TITO+HI*(TW1*AW1+TW2*AW2+TC*AC)+U*AWIN*TOE)$$

$$TNEW=STNE/DIER$$

$$TITO=TNEW$$

$$XRN=TIME/3600$$

$$WRITE(*,*)'TNEW=',TNEW$$

$$WRITE(16,*)TIME,TNEW$$

$$WRITE(13,*)TIME,TOE$$

C KATAGRAFH SE ARXEIO KA8E MIA WRA

IF(KCOUNT.EQ.6)THEN

WRITE(21,*)'XRN=',XRN,'TNEW=',TNEW,'TOE=',TOE

WRITE(22,*)XRN,TNEW

WRITE(23,*)XRN,TOE

WRITE(24,*)XRN

WRITE(25,*)TNEW

WRITE(26,*)TOE

```
KCOUNT=0  
ELSE  
ENDIF  
500 CONTINUE  
CLOSE(12)  
CLOSE(13)  
CLOSE(16)  
CLOSE(21)  
CLOSE(22)  
CLOSE(23)  
CLOSE(24)  
CLOSE(25)  
CLOSE(26)  
STOP  
END
```

Υπορουτίνα SUB1:

SUBROUTINE SUB1(TK,TOI,NUMI,NPCMI,NI,KI,PI,CI,Cpcmi,DXI,DTI)

PARAMETER P=450,X=5

REAL *8,DIMENSION(X)::PI,KI,CI

DIMENSION NI(X)

REAL *8,DIMENSION(P,X)::TK,TOI

REAL *8,DIMENSION(P)::Cpcmi

DOUBLE PRECISION A,AIO,AK,AI

INTEGER NUMI,NPCMI

N20=NI(1)

DO 300 J=1,NUMI

IF(J.EQ.1)THEN

MZ=2

N2=NI(1)

AIO=PI(J)*CI(J)*DXI/DTI

ELSE IF(J.EQ.NUMI)THEN

MZ=1

N2=NI(NUMI)-1

AIO=PI(J)*CI(J)*DXI/DTI

ELSE IF(J.EQ.NPCMI)THEN

Tm=24

DO 130 I=1,NI(NPCMI)

IF(I.EQ.1)THEN

AK=KI(J)/DXI

A=KI(J-1)/DXI

Cpcmi(I)=1600.0+100000.0*EXP(-1.02*(TOI(I,J)-Tm)2)**

AIO=PI(J)*Cpcmi(I)*DXI/DTI

AI=A+AK+AIO

TK(I,J)=AK/AI*TK(I+1,J)+A/AI*TK(N20,J-1)+AIO/AI*TOI(I,J)

ELSE IF(I.EQ.NI(NPCMI))THEN

A=KI(J)/DXI

AK=KI(J+1)/DXI

Cpcmi(I)=1600.0+100000.0*EXP(-1.02*(TOI(I,J)-Tm)2)**

AIO=PI(J)*Cpcmi(I)*DXI/DTI

```

AI=A+AK+AIO
TK(I,J)=AK/AI*TK(I,J+1)+A/AI*TK(I-1,J)+AIO/AI*TOI(I,J)
  N20=NI(NPCMI)
  GOTO 300
ELSE
  A=KI(J)/DXI
  AK=A
  Cpcmi(I)=1600.0+100000.0*EXP(-1.02*(TOI(I,J)-Tm)**2)
  AIO=PI(J)*Cpcmi(I)*DXI/DTI
  AI=A+AK+AIO
  TK(I,J)=AK/AI*TK(I+1,J)+A/AI*TK(I-1,J)+AIO/AI*TOI(I,J)
  ENDIF
130 CONTINUE

ELSE
  MZ=1
  N2=NI(J)
  AIO=PI(J)*CI(J)*DXI/DTI
  ENDIF

  DO 200 I=MZ,N2
    IF((I.EQ.MZ).AND.(MZ.NE.2))THEN
      AK=KI(J)/DXI
      A=KI(J-1)/DXI
      AI=A+AK+AIO
      TK(I,J)=AK/AI*TK(I+1,J)+A/AI*TK(N20,J-1)+AIO/AI*TOI(I,J)
      ELSE IF((I.EQ.N2).AND.(N2.NE.NI(NUMI)-1))THEN
        A=KI(J)/DXI
        AK=KI(J+1)/DXI
        AI=A+AK+AIO
      TK(I,J)=AK/AI*TK(1,J+1)+A/AI*TK(I-1,J)+AIO/AI*TOI(I,J)
    ELSE
      A=KI(J)/DXI
      AK=A
      AI=A+AK+AIO
      TK(I,J)=AK/AI*TK(I+1,J)+A/AI*TK(I-1,J)+AIO/AI*TOI(I,J)
    ENDIF

```

```
      N20=N2
200 CONTINUE
300 CONTINUE
      RETURN
      END
```

Υπορουτίνα MAX1:

```
SUBROUTINE MAX1(ZI,DIAFI,TK,TI,NUMI,NI)
      PARAMETER P=450,X=5
      REAL *8,DIMENSION(P,X)::TK,TI,DIAFI
      DIMENSION NI(X)
      INTEGER NUMI
      DOUBLE PRECISION ZI

      ZI=0.
      DIAFI=ABS(TK-TI)
      DO 70 J=1,NUMI
        DO 80 I=1,NI(J)
          ZI=MAX(ZI,DIAFI(I,J))
60 CONTINUE
70 CONTINUE
      RETURN
      END
```

Θα πρέπει τέλος να επισημάνουμε, πως ο κώδικας εφαρμόζεται ακριβώς με τη σειρά που παρουσιάστηκε παραπάνω, και η αυτούσια μορφή του προκύπτει αν αφαιρεθούν τα σχόλια.

6.ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ,ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ,

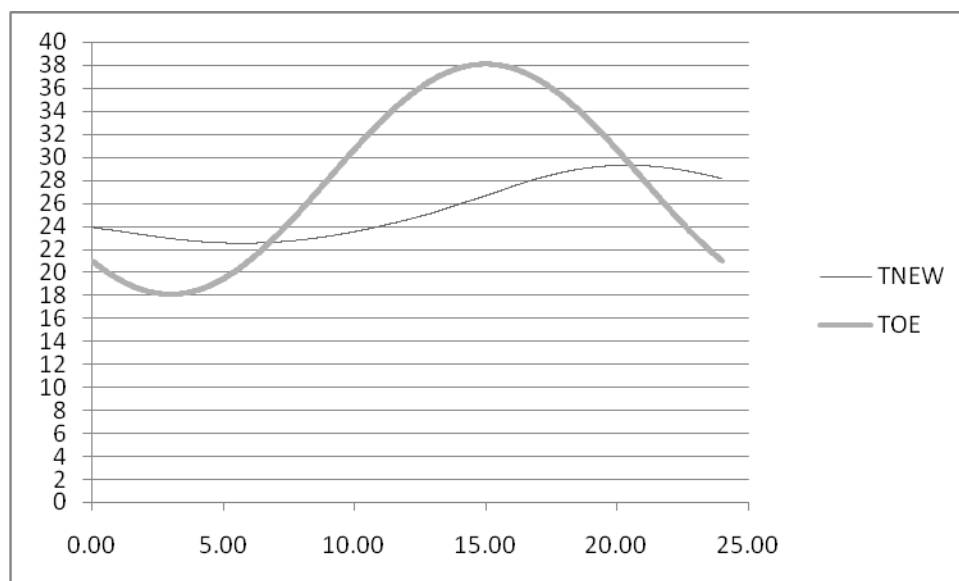
ΣΧΟΛΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ

6.1 Αποτελέσματα του κώδικα για PCM με διάφορα σημεία τήξεως και επιλογή του καταλληλότερου για την περιοχή των Αθηνών.

Ο υπολογιστικός κώδικας που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο εφαρμόστηκε για διάφορες περιπτώσεις. Κατ'αρχήν, εφαρμόστηκε σε κτιριακό κελυφος με τέσσερεις μονούς τετραστρωματικούς τοίχους και μια ομοίως μονή τετραστρωματική οροφή, για το μήνα Ιούλιο (21^η Ιουλίου) και για την περιοχή των Αθηνών. Οι τοίχοι αποτελούνται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από ένα στρώμα επιχρίσματος, ένα στρώμα τούβλου, ένα στρώμα υλικού αλλαγής φάσης (PCM) και εκ νέου ένα στρώμα επιχρίσματος. Ομοίως, η οροφή αποτελείται από τα ίδια στρώματα, πλην του στρώματος του τούβλου που αντικαθίσταται από ένα στρώμα οπλισμένου σκυροδέματος. Αρχικά, εφαρμόζουμε τον κώδικα για υλικά αλλαγής φάσης με διάφορα σημεία τήξεως, με σκοπό την επιλογή του βέλτιστου εξ' αυτών για εφαρμογή στην περιοχή των Αθηνών. Στην πρώτη εφαρμογή του κώδικα θέτουμε ως PCM εκείνο με θερμοκρασία τήξεως τους 22°C, στη δεύτερη εκείνο με σημείο τήξεως τους 24°C, στη συνέχεια στην τρίτη του εφαρμογή θέτουμε ως υλικό αλλαγής φάσης εκείνο με σημείο τήξεως τους 25°C και τέλος εκείνο με σημείο τήξεως τους 28°C. Δοκιμαστικά εφαρμόσαμε ακόμα τον κώδικα για τα υλικά με θερμοκρασία τήξεως τους 26°C και 27°C, παρακάτω ωστόσο επιλέχθηκε να παρουσιαστούν εκείνα των 22°C, 24°C, 25°C και 28°C ως αντιπροσωπευτικότερα για την επιρροή της θερμοκρασίας τήξεως στην θερμοαποθηκευτική ικανότητα του PCM. Ο λόγος που επιλέχθηκαν PCMs με αυτές τις θερμοκρασίες είναι για να καλύπτουν, όσο το δυνατόν, το θερμοκρασιακό εύρος εφαρμογής τους, και καθώς το καλοκαίρι το εύρος θερμικής άνεσης κυμαίνεται μεταξύ 23 και 27°C, με σκοπό την επίτευξη ικανοποιητικής μεταφοράς θερμότητας, η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας τήξεως του PCM πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 3-5°C. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του κώδικα. Σε κάθε διάγραμμα, παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα και η αντίστοιχη μεταβολή του εξωτερικού στο εικοσιτετράωρο της 21^{ης} Ιουλίου. Στο τέλος, παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα της μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας από την εφαρμογή των τεσσάρων PCM, συνοπτικά και τον τεσσάρων, στο εικοσιτετράωρο. Να σημειωθεί ότι για την επαναληπτική διαδικασία του προγράμματος, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, τέθηκε αρχική εσωτερική θερμοκρασία (TITO) στους 24°C, ως μια τυπική θερμοκρασία εσωτερικού χώρου του καλοκαιρινού μήνα. Αν και η θερμοκρασία αυτή είναι κάπως ιδιότυπη, καθώς κατά την αρχή της εφαρμογής του προγράμματος το PCM των 22°C είναι σε υγρή φάση, εκείνο των 24°C βρίσκεται στη φάση αλλαγής του, ενώ τα 25°C και 28°C βαθμών είναι ακόμα στη στερεή φάση, τονίζεται εδώ πως το πρόγραμμα εφαρμόστηκε και για αρχική εσωτερική θερμοκρασία 20°C (όπου και τα τέσσερα είναι σε στερεή φάση) και η σύγκριση της απόδοσης των τεσσάρων PCM ήταν ακριβώς αντίστοιχη εκείνης που παρουσιάζεται παρακάτω.

Αποτελέσματα προγράμματος για μεταβολή εσωτερικής θερμοκρασίας TNEW και εξωτερικής θερμοκρασίας TOE με την εφαρμογή διαφόρων PCMs:

1. PCM με θερμοκρασία τήξεως $T_m=22^{\circ}\text{C}$

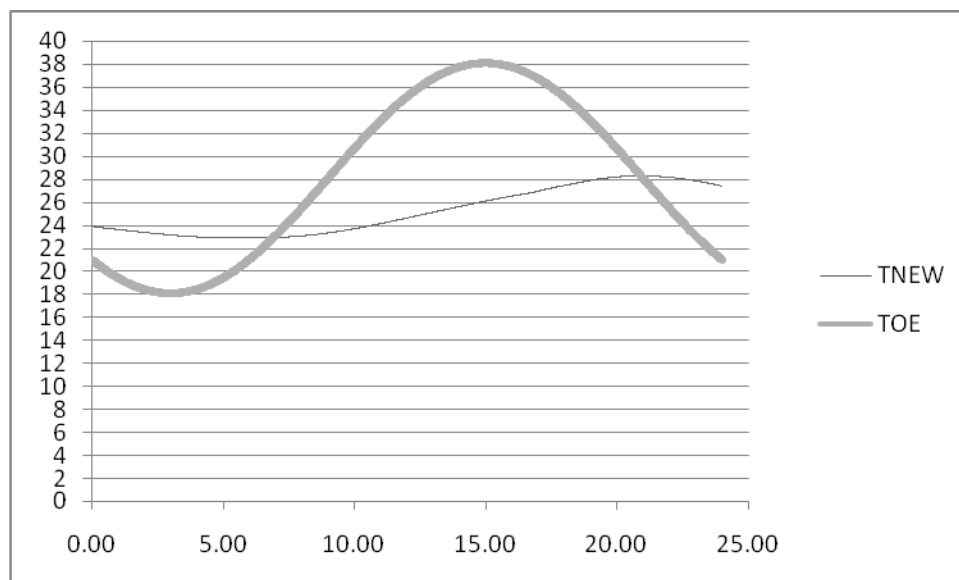


Όπως παρατηρούμε και στο διάγραμμα και προέκυψε και από τις τιμές μετά την εφαρμογή του κώδικα για PCM με σημείο τήξεως 22°C , η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει ελάχιστο στους 22.52°C την 5.73 ώρα της εφαρμογής του και μέγιστο στους 29.29°C την 20.41 ώρα της εφαρμογής του.

min=22.517759°C t=5.73h

max=29.287790°C t=20.41h

2. PCM με θερμοκρασία τήξεως $T_m=24^{\circ}\text{C}$

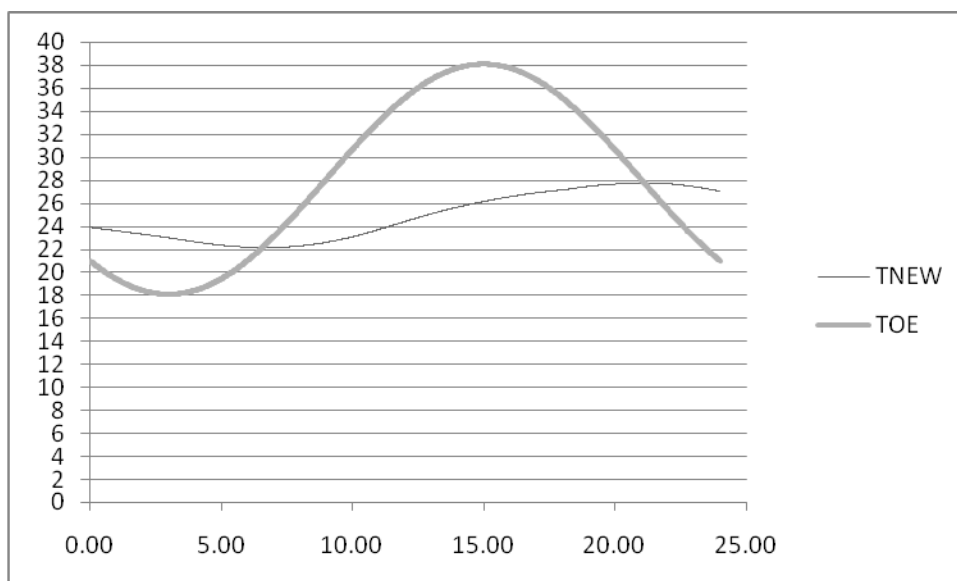


Για PCM με σημείο τήξεως 24°C , η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει ελάχιστο στους 22.87°C την 5.53 ώρα της εφαρμογής του και μέγιστο στους 28.27°C την 20.91 ώρα της εφαρμογής του.

min=22.8721211 t=5.53h

max=28.269918 t=20.91h

3.PCM με θερμοκρασία τήξεως $T_m=25^{\circ}\text{C}$

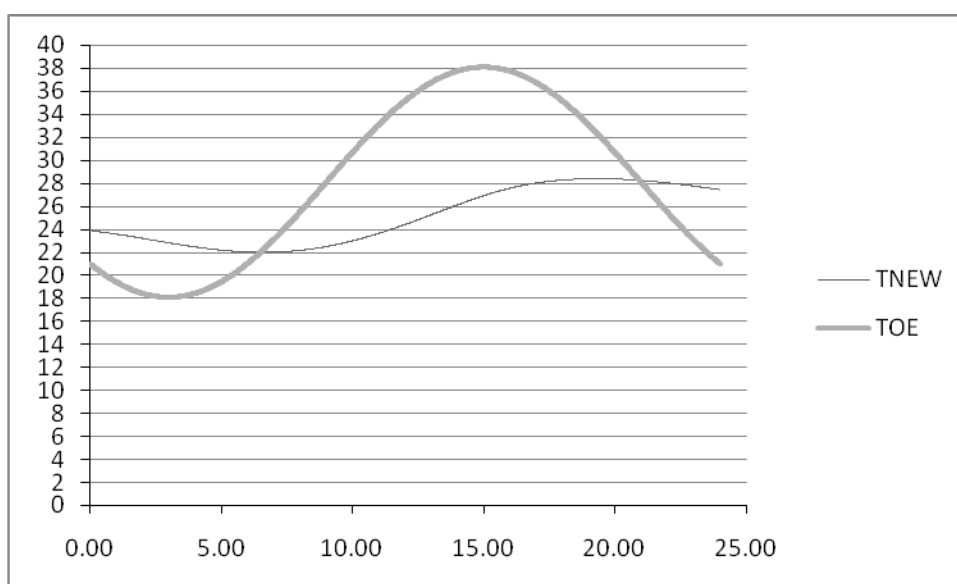


Για PCM με σημείο τήξεως 25°C , η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει ελάχιστο στους 22.13°C την 6.70 ώρα της εφαρμογής του και μέγιστο στους 27.76°C την 21.16 ώρα της εφαρμογής του.

min=22.12513052 t=6.70h

max=27.7589630 t=21.16h

4.PCM με θερμοκρασία τήξεως $T_m=28^{\circ}\text{C}$

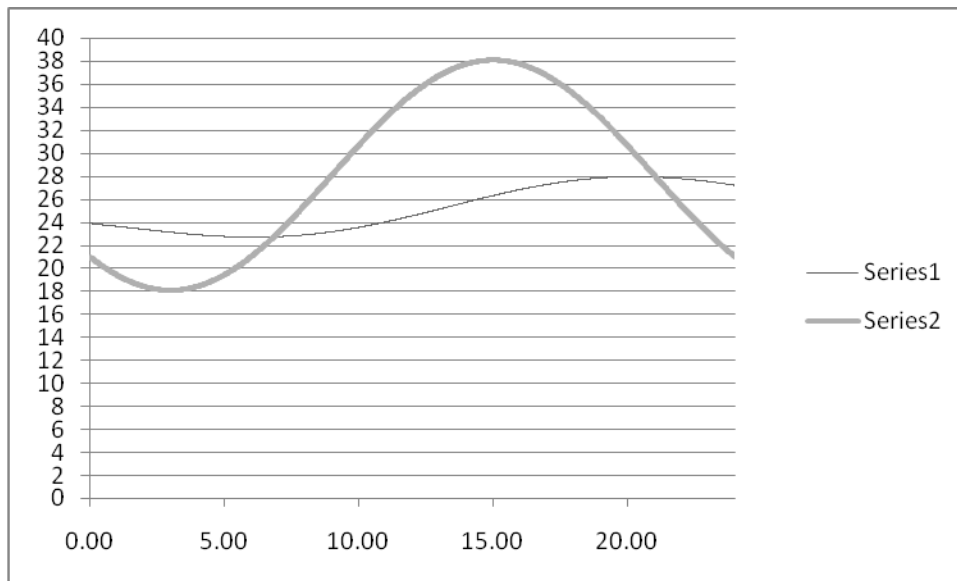


Για PCM με σημείο τήξεως 28°C , η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει ελάχιστο στους 21.98°C την 5.73 ώρα της εφαρμογής του και μέγιστο στους 28.78°C την 19.34 ώρα της εφαρμογής του.

min=21.979429 t=5.73h max=28.777415 t=19.34h

Στη συνέχεια, ο κώδικας εφαρμόστηκε για απλή συμβατική μόνωση ίδιου πάχους με το στρώμα PCM, αντί του στρώματος αυτού (των PCM):

5.Χωρίς PCM με απλή μόνωση 0.020m:

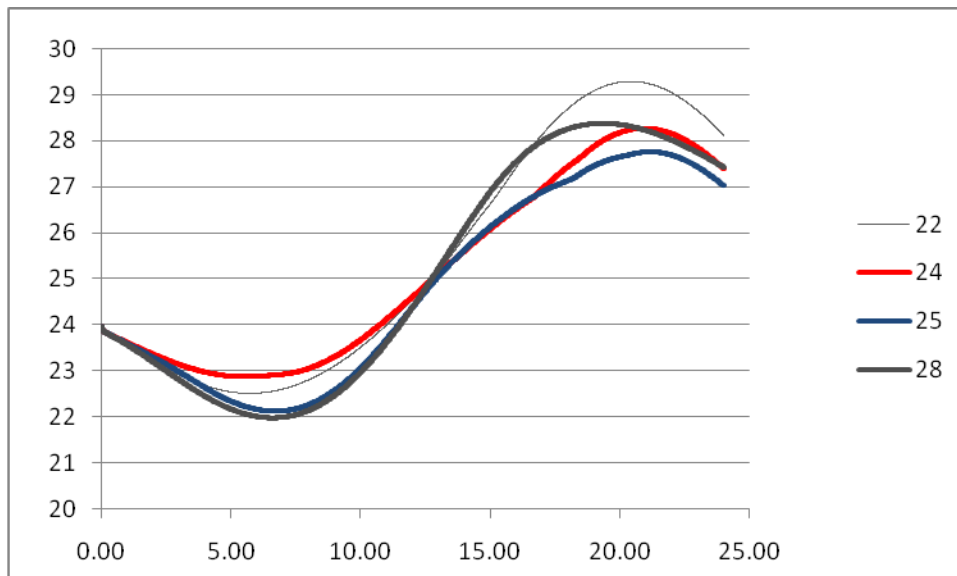


Για απλή συμβατική μόνωση πάχους 0.020m, η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει ελάχιστο στους 22.69°C την 6.11-6.12 ώρα της εφαρμογής της και μέγιστο στους 27.94°C την 20.30 ώρα της εφαρμογής της.

min=22.6904549 t=6.11-6.12h

max=27.9446206 t=20.30h

Συγκριτικό διάγραμμα των τεσσάρων χρησιμοποιηθέντων PCMs:



Στην επόμενη παράγραφο, σχολιάζονται τόσο το τελευταίο συγκριτικό διάγραμμα όσο και τα προηγούμενα κάθε υλικού ξεχωριστά και γίνεται επιλογή του βέλτιστου PCM για το παρον πρόβλημα που εξετάζουμε.

6.2 Επιλογή καταλληλότερου PCM

Για τη σύγκριση των εξετασθέντων υλικών αλλαγής φάσης, ως κριτήριο θα χρησιμοποιηθεί το πλάτος ταλάντωσης των διαγραμμάτων τους, δηλαδή η διαφορά του μεγίστου από το ελάχιστο. Αυτό συμβαίνει διότι όσο μικρότερη είναι αυτή η διαφορά τόσο σταθερότερη-από θερμοκρασιακή άποψη-κατάσταση εξασφαλίζεται στο χώρο, δηλαδή τόσο μικρότερη είναι διακύμανση της θερμοκρασίας στη διάρκεια της ημέρας, που είναι και το ζητούμενο.

Παρατηρούμε λοιπόν πως οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων θερμοκρασιών για κάθε PCM έχει ως εξής (για συγκριτικούς λόγους παραθέτουμε και τις διαφορές για τα υλικά αλλαγής φάσης σημείων τήξεως 23°C, 26°C και 27°C που μελετήθηκαν μεν, αλλά δεν παρουσιάζονται παραπάνω ως πλεονάζοντα):

PCM : $T_m=22^\circ\text{C} \rightarrow 6.77^\circ\text{C}$

$T_m=23^\circ\text{C} \rightarrow 6.15^\circ\text{C}$

$T_m=24^\circ\text{C} \rightarrow 5.39^\circ\text{C}$

$T_m=25^\circ\text{C} \rightarrow 5.63^\circ\text{C}$

$T_m=26^\circ\text{C} \rightarrow 5.69^\circ\text{C}$

$T_m=27^\circ\text{C} \rightarrow 5.95^\circ\text{C}$

$T_m=28^\circ\text{C} \rightarrow 6.79^\circ\text{C}$

Από τα παραπάνω, όπως και από το συγκριτικό διάγραμμα, γίνεται εμφανές ότι καταλληλότερα PCM είναι εκείνα με σημείο τήξεως 24°C, 25°C και 26°C, καθώς παρουσιάζουν το μικρότερο πλάτος ταλάντωσης, με σχετικά μικρή διαφορά μεταξύ τους και στον ίδιο περίπου χρόνο. Παρά ταύτα, και από αυτά *ως βέλτιστο* στο παρόν πρόβλημα επιλέγουμε *το PCM με σημείο τήξεως τους 24°C*.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα για κάθε PCM, διαπιστώνουμε πως τα PCM με σημείο τήξεως τους 28°C και 24°C έχουν το ίδιο μέγιστο ενώ το ελάχιστο είναι παραπλήσιο σε αυτά των 25°C και 28°C. Επίσης, παρατηρούμε ότι στα PCMs με σημείο τήξεως από 22°C μέχρι το 26°C τα μέγιστα παρουσιάζουν φθίνουσα πορεία ενώ στη συνέχεια τα μέγιστα αυξάνονται στα PCMs με σημείο τήξεως 27°C και 28°C.

Ως προς το ελάχιστο των PCMs με σημείο τήξεως 25°C και 28°C συμβαίνουν τα εξής:

Το PCM με σημείο τήξεως τους 28°C, μέχρι τους 28 βαθμούς είναι στερεό, διακρίνεται δηλαδή από αισθητή θερμότητα και συμπεριφέρεται σαν μόνωση με μικρή θερμοχωρητικότητα επομένως είναι λογικό να "παρακολουθεί" περισσότερο τη μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας από τα άλλα και να παρουσιάζει το μικρότερο ελάχιστο και το μεγαλύτερο μέγιστο. Αντίστοιχα, το PCM με σημείο τήξεως τους 25°C,

μέχρι τους 25°C λειτουργεί ως στερεό, επομένως το ελάχιστό του προσεγγίζει εκείνο του PCM των 28°C, ενώ στους 25°C λιώνει, περνάει δηλαδή στην υγρή φάση του και αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα, αποκτώντας μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα και μη επιτρέποντας την άνοδο της θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα που τήκεται, επομένως παρουσιάζεται μια χρονική καθυστέρηση σχεδόν 2 ωρών για την παρουσία του μεγίστου του (σε σχέση με το PCM των 28°C) και ίσως δεν προλαβαίνει να φτάσει τους 28°C για αυτό και παρουσιάζει μέγιστο στο 27.7°C. Το PCM των 28°C, δηλαδή, δείχνει να λειτουργεί σε μικρό θερμοκρασιακό εύρος με την ιδιότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας καθώς ήδη προσεγγίζει τη μέση και τη μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία. Δεν έχει επομένως το χρόνο να λειτουργήσει πλήρως σαν PCM.

Σε ό,τι αφορά στο PCM των 24°C αρχίζει να αποθηκεύει θερμότητα νωρίτερα από το PCM των 25°C και παρουσιάζει το μέγιστό του μια ώρα πριν το PCM των 25°C, επομένως παρακολουθεί την εξωτερική θερμοκρασία περισσότερη ώρα (ως υγρό πλέον, με τη θερμοχωρητικότητα της υγρής του φάσης) και φτάνει σε ψηλότερο μέγιστο, δεδομένου ότι κατά την άυξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μειώνεται η επίδραση της λανθάνουσας θερμοχωρητικότητας από τον τύπο του C_{eff} (σχέση 5.10) του PCM.

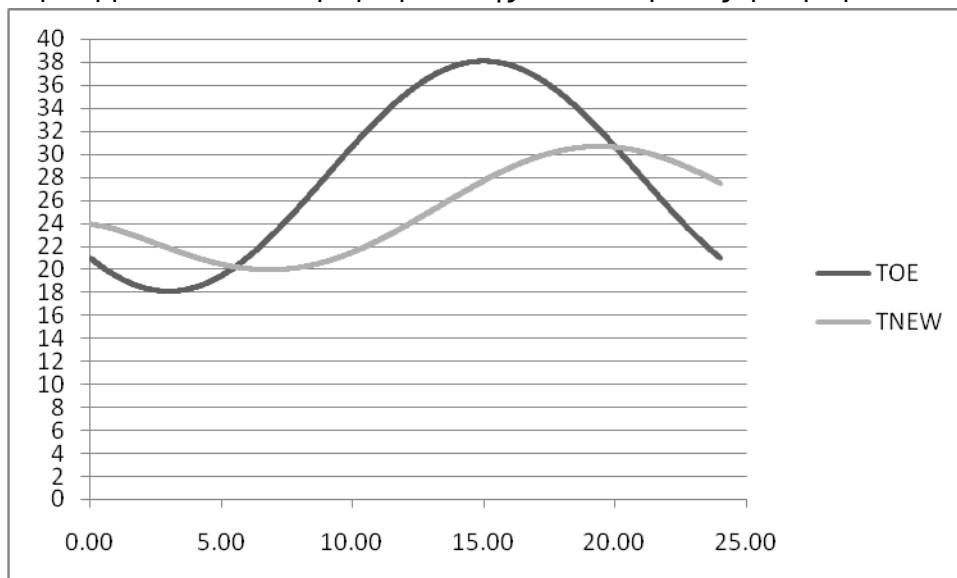
Τέλος, η παρατήρηση ότι τα μέγιστα αυξάνονται στα PCMs των 27°C και 28°C οφείλεται, όπως εξηγήσαμε και παραπάνω, στο γεγονός ότι παρακολουθούν (ως στερεά, με αισθητή θερμότητα) την εξωτερική θερμοκρασία περισσότερο από τα υπόλοιπα.

Αφού επιλέχθηκε ως βέλτιστο, για το παρόν πρόβλημα, PCM εκείνο με σημείο τήξεως τους 24°C, στη συνέχεια

- συγκρίνεται η θερμική συμπεριφορά του με το απλό, μή μονωμένο κτιριακό κέλυφος στις ίδιες συνθήκες τον καλοκαιρινό μήνα Ιούλιο,
- έπειτα παρουσιάζεται η συμπεριφορά του κατά το χειμερινό μήνα Φεβρουάριο (και συγκεκριμένα για την 21^η μέρα του) για μια τυπική εικόνα της συμπεριφοράς του το χειμώνα και συγκρίνεται με τη θερμική συμπεριφορά της απλής μονώσεως στις ίδιες συνθήκες,
- ακολουθεί η ίδια σύγκριση για το καλοκαίρι,
- εφαρμόζεται σε κτιριακό κέλυφος στο εσωτερικό του οποίου υπάρχει σταθερό θερμικό φορτίο(ψύξη για καλοκαίρι και θέρμανση για χειμώνα),
- εφαρμόζεται στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων του κτιριακού κελύφους και συγκρίνεται εκ νέου με την απλή μόνωση για καλοκαίρι και χειμώνα, και παρουσιάζεται η συμπεριφορά του σε αυτή τη θέση με εσωτερικό ψυκτικό και θερμικό φορτίο και
- τέλος εφαρμόζεται σε διπλό τοίχο και συγκρίνεται εκ νέου με την απλή μόνωση.

6.3 Σύγκριση κτιριακού κελύφους με PCM, με μη μονωμένο κτιριακό κέλυφος

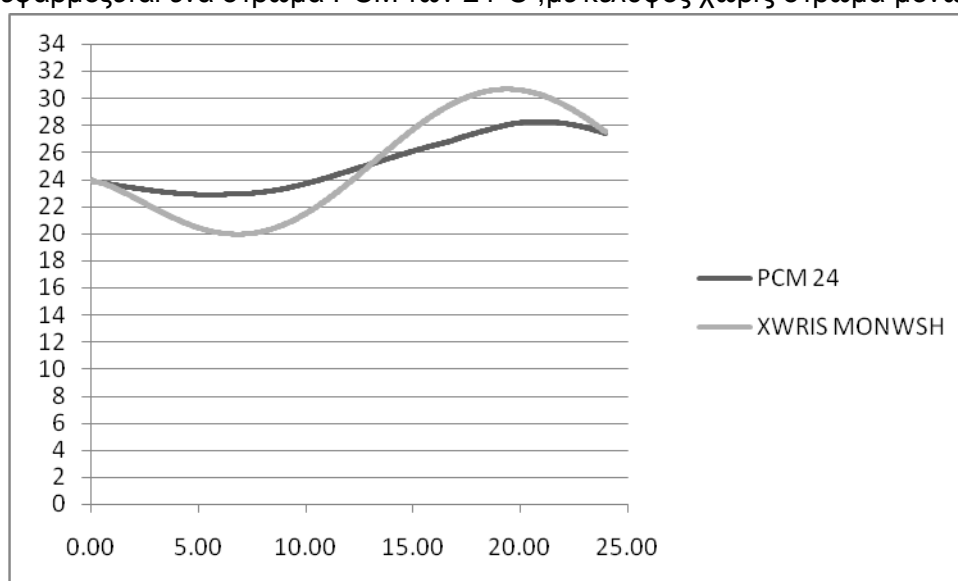
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους το οποίο στα πλαινά εξωτερικά τοιχώματα και στην οροφή δεν περιλαμβάνει κανένα στρώμα μόνωσης, είναι επομένως τριστρωματικά στοιχεία:



Σχήμα 6.3.1 Διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας μη μονωμένου κτιριακού κελύφους τον καλοκαιρινό μήνα Ιούλιο.

Όπως είναι εμφανές στο παραπάνω διάγραμμα, η εσωτερική θερμοκρασία του απλού μη μονωμένου κτιριακού κελύφους παρουσιάζει μεγάλη εξάρτηση από τη μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας. Παρουσιάζει ελάχιστο την 6.84 ώρα στους 19.95°C και μέγιστο την 19.39 στους 30.66°C. Η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι 10.71°C.

Παρακάτω, παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα κτιριακού κελύφους στο οποίο εφαρμόζεται ένα στρώμα PCM των 24°C , με κέλυφος χωρίς στρώμα μόνωσης:



Σχήμα 6.3.2 Συγκριτικό διάγραμμα κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C και μη μονωμένου κτιριακού κελύφους.

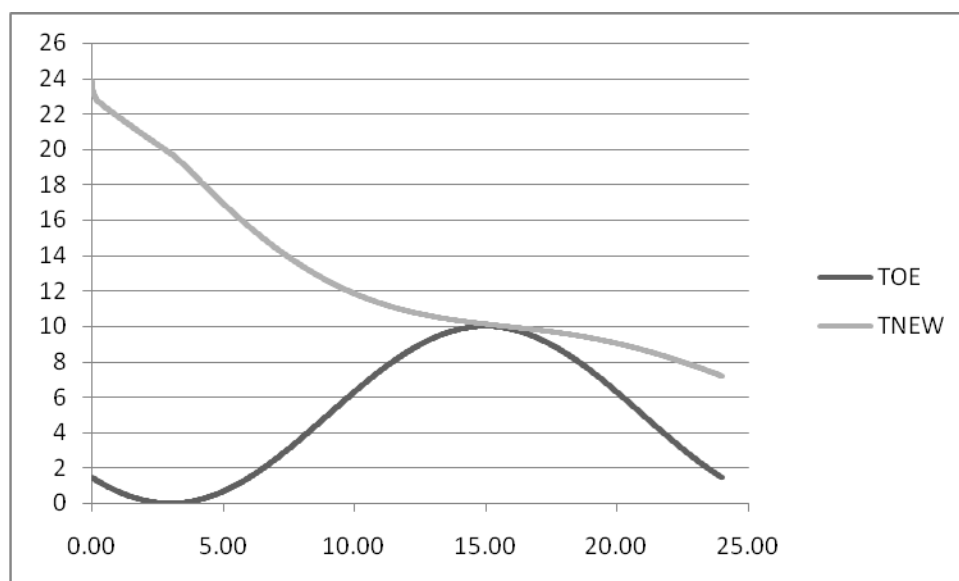
Όπως πολύ εύκολα γίνεται εμφανές από το διάγραμμα, η εφαρμογή του PCM στο κτιριακό κέλυφος συμβάλει στη μόνωσή του καθώς μειώνει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας στους 5.39°C, έναντι των 10.71°C που είναι η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του απλού κτιριακού κελύφους χωρίς μόνωση, εξασφαλίζοντας κατ'αυτόν τον τρόπο σταθερότερες θερμικές συνθήκες στο χώρο. Επομένως, εξασφαλίζεται καλύτερη θερμική άνεση στο χώρο, κατά 5.32°C.

6.4 Θερμική συμπεριφορά του PCM που επελέχθη, κατά το χειμερινό μήνα Φεβρουάριο και σύγκρισή του με απλή μόνωση.

Παρακάτω παρουσιάζεται η συμπεριφορά του PCM των 24°C την 21^η Φεβρουαρίου:

Περίπτωση 1^η:

Σε αυτή την περίπτωση η επαναληπτική διαδικασία ξεκινάει με μια αρχική εσωτερική θερμοκρασία $T_{iTO}=24^{\circ}\text{C}$ και ελέγχεται η μονωτική συμπεριφορά του PCM ως προς το κατά πόσο γρήγορα επιτρέπει τη διαφυγή θερμότητας προς το εξωτερικό ψυχρότερο περιβάλλον:

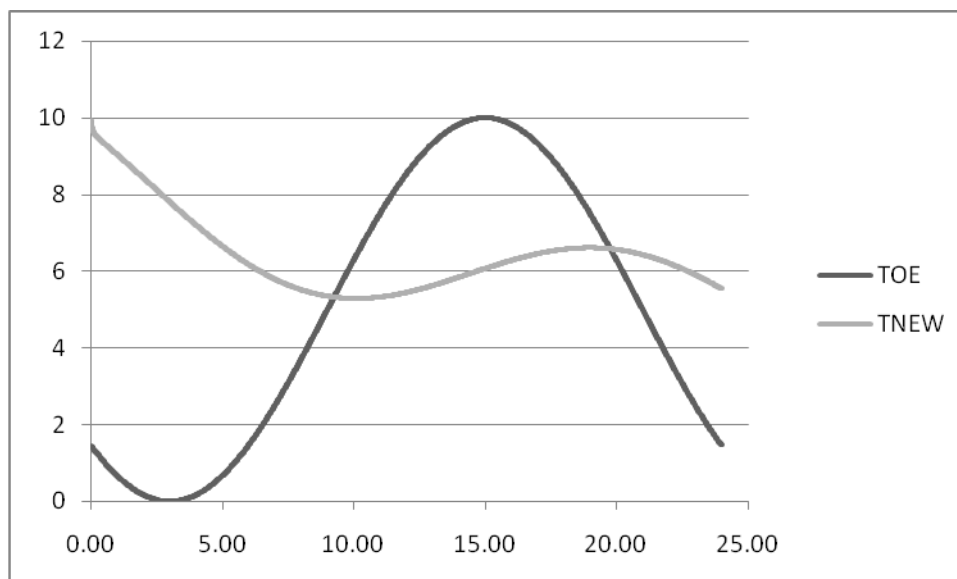


Σχήμα 6.4.1 Διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C κατά το μήνα Φεβρουάριο (21^η) και αρχική εσωτερική θερμοκρασία $T_{iTO}=24^{\circ}\text{C}$

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως η εσωτερική θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά από τις 0 μέχρι τις 15 ώρες εφαρμογής του PCM οπότε και η εξωτερική θερμοκρασία φθάνει στο μέγιστο της τιμής της, εκεί σταθεροποιείται για 2 με 3 ώρες. Τούτο συμβαίνει διότι μέχρι εκείνη την ώρα η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό εσωτερικό περιβάλλον στο ψυχρό εξωτερικό, άρα αποβάλλεται θερμότητα και η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου μειώνεται, το υγρό στους 24°C PCM στερεοποιείται αποκτώντας μικρότερη θερμοχωρητικότητα οπότε ο εσωτερικός αέρας "παρακολουθεί" τη μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας. Κατ'αυτό τον τρόπο, όταν η εξωτερική θερμοκρασία φθάνει στο μέγιστό της (10°C) η εσωτερική θερμοκρασία έχει επίσης τιμή 10.1°C, καθώς ανταλλάσσεται αισθητή θερμότητα και στη συνέχεια με την εκ νέου μείωση της εξωτερικής θερμοκρασίας, η εσωτερική μειώνεται κατά 3 βαθμούς ως τη συμπλήρωση του εικοσιτετραώρου.

Περίπτωση 2^η:

Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται αρχική εσωτερική θερμοκρασία ΤΙΤΟ=10°C ως μια τυπική θερμοκρασία εσωτερικού αέρα το χειμώνα για να παρατηρηθεί η αλλαγή της μέσα στο εικοσιτετράωρο:



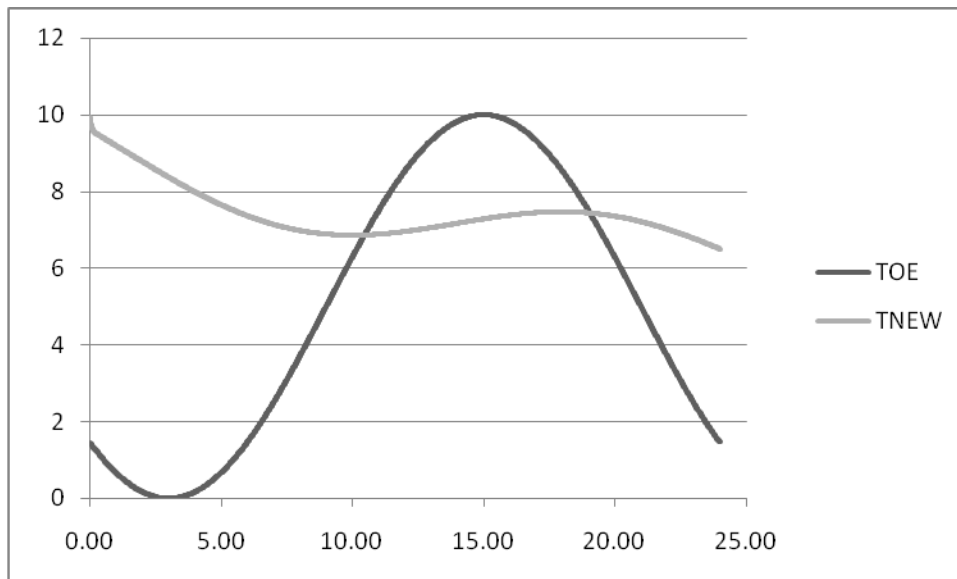
Σχήμα 6.4.2 Διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C κατά το μήνα Φεβρουάριο(21^η) και αρχική εσωτερική θερμοκρασία ΤΙΤΟ=10°C

Στην περίπτωση αυτή το PCM είναι σε ολόκληρο το φάσμα στερεό, λειτουργεί ως απλή μόνωση και παρατηρείται πως η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει το πρώτο ελάχιστο στις 10.1 ώρες και είναι 5.29°C ενώ η εξωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει αντίστοιχα ελάχιστο στις 3 ώρες επομένως προσφέρει μια χρονική καθυστέρηση περίπου 7 ωρών. Στη συνέχεια παρουσιάζει μέγιστο στις 18.97 ώρες στους 6.61°C, δηλαδή τέσσερις ώρες μετά από την παρουσία του μεγίστου στην εξωτερική θερμοκρασία(στις 15 ώρες, 10°C), ενώ η διακύμανση (μέγιστο μείον ελάχιστο) είναι 1.32°C . Τέλος,στη συνέχεια μειώνεται εκ νέου μέχρι τις 24 ώρες.

Περίπτωση 3^η:

Απλή μόνωση.

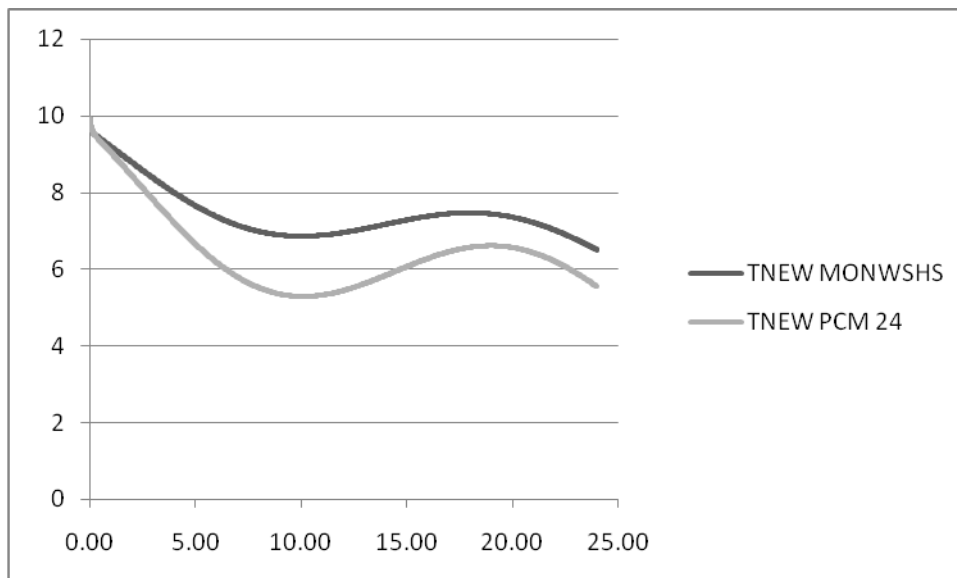
Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζεται αντί του PCM ένα στρώμα ίδιου πάχους απλής μόνωσης με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάσθηκαν στην παράγραφο (5.3):



Σχήμα 6.4.3 Διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με απλή μόνωση κατά το μήνα Φεβρουάριο(21^η) και αρχική εσωτερική θερμοκρασία $T_{ITO}=10^{\circ}\text{C}$

Όπως γίνεται εμφανές στο διάγραμμα, με την εφαρμογή της απλής μόνωσης η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει πρώτο ελάχιστο μέσα στο εικοσιτετράωρο στις 10 ώρες εφαρμογής της μόνωσης και στους 6.86°C , δηλαδή 7 ώρες μετά την παρουσία του ελαχίστου στην εξωτερική θερμοκρασία και μέγιστο στις 17.95 ώρες και στους 7.47°C δηλαδή τρεις ώρες μετά την παρουσία του μεγίστου της εξωτερικής θερμοκρασίας. Η διακύμανση είναι εδώ 0.61°C .

Σύγκριση:



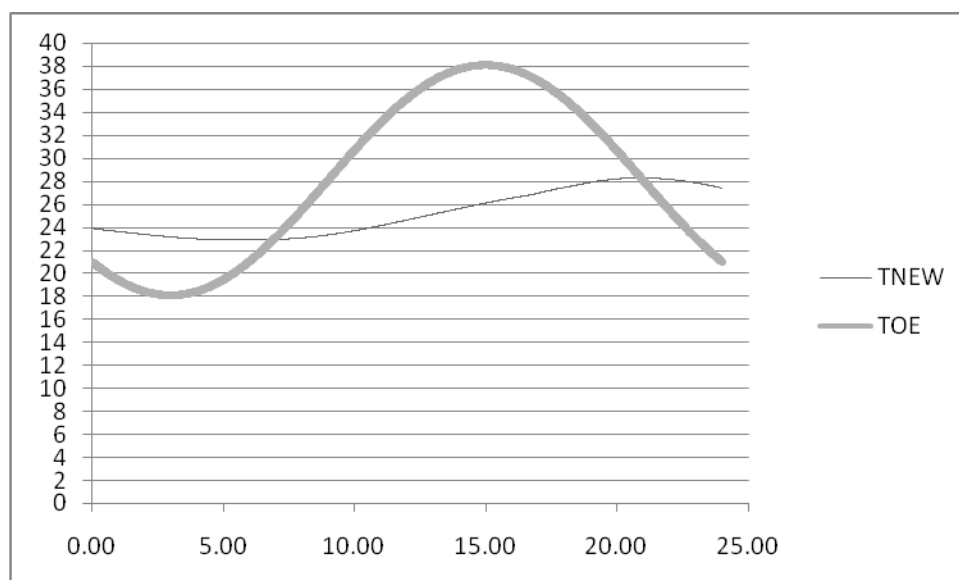
Σχήμα 6.4.4 Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C και με απλή μόνωση κατά το μήνα Φεβρουάριο(21^η) και αρχική εσωτερική θερμοκρασία $T_{ITO}=10^{\circ}\text{C}$

Όπως παρατηρούμε από το συγκριτικό διάγραμμα και από τις τιμές που προέκυψαν από την εφαρμογή του κώδικα, με την απλή μόνωση η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα από ότι συμβαίνει με την εφαρμογή του PCM κατά ένα με ενάμιση βαθμό ενώ η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι κατά 0.71°C μικρότερη (επομένως προτιμότερη) από εκείνη που προκύπτει με την εφαρμογή του PCM. Παρουσιάζει, με άλλα λόγια, η απλή μόνωση κατά τι καλύτερη θερμική συμπεριφορά από το PCM των 24°C , πράγμα όμως αναμενόμενο καθώς η ειδική θερμική της αγωγιμότητα k είναι όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία $0.038[\text{W}/\text{mK}]$, δηλαδή πολύ μικρότερη (περίπου το $\frac{1}{4}$) από εκείνη του εφαρμοζόμενου PCM ($0.15[\text{W}/\text{mK}]$). [58]. Επομένως, παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στη ροή θερμότητας από το PCM. Επίσης, πρέπει να τονισθεί πως το χειμώνα, στο εύρος θερμοκρασιών που λειτουργεί το PCM, είναι σε όλη τη λειτουργία του σε στερεή μορφή, λειτουργεί και αυτό δηλαδή σαν απλή μόνωση αφού δεν αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα καθώς δεν αλλάζει φάση, επομένως η συγκρισή τους έγκειται στη μεγάλη διαφορά της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας. Πρέπει ακόμη, να παρατηρήσουμε πως στο κτιριακό κελύφος με PCM το μέγιστο παρουσιάζεται με χρονική καθυστέρηση μιας ώρας σε σχέση με την παρουσία του μεγίστου του κελύφους με απλή μόνωση.

6.5 Σύγκριση κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C με κτιριακό κέλυφος με απλή μόνωση ίδιου πάχους κατά το μήνα Ιούλιο.

Για τη ζητούμενη σύγκριση θεωρείται εύλογο να παρουσιασθεί εκ νέου το διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας με PCM των 24°C, ξεχωριστά το διάγραμμα της απλής μόνωσης για την ίδια συνθήκη (21^η Ιουλίου) και τέλος να παρουσιαστεί το συγκριτικό διάγραμμα των δύο, το οποίο θα παρουσιάζει το προτιμότερο θερμικά μέσο μόνωσης:

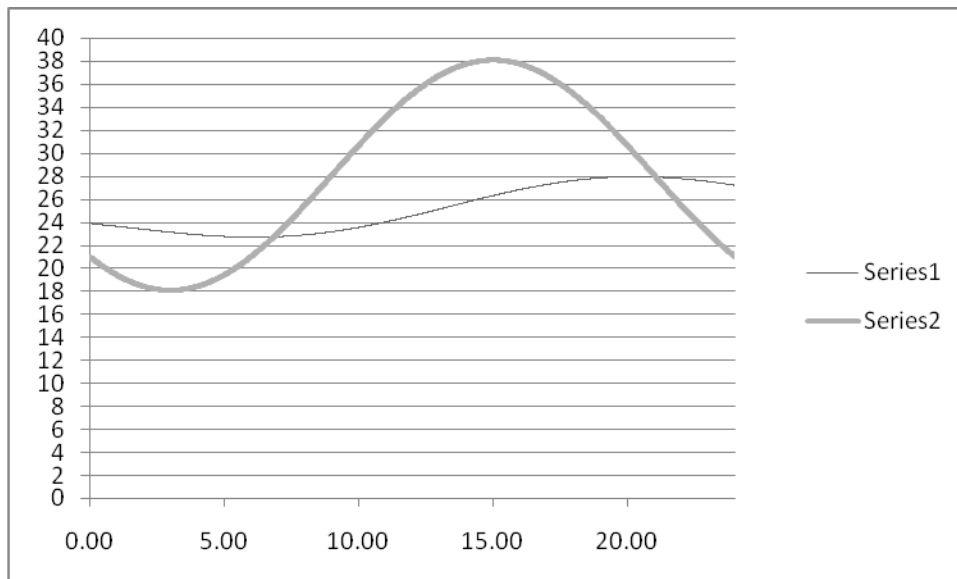
PCM:



Σχήμα 6.5.1 Διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C κατά το μήνα Ιούλιο(21^η)

Η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει ελάχιστο στους 22.87°C την 5.53 ώρα της εφαρμογής του και μέγιστο στους 28.27°C την 20.91 ώρα της εφαρμογής του.

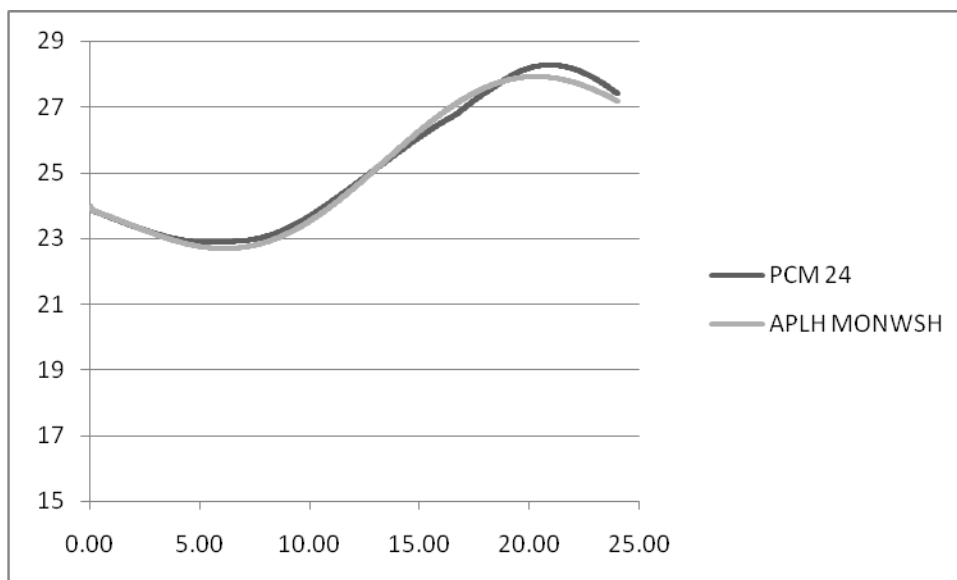
Απλή μόνωση:



Σχήμα 6.5.2 Διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με απλή μόνωση κατά το μήνα Ιούλιο(21^η)

Η εσωτερική θερμοκρασία παρουσιάζει ελάχιστο στους 22.69°C την 6.11 ώρα της εφαρμογής της και μέγιστο στους 27.94°C την 20.30 ώρα της εφαρμογής της.

Συγκριτικό διάγραμμα:



Σχήμα 6.5.3 Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C και (στη δεύτερη περίπτωση) με απλή μόνωση κατά το μήνα Ιούλιο(21^η)

(Επισημαίνεται πως στο παραπάνω διάγραμμα, ο άξων των y ξεκινά από τους 15°C μόνο για να γίνει εμφανής η διαφορά των διαγραμμάτων, καθώς με κλιμακα που ξεκινά από το μηδέν οι καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν και δεν είναι εμφανής η διαφορά.)

Στο συγκριτικό διάγραμμα, όπως και στις τιμές μεγίστων ελαχίστων, γίνεται εμφανές πως η απλή μόνωση προσφέρει κατά πολύ μικρή διαφορά καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης στο χώρο, καθώς η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας στο χώρο με την εφαρμογή της είναι 5.25°C , έναντι των 5.39°C που είναι η διακύμανση με εφαρμογή του PCM των 24°C . Πρόκειται, δηλαδή, για μια διαφορά των 0.14°C , επομένως πολύ μικρή για να θεωρηθεί προτιμότερη η απλή μόνωση. Το μέγιστο στο κτιριακό κελύφος με PCM παρουσιάζεται με χρονική καθυστέρηση περίπου μισής ώρας σε σχέση με το μέγιστο του κτιριακού κελύφους με απλή μόνωση, και τούτο λόγω της λανθάνουσας θερμότητας που αποθηκεύει και την αποδίδει αργότερα. Παρ'όλα αυτά, η σύγκριση δείχνει πως μπορούν εξίσου να χρησιμοποιηθούν για τη μόνωση στην τοιχοποιία με την ίδια επιτυχία.

6.6 Θερμική συμπεριφορά PCM σε κτιριακό κέλυφος με εσωτερικό φορτίο Q.

Το εσωτερικό φορτίο που απαιτείται να αναπληρώνεται από την κλιματιστική συσκευή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = U_{\text{buil}} A_{\text{tot}} (T - \text{TOE})$$

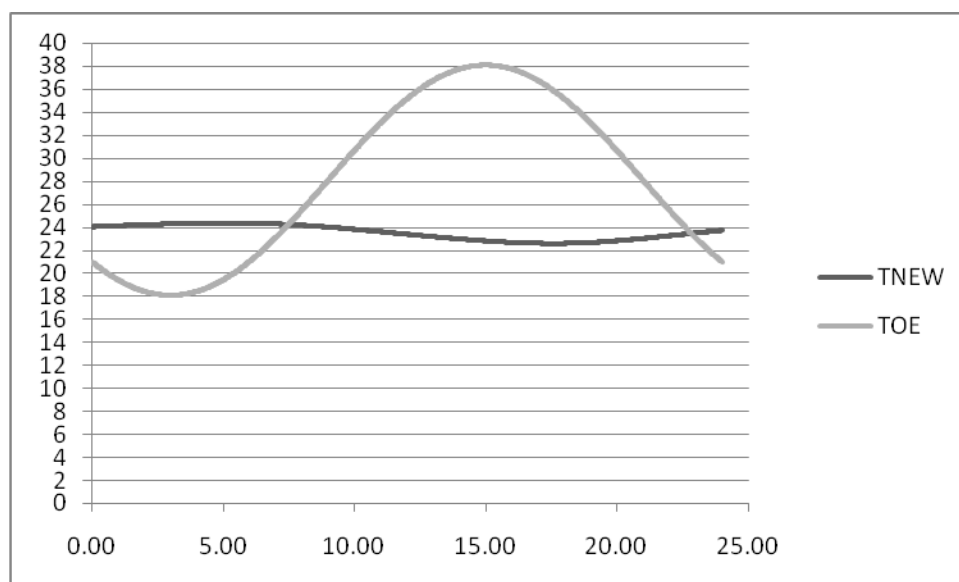
όπου U_{buil} η ολική θερμική διαπερατότητα του κτιριακού κελύφους, A_{tot} η συνολική επιφάνεια του κτιριακού κελύφους που λαμβάνεται υπ'όψιν στον ισολογισμό ενέργειας (πλαινά τοιχώματα και οροφή), T η επιθυμητή θερμοκρασία στο χώρο και TOE η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα.

Είναι $U_{\text{buil}} = 0.57 \text{ W/m}^2\text{K}$ (διότι $U_{\text{ολ}} = (4 \cdot U_w \cdot A_w + U_H \cdot A_H) / A_{\text{tot}}$, με U_w η θερμική διαπερατότητα των τοίχων [58] ίση με $0.66 \text{ W/m}^2\text{K}$, U_H η θερμική διαπερατότητα της οροφής ίση με $0.46 \text{ W/m}^2\text{K}$ και A_w, A_H, A_{tot} το εμβαδό του τοίχου, της οροφής και το συνολικό εμβαδό επιφανείας του κτιριακού κελύφους) και $A_{\text{tot}} = 4 \cdot 10 \cdot 3 + 100 = 220 \text{ m}^2$.

ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ:

Εσωτερικό ψυκτικό φορτίο Q, επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία 24°C :

Το διάγραμμα που προκύπτει για κτιριακό κέλυφος με PCM των 24°C φαίνεται παρακάτω:



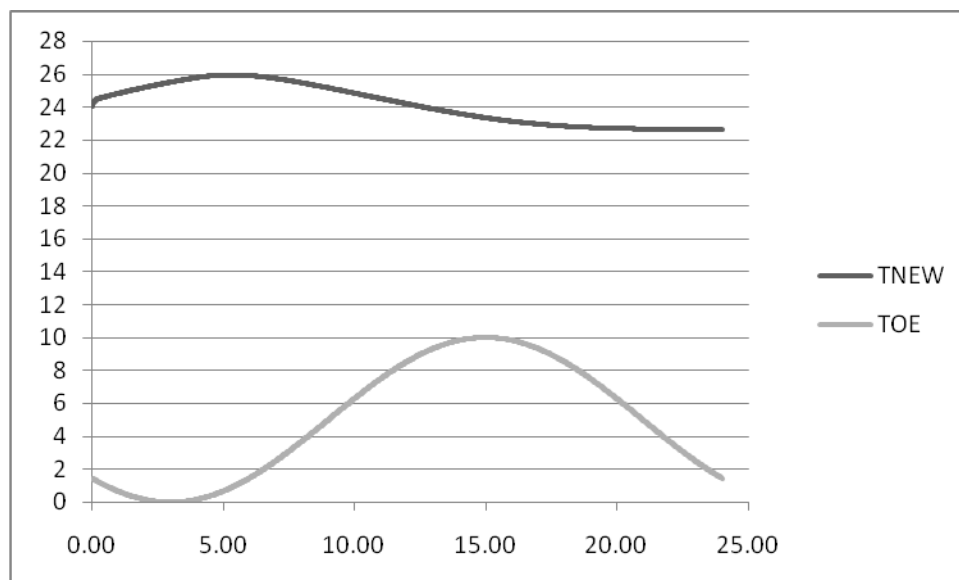
Σχήμα 6.6.1 Διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας σε κτιριακό κέλυφος με PCM των 24°C και εσωτερικό ψυκτικό φορτίο $Q[\text{W}]$.

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα, η κλιματιστική συσκευή, εφόσον υποθέσουμε πως περιλαμβάνει θερμοστάτη ρύθμισης της θερμοκρασίας στην επιθυμητή τιμή, θα λειτουργήσει μέχρι την 9.02 ώρα, έπειτα θα σταματήσει καθώς η

θερμοκρασία έχει πέσει κάτω από 24°C και θα λειτουργήσει εκ νέου μετά τις 24°C ώρες, καθώς μέχρι τότε η θερμοκρασία δεν αγγίζει τους 24°C. Λειτουργεί,επομένως στο εικοσιτετράωρο για 9 ώρες και 2'.

ΧΕΙΜΩΝΑΣ:

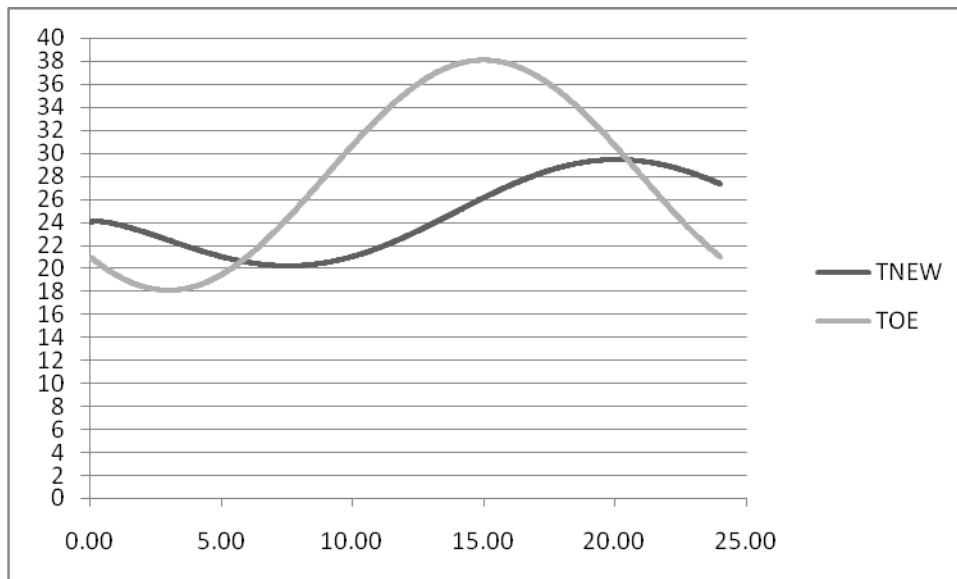
Εσωτερικό φορτίο θέρμανσης Q, επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία 25°C:



Σχήμα 6.6.2 Διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας σε κτιριακό κέλυφος με PCM των 24°C και εσωτερικό θερμικό φορτίο Q[W].

Στο παραπάνω διάγραμμα γίνεται εμφανές πως η συσκευή θέρμανσης θα λειτουργήσει τις 1.48 πρώτες ώρες, οπότε και θα αγγίξει η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου τους 25°C, στη συνέχεια θα σταματήσει μέχρι τις 9.5 ώρες (δηλαδή δε θα λειτουργήσει για 8.02 ώρες) και εν συνεχεία θα λειτουργήσει μέχρι τις 24 ώρες εφόσον η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους επιθυμητούς 25°C. Θα λειτουργήσει, δηλαδή, συνολικά για 15.98 ώρες στο εικοσιτετράωρο.

Παρακάτω, παρουσιάζεται διάγραμμα με την αντίστοιχη μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας σε κτιριακό κέλυφος μή μονωμένο, του οποίου τα στοιχεία περιλαμβάνουν τρία στρώματα (επίχρισμα, τούβλο ή σκυρόδεμα για οροφή, επίχρισμα), όπου υπάρχει το ίδιο ψυκτικό φορτίο κατά τον καλοκαιρινό μήνα:



Σχήμα 6.6.3 Διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας σε μη μονωμένο κτιριακό κέλυφος και εσωτερικό ψυκτικό φορτίο $Q[W]$.

Όπως είναι προφανές, σε μη μονωμένο κτιριακό κέλυφος, η κλιματιστική συσκευή πρέπει να λειτουργήσει περισσότερες ώρες από την περίπτωση μονωμένου με PCM κτιριακού κελύφους και συγκεκριμένα θα λειτουργήσει την πρώτη ώρα ως το 0.58 της ώρας όπου θα πέσει στους 24°C, στη συνέχεια από τις 13.17 ώρες μέχρι τις 24, δηλαδή 10.83, σχεδόν 12 ώρες στο σύνολο, τρεις ώρες παραπάνω δηλαδή από ότι στην περίπτωση του κελύφους με PCM.

6.7 Εφαρμογή του PCM στο δεύτερο (εξωτερικό) στρώμα του τοίχου και της οροφής και σύγκρισή του με την απλή μόνωση για καλοκαίρι και χειμώνα.

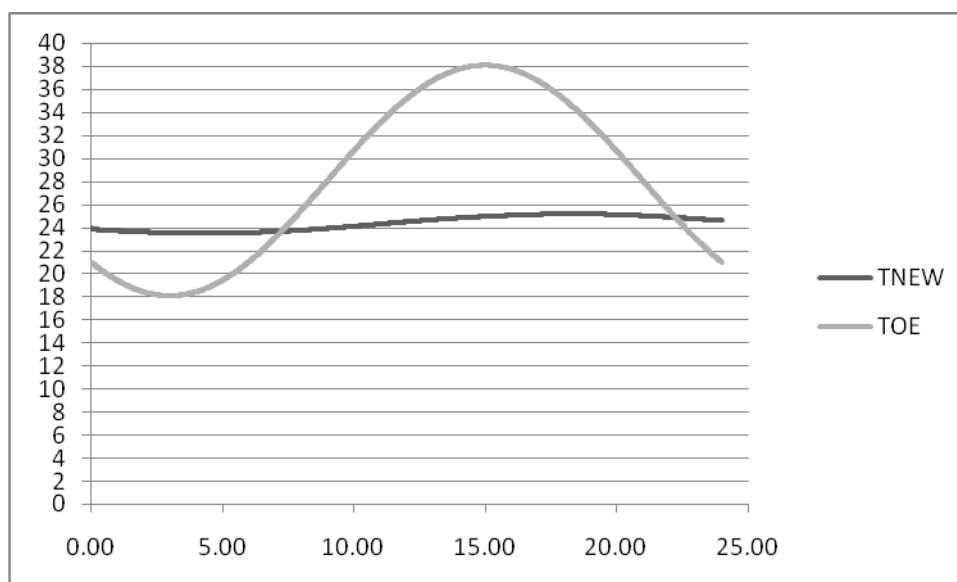
Όπως ειπώθηκε και στο 3^ο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους, ανάλογα με τη θέση της μόνωσης - στην εξωτερική ή εσωτερική επιφάνεια - οι τοίχοι και οι οροφές ενεργούν ως **φράγμα προστασίας** όταν το στρώμα θερμομόνωσης τοποθετείται στην **εσωτερική** τους επιφάνεια και ως **συσσωρευτές θερμότητας** όταν το στρώμα θερμομόνωσης τοποθετείται στην **εξωτερική** τους επιφάνεια.

Μέχρι τώρα, παρουσιάστηκε η πρώτη περίπτωση, η λειτουργία τους δηλαδή ως συσσωρευτές θερμότητας, όπου τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν πως τόσο το στρώμα PCM όσο και το στρώμα απλής συμβατικής μονώσεως έχουν παρόμοια θερμομονωτική συμπεριφορά το καλοκαίρι και λίγο καλύτερη η απλή μόνωση το χειμώνα.

Στην παρούσα παράγραφο, εξετάζεται η περίπτωση όπου οι τοίχοι και οι οροφές λειτουργούν ως συσσωρευτές θερμότητας, με το στρώμα θερμομόνωσης στην εξωτερική επιφάνειά τους (στο δεύτερο στρώμα μετά το επίχρισμα), και συγκρίνεται εκ νέου η λειτουργία του PCM με αυτή της απλής συμβατικής μονώσεως.

ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ:

PCM:

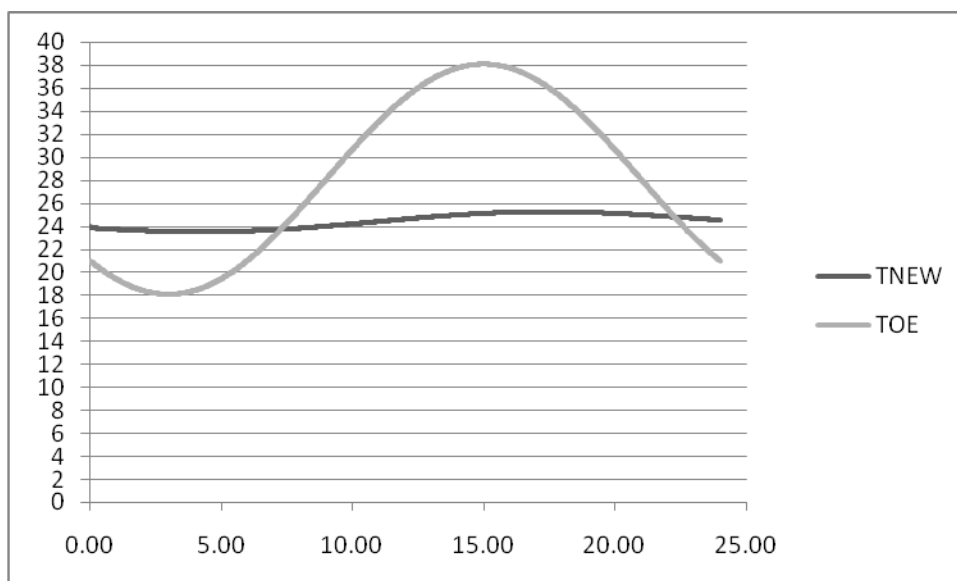


Σχήμα 6.7.1 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων το μήνα Ιούλιο (21^η).

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα, το PCM προσφέρει ιδιαίτερα καλή θερμομόνωση με ελάχιστη θερμοκρασία τους 23.511°C από τις 4.36 ως τις 4.41 ώρες εφαρμογής του και μέγιστο στους 25.187°C την 18.36 ώρα της εφαρμογής

του. Η θερμοκρασιακή διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας στο εικοσιτετράωρο είναι 1.676°C.

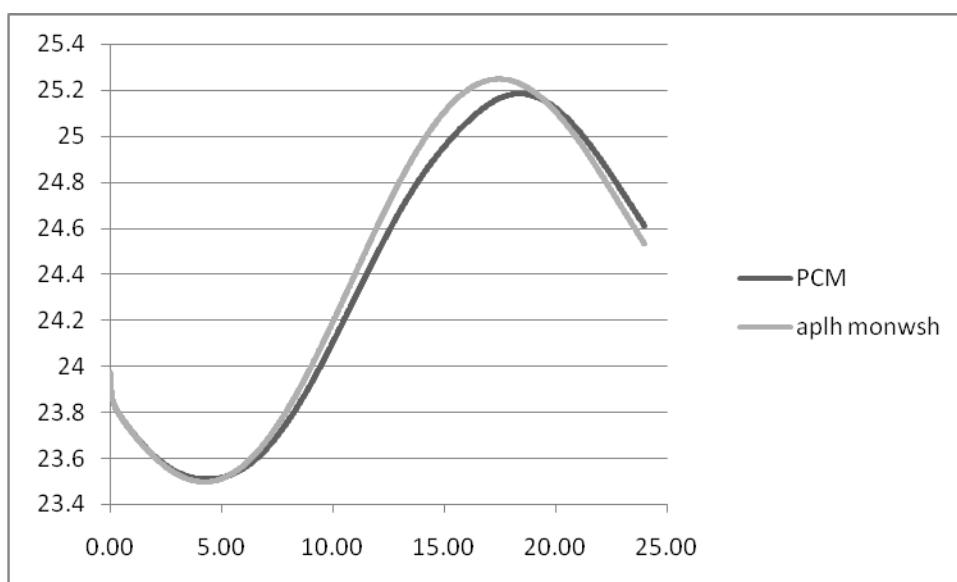
Απλή μόνωση:



Σχήμα 6.7.2 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με απλή μόνωση στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων το μήνα Ιούλιο(21^η).

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως η εφαρμογή απλής συμβατικής μονώσεως εξασφαλίζει ελάχιστη θερμοκρασία στους 23.498°C την 4.29 ώρα της εφαρμογής της και μέγιστο στους 25.248°C την 17.45 ώρα της εφαρμογής της. Η θερμοκρασιακή διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας στο εικοσιτετράωρο είναι 1.750°C.

Συγκριτικό διάγραμμα:



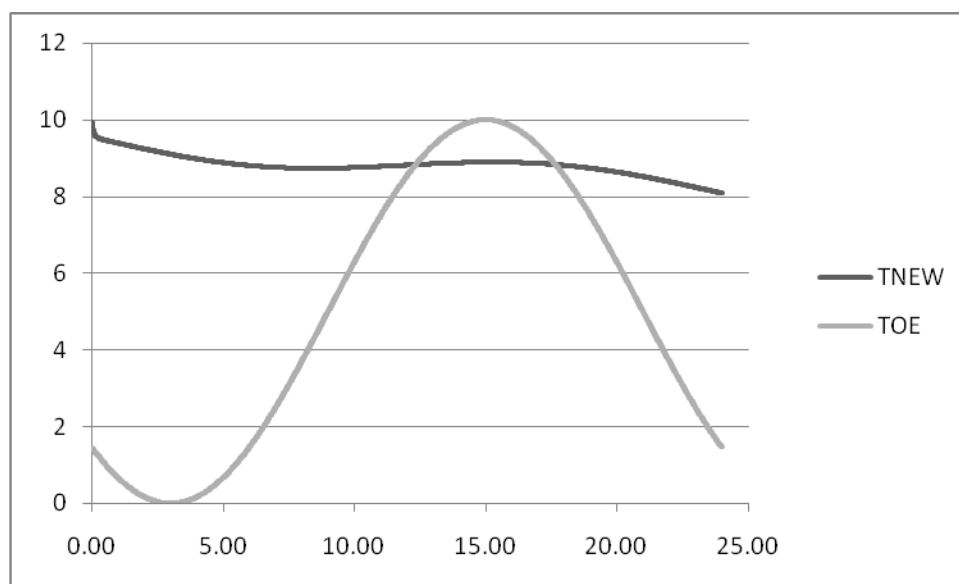
Σχήμα 6.7.3 Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C και (στη δεύτερη περίπτωση) απλή μόνωση στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων το μήνα Ιούλιο(21^η).

Όπως είναι φανερό στο παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα, αλλά όπως προκύπτει και από τις τιμές των θερμοκρασιών που υπολογίστηκαν, το PCM παρουσιάζει κατά τι καλύτερη θερμομονωτική συμπεριφορά από την απλή μόνωση, αφού η θερμοκρασιακή διακύμανση είναι κατά τι καλύτερη και παρουσιάζει μέγιστο με χρονική καθυστέρηση σχεδόν μια ώρα(0.91').

Έυλογη είναι η απορία γιατί με την αλλαγή θέσης του στρώματος της θερμομόνωσης από μέσα προς τα έξω μειώθηκε τόσο η θερμοκρασιακή διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Με τη μόνωση τοποθετημένη εσωτερικά, ο χώρος ζεσταίνεται / ψύχεται αμέσως όταν τεθεί σε λειτουργία η θέρμανση / κλιματισμός, αλλά και εξίσου γρήγορα ξαναψύχεται / ξαναζεσταίνεται με τη διακοπή της λειτουργίας (πολύ μικρή εως ανύπαρκτη θερμική αδράνεια) πράγμα που μειώνει τη θερμική άνεση. Στον αντίποδα, η εξωτερική θερμομόνωση οδηγεί σε μεγάλη θερμική αδράνεια, εξασφαλίζοντας πολύ μεγαλύτερη θερμική άνεση (πολύ αργότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας), με αντίτιμο την αργή ανταπόκριση στη θέρμανση / ψύξη. Η συνηθέστερη λύση σε νέα κτίρια κλασικής κατασκευής, με θερμομόνωση στο εσωτερικό της τοιχοποιίας και εξωτερικά στο σκελετό αποτελεί ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ των δύο.

ΧΕΙΜΩΝΑΣ:

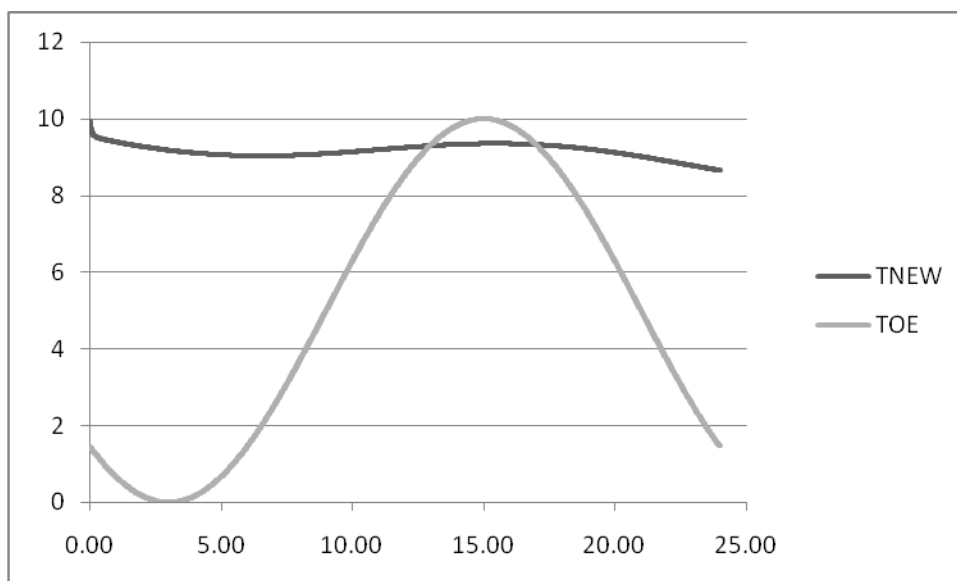
PCM:



Σχήμα 6.7.4 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων το μήνα Φεβρουάριο(21^η) και TITO=10°C.

Όπως γίνεται εμφανές στο διάγραμμα, η εσωτερική θερμοκρασία (ξεκινώντας από TITO=10°C) παρουσιάζει ένα πρώτο ελάχιστο στους 8.73°C την 8.5 ώρα της εφαρμογής του, στη συνέχεια ένα μέγιστο στους 8.89°C την 15.28 ώρα εφαρμογής του και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι τους 8.085°C στην ολοκλήρωση του εικοσιτετραώρου. Η θερμοκρασιακή διακύμανση μεταξύ πρώτου ελαχίστου και μεγίστου είναι 0.16°C.

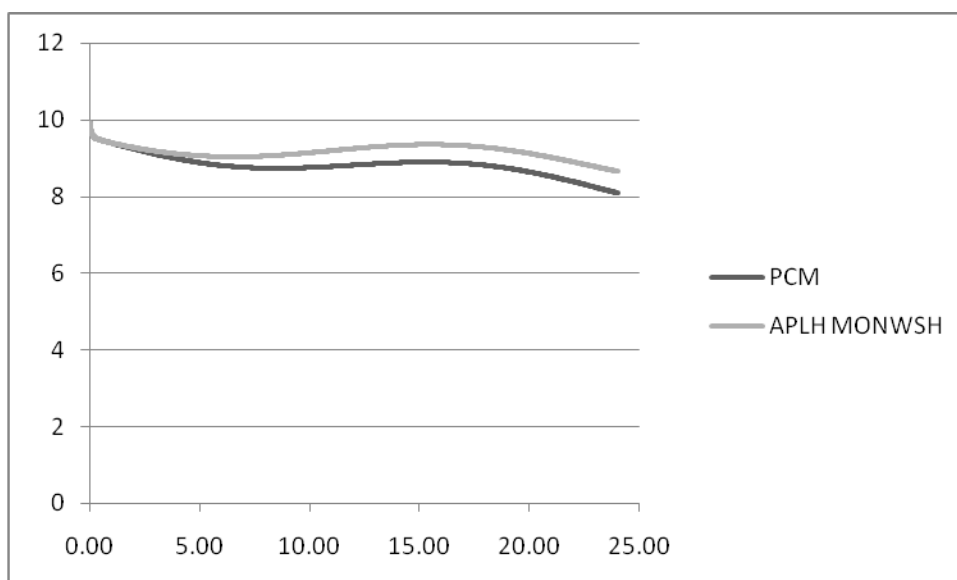
Απλή μόνωση:



Σχήμα 6.7.5 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με απλή μόνωση στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων το μήνα Φεβρουάριο(21^η) και TITO=10°C.

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα, η εσωτερική θερμοκρασία (ξεκινώντας από TITO=10°C) παρουσιάζει ένα πρώτο ελάχιστο στους 9.03°C την 6.53 ώρα της εφαρμογής του, στη συνέχεια ένα μέγιστο στους 9.35°C την 15.44 ώρα εφαρμογής του και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι τους 8.65°C στην ολοκλήρωση του εικοσιτετραώρου. Η θερμοκρασιακή διακύμανση μεταξύ πρώτου ελαχίστου και μέγιστου είναι 0.318°C.

Συγκριτικό διάγραμμα:



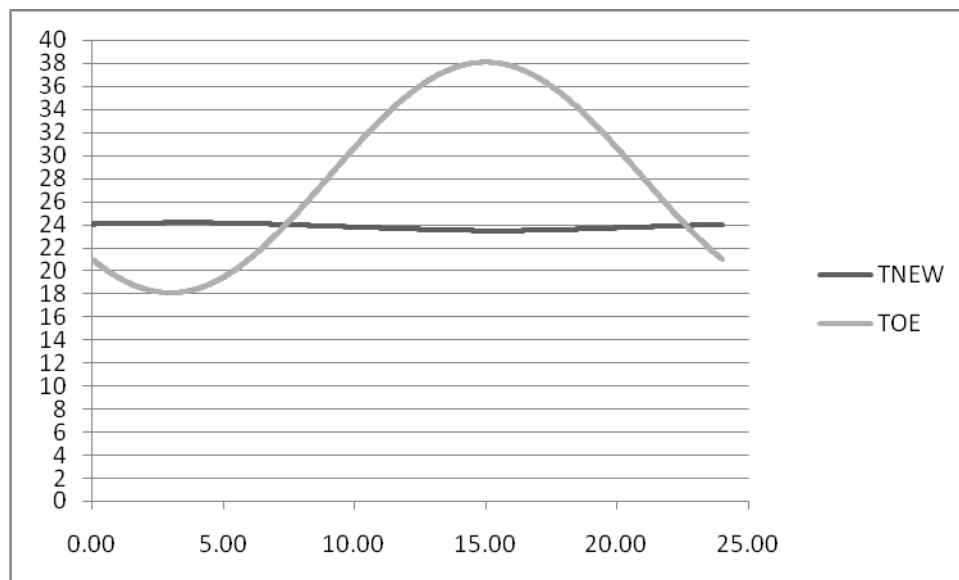
Σχήμα 6.7.6 Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C και (στη δεύτερη περίπτωση) απλή μόνωση στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων το μήνα Φεβρουάριο(21^η).

Στο συγκριτικό διάγραμμα, όπως και στις τιμές που προέκυψαν από το πρόγραμμα γίνεται εμφανές με την απλή μόνωση η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου διατηρείται σε λίγο υψηλότερα επίπεδα από ότι συμβαίνει με την εφαρμογή του PCM κατά μισό περίπου βαθμό, ωστόσο η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι κατά 0.16°C μικρότερη στην εφαρμογή του PCM. Είναι αναμενόμενο τα θερμοκρασιακά επίπεδα να είναι υψηλότερα στην εφαρμογή της απλής μόνωσης, καθώς η ειδική θερμική της αγωγιμότητα k είναι όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία[58] $0.038[\text{W}/\text{mK}]$, δηλαδή πολύ μικρότερη (περίπου το $\frac{1}{4}$) από εκείνη του εφαρμοζόμενου PCM ($0.15[\text{W}/\text{mK}]$). Επομένως, παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στη ροή θερμότητας από το PCM. Επίσης, πρέπει να τονισθεί πως το χειμώνα, στο εύρος θερμοκρασιών που λειτουργεί το PCM, είναι σε όλη τη λειτουργία του σε στερεή μορφή, λειτουργεί και αυτό δηλαδή σαν απλή μόνωση αφού δεν αποθηκεύει λανθάνουσα θερμότητα καθώς δεν αλλάζει φάση, επομένως η συγκριση τους έγκειται στη μεγάλη διαφορά της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας. Το πρώτο ελάχιστο στην περίπτωση του PCM εμφανίζεται δυο ώρες μετά από την εμφάνιση του αντίστοιχου ελαχίστου της απλής μόνωσης, ενώ παρουσιάζουν μέγιστα περίπου την ίδια ώρα.

Ας δούμε όμως και τη συμπεριφορά του PCM των 24°C στην περίπτωση εσωτερικού φορτίου το καλοκαίρι και το χειμώνα:

ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ:

Εσωτερικό ψυκτικό φορτίο Q , επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία 24°C :



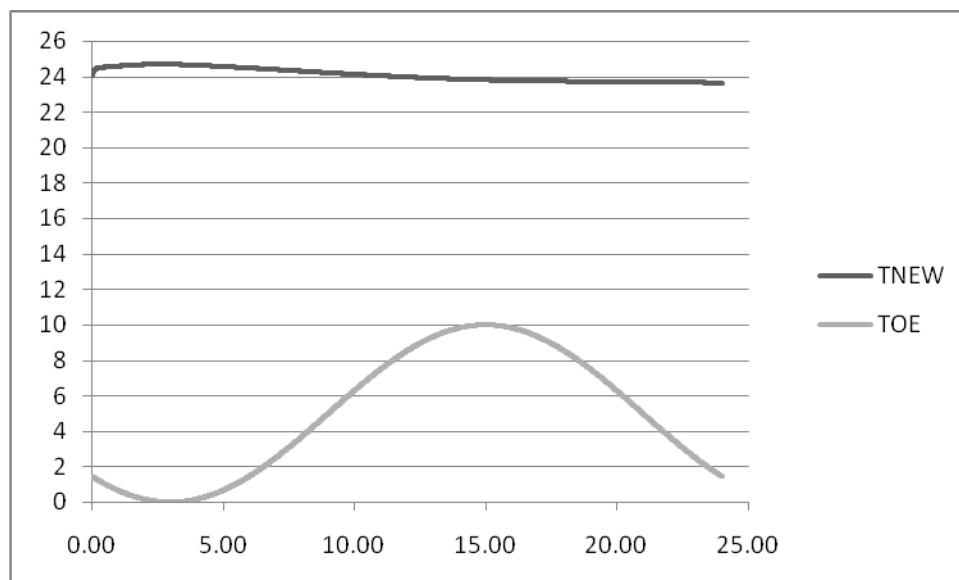
Σχήμα 6.7.7 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων με εσωτερικό ψυκτικό φορτίο.

Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα, το PCM των 24°C παρουσιάζει εξαιρετική μονωτική συμπεριφορά τοποθετημένο στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων του κελύφους καθώς η κλιματιστική συσκευή θα δουλέψει το πολύ για 7.15°C ώρες αν λάβουμε υπόψιν μας ότι θερμοκρασίες τις τάξεως του 24.0°C θεωρούνται άνω των

επιθυμητών 24°C βαθμών,επομένως θα λειτουργήσει. Μέγιστο στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται την 3.71 ώρα εφαρμογής στους 24.16°C και ελάχιστο την 15.46ώρα εφαρμογής στους 23.46°C, με μια θερμοκρασιακή δηλαδή διακύμανση 0.7°C.

ΧΕΙΜΩΝΑΣ:

Εσωτερικό φορτίο θέρμανσης Q,επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία 25°C:



Σχήμα 6.7.8 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων με εσωτερικό θερμικό φορτίο.

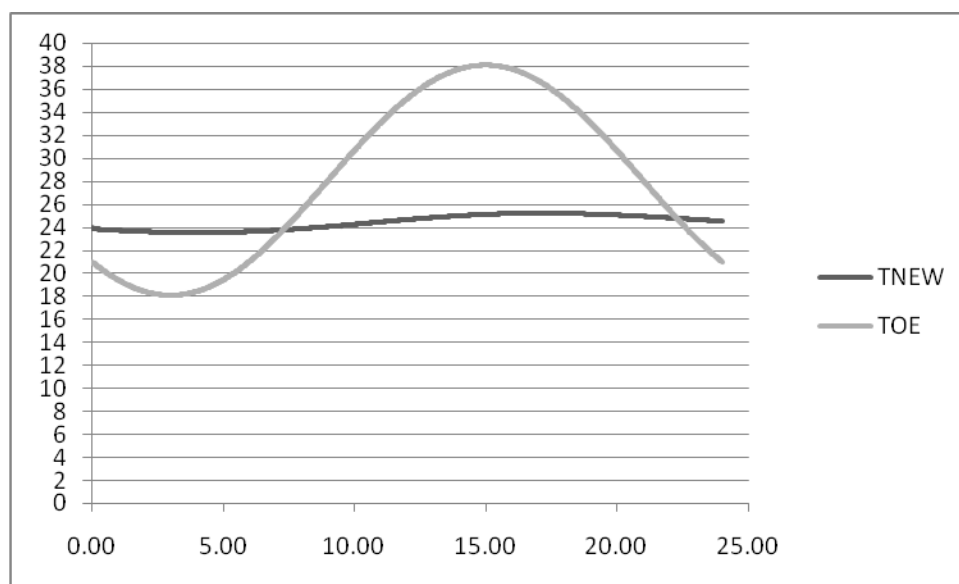
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα,με την εφαρμογή του PCM η συσκευή θέρμανσης, για επιθυμητή θερμοκρασία τους 25°C θα πρέπει να λειτουργήσει ολόκληρο το εικοσιτετράωρο καθώς η μέγιστη τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας δεν φτάνει ποτέ τους 25°C. Το μέγιστο είναι οι 24.69°C την 2.61 ώρα της εφαρμογής του. Βέβαια αυτό το αποτέλεσμα, υπό την υπόθεση ότι ο θερμοστάτης της συσκευής δουλεύει ακριβώς στους 25°C.

6.8 Εφαρμογή του PCM σε διπλό τοίχο και σύγκρισή του με απλή μόνωση.

Μέχρι τώρα, εξετάστηκε το απλούστερο είδος στοιχείων κτιριακού κελύφους, δηλαδή στοιχεία (πλαινά τοιχώματα και οροφή) που αποτελούνταν από τρία ή τέσσερα, στη περίπτωση μονωμένου κελύφους, στρώματα. Στην πράξη, ωστόσο, είναι δύσκολο το επίχρισμα να σταθεί απευθείας επάνω στη μόνωση. Για αυτόν και για αρκετούς ακόμη λόγους στατικής και όχι μόνο, εφαρμόζουμε το PCM ή την απλή μόνωση σε διπλό τοίχο, δηλαδή τοίχο που αποτελείται από δυό στρώματα τούβλου ανάμεσα στα οποία τοποθετείται η μόνωση, και στην περίπτωση της οροφής, όπως διαβάζουμε στη βιβλιογραφία[58], αποτελείται από ένα στρώμα σκυροδέματος, ένα αδιάβροχο στρώμα για στεγανοποίηση, ένα στρώμα μονώσεως (απλής ή PCM), ένα στρώμα σκυροδέματος και τέλος ένα στρώμα επιχρίσματος. Τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά είναι ακριβώς τα ίδια με εκείνα που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο (5.3), ενώ το στρώμα στεγανοποίησης έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την απλή μόνωση και πάχος 0.010m. Πρόκειται, με άλλα λόγια, για την περίπτωση θερμομονώσεως πυρήνα, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3 του πρώτου μέρους.

ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ:

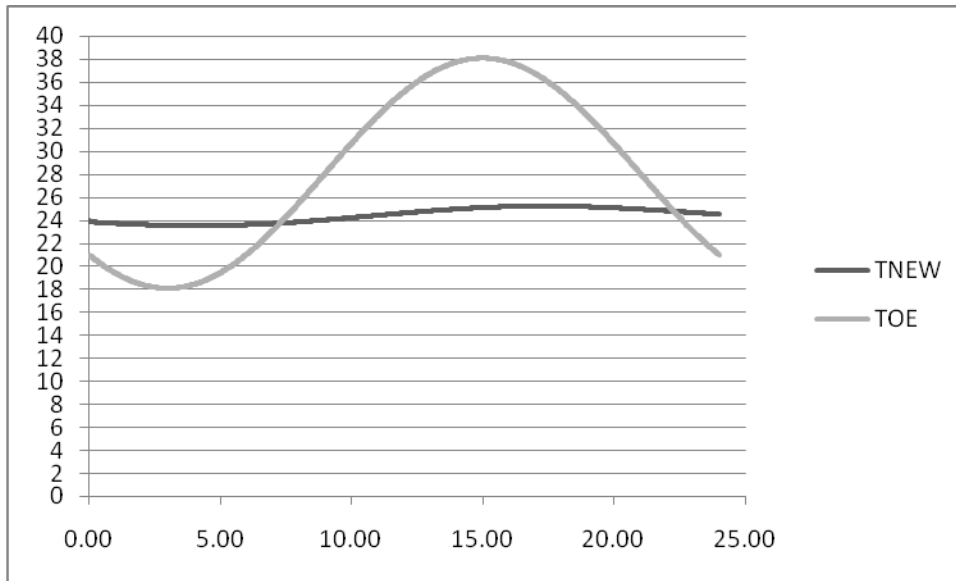
Το διάγραμμα που προκύπτει για την εφαρμογή PCM στη θέση του στρώματος της μονώσεως το μήνα Ιούλιο φαίνεται αμέσως παρακάτω:



Σχήμα 6.8.1 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C στο μέσο στρώμα διπλών τοίχων και οροφής το μήνα Ιούλιο(21^η).

Το διάγραμμα παρουσιάζει ελάχιστο στους 23.516°C την 4.04 ώρα εφαρμογής του, και μέγιστο στους 25.219°C την 17.09 ώρα εφαρμογής του. Η θερμοκρασιακή διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι 1.703°C.

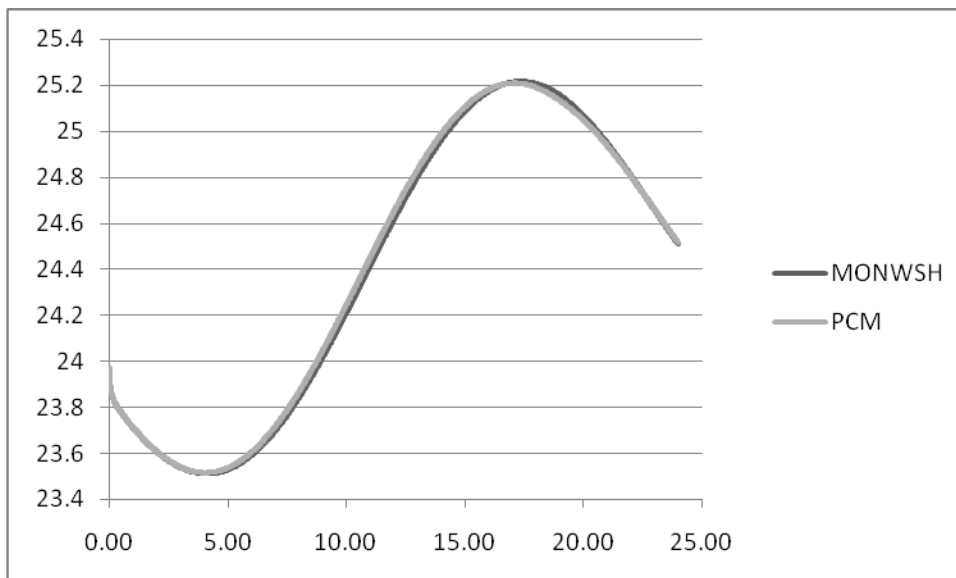
Το ίδιο διάγραμμα για απλή μόνωση είναι:



Σχήμα 6.8.2 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους απλή μόνωση στο μέσο στρώμα διπλών τοίχων και οροφής το μήνα Ιούλιο(21^η).

Το διάγραμμα παρουσιάζει ελάχιστο στους 23.512°C την 4.12 ώρα εφαρμογής του, και μέγιστο στους 25.216°C την 17.35 ώρα εφαρμογής του. Η θερμοκρασιακή διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι 1.704°C.

Όπως γίνεται φανερό και στο παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα της εφαρμογής της μονώσεως και του PCM στο συγκεκριμένο κτιριακό κέλυφος, οι καμπύλες "λειτουργίας" τους συμπίπτουν:

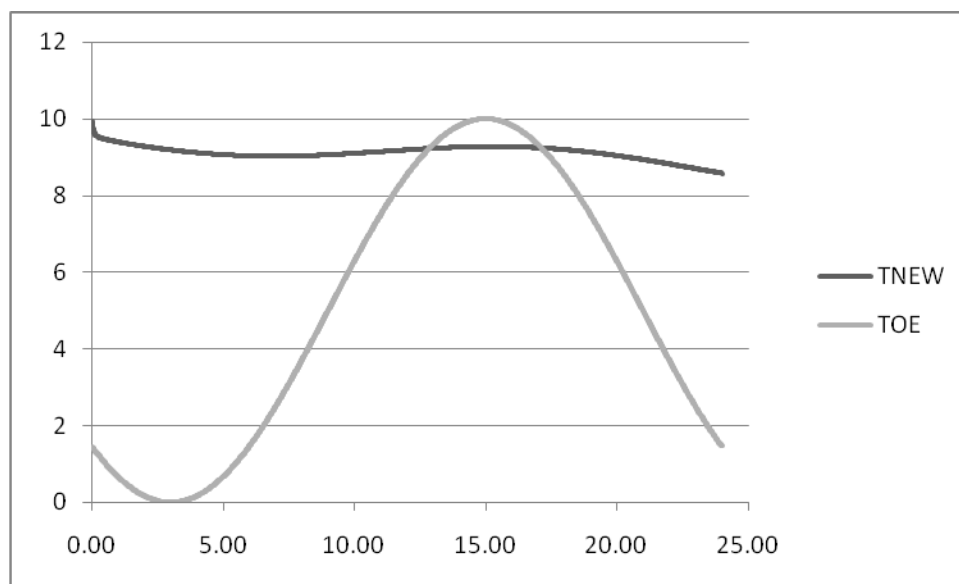


Σχήμα 6.8.3 Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C και (στη δεύτερη περίπτωση) με απλή μόνωση κατά το μήνα Ιούλιο(21^η)σε διπλούς τοίχους και οροφή.

Παρατηρούμε, επομένως, πως στο συγκεκριμένο κτιριακό κέλυφος το PCM και η απλή μόνωση εξασφαλίζουν τις ίδιες συνθήκες θερμικής άνεσης στο χώρο. Ας δούμε και τη συμπεριφορά τους το χειμώνα.

ΧΕΙΜΩΝΑΣ:

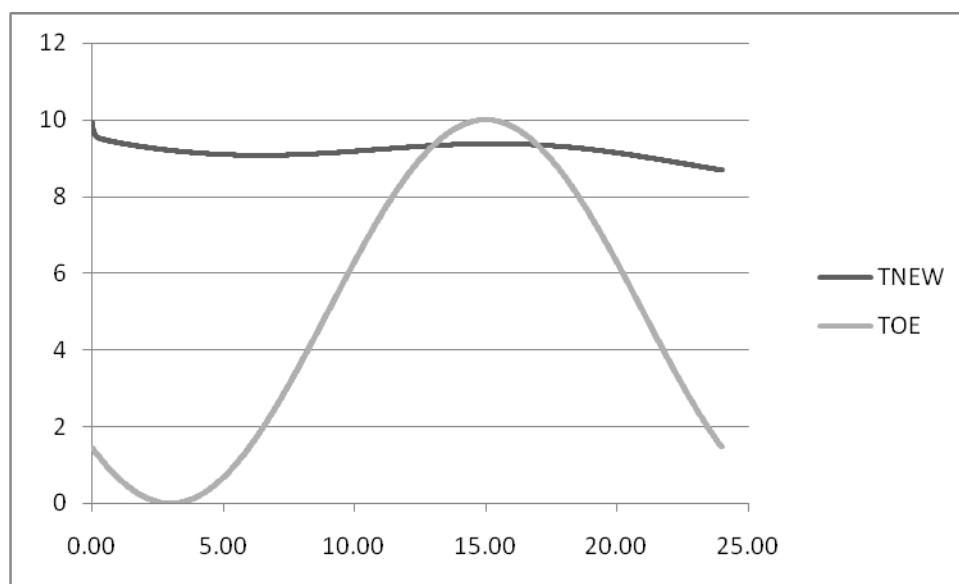
PCM:



Σχήμα 6.8.4 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C στο μέσο στρώμα διπλών τοίχων και οροφής το μήνα Φεβρουάριο(21^η).

Το διάγραμμα παρουσιάζει πρώτο ελάχιστο την 6.93 ώρα της εφαρμογής του PCM στους 9.02°C και στη συνέχεια μέγιστο την 15.28 ώρα εφαρμογής στους 9.27°C.

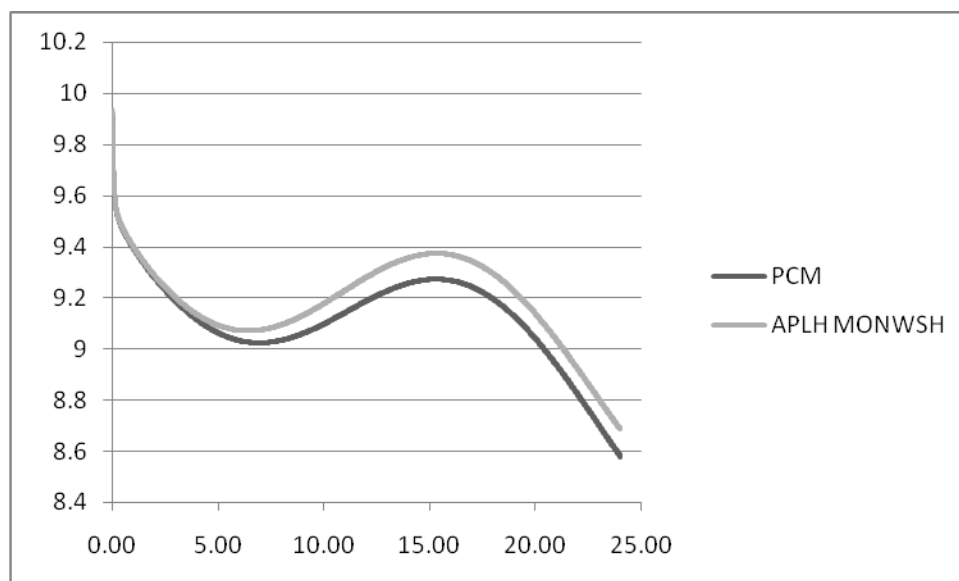
Απλή μόνωση:



Σχήμα 6.8.5 Διάγραμμα μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους απλή μόνωση στο μέσο στρώμα διπλών τοίχων και οροφής το μήνα Φεβρουάριο(21^η).

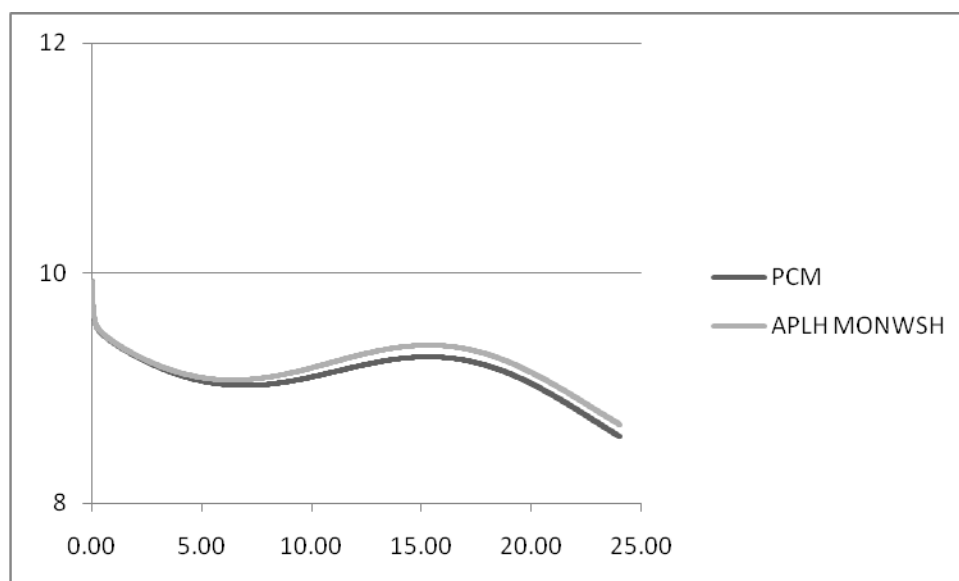
Το διάγραμμα παρουσιάζει πρώτο ελάχιστο την 6.40 ώρα της εφαρμογής του PCM στους 9.07°C και στη συνέχεια μέγιστο την 15.30 ώρα εφαρμογής στους 9.37°C.

Συγκριτικό διάγραμμα:



Σχήμα 6.8.6 Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C και (στη δεύτερη περίπτωση) με απλή μόνωση κατά το μήνα Φεβρουάριο(21^η)σε διπλούς τοίχους και οροφή.

Όπως παρατηρούμε στο συγκριτικό διάγραμμα και στις τιμές που προέκυψαν, στο διπλό τοίχο, η θερμική συμπεριφορά τόσο του PCM όσο και της απλής μόνωσης είναι παραπλήσια με μια πολύ μικρή διαφορά της απλής μόνωσης που εξασφαλίζει λίγο υψηλότερες θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου, της τάξεως του 0.10°C, δηλαδή σχεδόν αμελητέα. Ακολουθεί διάγραμμα μικρότερης ακρίβειας του άξονα y για εμφανέστερη ομοιότητα.



Σχήμα 6.8.7 Συγκριτικό διάγραμμα μεταβολής εσωτερικής θερμοκρασίας κτιριακού κελύφους με PCM των 24°C και (στη δεύτερη περίπτωση) με απλή μόνωση κατά το μήνα Ιούλιο(21^η)σε διπλούς τοίχους και οροφή(μικρότερη ακρίβεια θερμοκρασιών).

7.Γενικά συμπεράσματα

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, στο υπολογιστικό μέρος της παρούσης διπλωματικής εργασίας, μελετήθηκε η χρήση υλικών αλλαγής φάσης στη θερμομόνωση κτιριακού κελύφους και έγινε σύγκρισή της για διάφορες περιπτώσεις με την απλή συμβατική μόνωση των συγκεκριμένων θερμοφυσικών χαρακτηριστικών που δόθηκαν. Και τα δυο υλικά μελετήθηκαν σε ίδιο πάχος στρώματος και σε πανομοιότυπα στοιχεία (πλαινά τοιχώματα και οροφή) του κτιριακού κελύφους για να είναι εφικτή η σύγκριση.

Κατ'αρχήν, μελετήθηκε και επιλέχθηκε το κατάλληλο PCM για την περιοχή των Αθηνών και με βάση τα στοιχεία για τον καλοκαιρινό μήνα Ιούλιο. Από τη σύγκριση προέκυψε ως καταλληλότερο PCM εκείνο με σημείο τήξεως τους 24°C.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε στο προτελευταίο (δεύτερο από το εσωτερικό) στρώμα του εκάστοτε στοιχείου και μελετήθηκε η θερμική του συμπεριφορά για καλοκαίρι και χειμώνα. Η θερμομονωτική του δυνατότητα σε σύγκριση με το μη μονωμένο κτιριακό κέλυφος αποδείχθηκε αρκετά ικανοποιητική, ενώ στη σύγκριση με την απλή μόνωση, για την καλοκαιρινή περίοδο παρουσίασε παραπλήσια θερμομονωτική συμπεριφορά και τη χειμερινή περίοδο κατά τι λιγότερο ικανοποιητική από την απλή συμβατική μόνωση. Εξηγήσαμε και παραπάνω, πως αυτό ήταν αναμενόμενο εφόσον το χειμώνα το PCM είναι σε όλο το θερμοκρασιακό φάσμα στερεό, με ειδική θερμική αγωγιμότητα τετραπλάσια αυτή της απλής μόνωσης.

Έπειτα, παρουσιάστηκε η συμπεριφορά του PCM στην περίπτωση απαίτησης σταθερής εσωτερικής θερμοκρασίας με εφαρμογή ψυκτικού φορτίου για καλοκαίρι και θερμικού για χειμώνα. Η απόδοση του κρίνεται ικανοποιητική, καθώς η συσκευή κλιματισμού και θέρμανσης αντίστοιχα δούλεψαν για σχετικά λίγες ώρες στο εικοσιτετράωρο και σίγουρα λιγότερο από το μη μονωμένο κτιριακό κέλυφος, όπως συγκριτικά παρουσιάζεται.

Εν συνεχεία, το PCM και αντίστοιχα η απλή μόνωση τοποθετούνται στο δεύτερο εξωτερικό στρώμα των στοιχείων του κελύφους και παρατηρείται εκ νέου η συμπεριφορά τους την καλοκαιρινή περίοδο και τη χειμερινή. Η σύγκριση έδειξε πως η τοποθέτηση των υλικών σε αυτό το στρώμα έχει μεγαλύτερη απόδοση ως προς τη μείωση της διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας, καθώς αυτή μειώνεται αισθητά σε σχέση με την προηγούμενη θέση της μόνωσης. Η συμπεριφορά των δυο υλικών σε αυτή τη θέση συγκλίνει πολύ πιο αισθητά. Παρουσιάζεται εκ νέου η συμπεριφορά του στρώματος PCM σε εσωτερικό ψυκτικό φορτίο και εσωτερικό θερμικό φορτίο, που ωστόσο, ενώ παρουσιάζει εξαιρετική συμπεριφορά στον καλοκαιρινό μήνα καθώς η κλιματιστική συσκευή λειτουργεί πολύ λίγη ώρα, το χειμώνα δεν παρουσιάζει την ίδια αποδοτικότητα, με τη συσκευή θέρμανσης να λειτουργεί περίπου ολόκληρο το εικοσιτετράωρο.

Τέλος, το στρώμα θερμομόνωσης τοποθετείται στο μέσο διπλών τοίχων και αντίστοιχης δομής οροφής όπως προκύπτει από την ανάλογη βιβλιογραφία, και συγκρίνονται και πάλι για καλοκαίρι και χειμώνα. Εξετάζεται, με άλλα λόγια η περίπτωση θερμομονώσεως πυρήνα. Η σύγκριση πλέον, δείχνει πλήρη (σχεδόν για κάποια δεκαδικά) ταύτιση της θερμικής συμπεριφοράς των δυο υλικών.

Στην παρούσα εργασία παραλήφθηκαν ορισμένες περιπτώσεις που θεωρήθηκαν πλεονάζουσες για το σκοπό εκπονήσεώς της. Τέτοιες είναι η εφαρμογή εσωτερικού φορτίου για απλή μόνωση-η οποία παραλήφθηκε διότι στόχος ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά του PCM σε αυτή την περίπτωση-και η εφαρμογή φορτίου στο διπλό τοίχο, η οποία παραλήφθηκε διότι στόχος ήταν να αποδειχθεί η διαφορά της θερμικής αδράνειας του κτιριακού κελύφους στις περιπτώσεις εσωτερικής και εξωτερικής τοποθέτησης, καθώς όπως επισημάνθηκε στο κείμενο, με τη μόνωση τοποθετημένη εσωτερικά ο χώρος ζεσταίνεται / ψύχεται αμέσως όταν τεθεί σε λειτουργία η θέρμανση / κλιματισμός, αλλά και εξίσου γρήγορα ξαναψύχεται / ξαναζεσταίνεται με τη διακοπή της λειτουργίας ενώ στον αντίποδα, η εξωτερική θερμομόνωση οδηγεί σε μεγάλη θερμική αδράνεια, εξασφαλίζοντας πολύ μεγαλύτερη θερμική άνεση (πολύ αργότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας), με αντίτιμο την αργή ανταπόκριση στη θέρμανση / ψύξη. Αν και η συνηθέστερη λύση με θερμομόνωση στο εσωτερικό της τοιχοποιίας και εξωτερικά στο σκελετό αποτελεί ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ των δύο, αφηνεται μαζί με τις προαναφερθείσες παραλήψεις για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] <http://www.diplomatikoperiskopio.com>

“Το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα”, Ι. Παλούμπης

[2] Αθανάσιος Δ. Καρλής, Λέκτορας Πολυτεχνικής σχολής, Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης, “Το ενεργειακό πρόβλημα και οικολογικά οχήματα”

[3] <http://www.energeia.gr>

“Υψηλή ενεργειακή εξάρτηση της Ελλάδας”

[4] http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/ktiria_intro.htm

“Εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα”.

[5] Χ. Τζιβανίδης, Λέκτορας Ε.Μ. Πολυτεχνείου, Σημειώσεις Ε.Μ.Π., σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας
“Σημειώσεις για το μάθημα Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων” , Μάιος 2006

[6] Incropera F.P., DeWitt D.P., “Introduction to Heat Transfer”, John Wiley and Sons Publishing Co., New York, 1990

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_fusion

[8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercooling>

[9] Lane, G.A., Solar Heat Storage:

“Latent Heat Materials Volume I: Background and Scientific Principles. Vol. I.”, 1983, Florida: CRC Press, Inc.

[10] Lane, G.A.,

“Phase Change Materials for Energy Storage Nucleation to Prevent Supercooling, Solar Energy Materials and Solar Cells”, 27, 1991

[11] Zhang X.X., Fan Y.F., Tao X.M., Yick K.L.,

“Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes, Journal of colloid and interface Science”, 281, 2005

[12] Liu Z., Chung D.D.L.,

“Calorimetric evaluation of phase change materials for use as thermal interface materials,” Thermochemica Acta, 366, 2001

[13] <http://freespace.virgin.net/m.eckert/index.htm>

[14] V. Tyagi, D. Buddhi,

“Thermal Insulation of Buildings using Phase Change Materials, Energy and Buildings”, Vol 36, pp 132-138.

- [15] Abhat,
"Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Solar Energy* "30 (4) (1981)
- [16] D. Buddhi and R.L. Sawhney,
"Proceedings on thermal energy storage and energy conversion School of Energy and Environmental Studies", Devi Ahilya University, Indore, India (1994).
- [17] Y. Zhang and Y. Jiang,
"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)
- [18] Jong Hyeon Peck, Jae-Jun Kim, Chaedong Kang and Hiki Hong
"A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method"
- [19] H. Hong, S.K. Kim and Y.S. Kim,
"Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials", *International Journal of Refrigeration* (2004)
- [20] <http://en.wikipedia.org/wiki/Paraffin>
- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/Alkane>
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Fatty_acid
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_change_material#Technology
- [24] <http://www.pcm-solutions.com/consulting.html>
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_sulfate
- [26] Farid M.M., Khudhair M.A., Razack S.A.K., Al-Hallaj S.,
"A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management* 45", 2004
- [27] V. Metivaud, L. Ventola,
"Thermal Insulation of Buildings using Phase Change Materials, *Energy and Buildings*", Vol 36
- [28] Mohammed M. Farid Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack and Said Al Hallaj
"A review on phase change energy storage: materials and applications"
- [29] ,Atul Sharma, Lee Dong Won, D Buddhi, Jun Un Park
"Numerical heat transfer studies of the fatty acids for different heat exchanger materials on the performance of a latent heat storage system"
- [30] K. Lin, Y. Zhang,

“Experimental study of under-floor electric heating system,with shape- stabilized PCM plates, Energy and Buildings”, Vol 37, (pg215-220)

[31] K. Nagano, S. Tadeka,
“Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building thermal storage,Energy and Buildings”,Vol 38(pg436-446)

[32] P. Espeau, D. Mondieig,
“‘Active Package’ for thermal protection of food products,Packing Technology and Science”, Vol 10.

[33] <http://www.polyfoam.com>

[34] F. Tan, C. Tso,

“Cooling of mobile electronic devices using pcm, Applied thermal engineering”,Vol 24

[35] <http://www.mjm-engineering.com/telecomconsulting.html>

[36] <http://www.pcmenergy.com/products/telecom.htm>

[37] http://en.wikipedia.org/wiki/Base_Station_Subsystem

[38] L. Vasiliev, V. Burak,

“Latent storage modules for preheating internal combustion petrol engines,Applied Engineering”,Vol 20

[39] <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/techbr.pdf>

[40] <http://www.outlast.de>

[41] M. Huang, P. Eames,
“Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaic”, Int. J. Solar Energy

[42] Y. Rabin, B.Niv,
“Integrated Solar Collector storage system based on PCM,Solar Energy”, Vol 55

[43] S. Canbazoglu, A. Sahinaslan,
“Enhancement of solar thermal using pcm of solar water system”

[44] A.Vijay Padmaraju 1, M.Viginesh 1, N.Nallusamy

“COMPARITIVE STUDY OF SENSIBLE AND LATENT HEAT STORAGE SYSTEMS INTEGRATED WITH SOLAR WATER HEATING UNITS”. →
<http://www.icrepq.com/icrepq-08/218-vijay.pdf>

[45] B. Zalba. J. Martin,

“Free-cooling of buildings with phase change materials, International journal of refrigeration”, Vol 27

[46] L. Shiley, Z. Neng,
“Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter, Energy and Buildings”, Vol 38

[47] Vincenc Butala and Uroš Stritih University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia
“Experimental investigation of PCM cold storage”,

[48] Göran Hed, Doctoral Thesis Gävle, Sweden, October 2005
“Service Life Estimations in the Design of a PCM Based Night Cooling System”

[49] ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού
“Οδηγός θερμομόνωσης κτιρίων, Δεκέμβριος 2007”

[50] <http://www.greenroofs.gr/node/206>

[51] <http://www.cres.gr>

[52] K. Darkwa and P.W. O’Callaghan
“Simulation of phase change drywalls in a passive solar building”

[53] Κίμων Αντωνόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Πολυτεχνείου,
“Υπολογιστικές Μέθοδοι Φαινομένων Μεταφοράς”, Μέρος Πρώτο, Αθήνα 2005

[54] Ξενοφών Κ.Κακάτσιος, Καθηγητής Ε.Μ.Πολυτεχνείου,
“Μετάδοση θερμότητας”, Αθήνα 2002

[55] Κίμων Αντωνόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Πολυτεχνείου,
“Κλιματισμός”, Μέρος Πρώτο, Αθήνα 2007

[56] Γιώργος Μπεργελές, Καθηγητής Ε.Μ.Πολυτεχνείου,
“Υπολογιστική Ρευστομηχανική”, Αθήνα 2006

[57] John Shelley,
“Το πρώτο βιβλίο της Fortran 77”, Δεύτερη Έκδοση, εκδόσεις Μ.Γκιούρδας

[58] K. A. ANTONOPOULOS and C. TZIVANIDIS
“A CORRELATION FOR THE THERMAL DELAY OF BUILDINGS”
National Technical University of Athens, Mechanical Engineering Department,
Thermal Section, 31 March 1995

[59] Κίμων Αντωνόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Πολυτεχνείου,
“Θερμικά Ηλιακά Συστήματα”, Μέρος Πρώτο, Αθήνα 2007.