



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διδακτορική Διατριβή

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ
ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

ΜΑΡΙΑ Θ. ΠΛΥΤΑΡΙΑ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.
Μ.Δ.Ε. Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Χρήστος Τζιβανίδης (Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.)

ΑΘΗΝΑ, 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διδακτορική Διατριβή

**ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ
ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)**

**ENERGY SAVINGS IN SOLAR HEATING AND COOLING OF
BUILDINGS USING PHASE CHANGE MATERIALS (PCM)**

ΜΑΡΙΑ Θ. ΠΛΥΤΑΡΙΑ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Μ.Δ.Ε. Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας Ε.Μ.Π.

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

1. Χ. Τζιβανίδης, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
(Επιβλέπων)
2. Κ. Αντωνόπουλος, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Α. Στέγγου-Σαγιά, Καθ. Ε.Μ.Π.

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

1. Χ. Τζιβανίδης, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
2. Κ. Αντωνόπουλος, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Α. Στέγγου-Σαγιά, Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Ε. Ρογδάκης, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Δ. Χουντάλας, Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Ε. Γιακουμής, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Ε. Κορωνάκη, Αν. Καθ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2019

*Αφιερώνω
τη διδακτορική μου διατριβή
στους γονείς μου*

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε με την οικονομική υποστήριξη του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας του Ε.Μ.Π. για την περίοδο 2016 – 2019.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλιακής Ενέργειας και Κλιματισμού, του Τομέα Θερμότητας, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στα άτομα που συνέβαλαν στην εκπόνησή της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π., Χρήστο Τζιβανίδη, ο οποίος με υπομονή και κατανόηση με καθοδηγούσε πάντα σωστά δίνοντας μου κατάλληλες συμβουλές για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στο δεύτερο μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, στον Καθηγητή του Ε.Μ.Π., Κίμωνα Αντωνόπουλο, ο οποίος είχε ενεργό ρόλο στην επίβλεψη της διατριβής μου. Η διαρκής επικοινωνία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, από την επίβλεψη της διπλωματικής μου και της μεταπτυχιακής μου εργασίας μέχρι και τη διδακτορική μου διατριβή, με βοήθησε και μου έδωσε την κατάλληλη καθοδήγηση. Τον ευχαριστώ για την καίρια συμβολή του στην απόφασή μου να εκπονήσω διδακτορική διατριβή, καθώς και για την πολύτιμη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκειά της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το τρίτο μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, την Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., Αθηνά Στέγγου-Σαγιά για τη βοήθεια και την ευγένεια με την οποία με περιέβαλε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επταμελή εξεταστική επιτροπή για τη συνεργασία και την πρόθυμη συμμετοχή στην κρίση της διδακτορικής μου διατριβής.

Εκτός από τους καθηγητές, ιδιαίτερη μνεία και ένα μεγάλο ευχαριστώ αξίζει ο Μεταδιδακτορικός Ερευνητής του Ε.Μ.Π., Ευάγγελος Μπέλλος, ο οποίος με την εμπειρία του, λόγω των δεκάδων δημοσιεύσεών του και των εκατοντάδων κριτικών του σε διεθνή περιοδικά, με βοήθησε στην ερευνητική μου δραστηριότητα και εξέλιξη. Οι εύστοχες παρατηρήσεις του και οι εποικοδομητικές συμβουλές του συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διατριβής μου.

Επίσης, ευχαριστώ τον καλό φίλο και συνάδελφο Υποψήφιο Διδάκτορα Ιωάννη Αλεξόπουλο για την άριστη συνεργασία που είχαμε, καθώς και τους Υποψήφιους

Διδάκτορες Δημήτριο Κορρέ και Γεώργιο Μητσόπουλο που μοιραστήκαμε το ίδιο γραφείο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου αφιερώνοντάς τους τη διδακτορική μου διατριβή. Οι γονείς μου με στήριζαν πάντα στις αποφάσεις μου και συνεχίζουν να με στηρίζουν παρέχοντας την αμέριστη βοήθεια τους.

Τέλος, ευχαριστώ τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας του Ε.Μ.Π. για την οικονομική ενίσχυση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής.

Μ.Π.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση και ψύξη κτηρίων με Υλικά Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials-PCM), τα οποία έχουν μέχρι δεκαπλάσια αποθηκευτική ικανότητα, μέσα στα δομικά τους υλικά. Η ανάγκη ενεργειακής μελέτης πρωτότυπων συστημάτων, με απώτερο στόχο την προώθηση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον κτηριακό τομέα για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την εξάλειψη προβλημάτων που προκύπτουν λόγω της συνεχούς αύξησης της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος, αποτέλεσε κίνητρο για την παρούσα διατριβή.

Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία εξετάζει τη χρήση και τη βελτιστοποίηση ηλιακών συστημάτων, που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και τη ψύξη κτηρίων σε συνδυασμό με την χρήση PCM στο κτηριακό κέλυφος, με στόχο την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη σύγκριση με συμβατικά συστήματα. Αρχικά, εξετάζεται η επίδραση που έχουν τα PCM, ως προς την μείωση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων ενός μοντελοποιημένου κτηρίου χωρίς ηλιακά συστήματα. Στη συνέχεια εξετάζεται η λειτουργία των PCM σε μοντελοποιημένο κτήριο σε συνδυασμό με ηλιακά συστήματα. Ειδικότερα, η ηλιακή θέρμανση με τη σύζευξη ηλιακών συλλεκτών με αντλίες θερμότητας νερού για την κάλυψη των θερμικών φορτίων και η ηλιακή ψύξη με τη σύζευξη ηλιακών συλλεκτών με μηχανή απορρόφησης για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων με την ταυτόχρονη προσθήκη στρώματος PCM στο κέλυφος του κτηρίου, είναι οι κυριότερες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν ενεργειακά και οικονομικά. Οι προσομοιώσεις των συστημάτων έγιναν με το εμπορικό λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης TRNSYS που αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο υπολογιστικό εργαλείο για δυναμικές προσομοιώσεις εγκαταστάσεων. Το TRNSYS δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης όλων των στοιχείων των αναπτυσσόμενων συστημάτων και τη δυνατότητα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ τους έτσι ώστε η διαφορετική συμπεριφορά κάθε στοιχείου να επιδρά στη συμπεριφορά του άλλου.

Οι μεθοδολογίες και τα συστήματα που αναπτύχθηκαν επικυρώνονται και επαληθεύονται με πειραματικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα στη διεθνή βιβλιογραφία. Τέλος, μετά από παραμετρικές μελέτες προτείνεται το βέλτιστο σενάριο για κάθε σύστημα που οδηγεί σε μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση και σε μικρότερο κόστος υλοποίησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	9
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	17
ABSTRACT	21
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	23

A' ΜΕΡΟΣ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά	29
1.2 Η σημερινή παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση.....	30
1.3 Η ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα.....	37
1.4 Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια της Ελλάδας.....	46
Βιβλιογραφία 1 ^{ου} κεφαλαίου.....	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ηλιακή ενέργεια

2.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία.....	49
2.2 Γωνίες ήλιου και επιφανείας-χρήσιμες έννοιες και σχέσεις.....	53
2.3 Ηλιακή ενέργεια- Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	55

Ηλιακά συστήματα

2.4 Ηλιακοί συλλέκτες.....	56
2.4.1 Επίπεδοι συλλέκτες (Flat Plate Collectors)	56
2.4.2 Συλλέκτες με σωλήνα κενού (Evacuated Tube Collectors).....	60
2.4.3 Συγκεντροτικοί συλλέκτες (Concentrating Collectors)	64
2.5 Φωτοβολταϊκά συστήματα (PV).....	68
2.6 Θερμοφωτοβολταϊκά συστήματα (PV-Thermal)	74
Βιβλιογραφία 2 ^{ου} κεφαλαίου	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

3.1 Ηλιακά συστήματα για θέρμανση στα κτήρια.....	83
3.1.1 Ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης	84
3.1.2 Αντλίες θερμότητας	87
3.1.3 Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας	93

3.2 Ηλιακά συστήματα για ψύξη στα κτήρια	96
3.2.1 Ψύκτες απορρόφησης (absorption chiller)	97
3.2.2 Ψύκτες προσρόφησης (adsorption chiller)	99
3.2.3 Ψυκτικά συστήματα ανοικτού εξατμιστικού κύκλου	100
3.2.4 Ενδοδαπέδιο σύστημα δροσισμού	101
Βιβλιογραφία 3 ^{ου} κεφαλαίου	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ

Θερμική ενέργεια

4.1 Μεταφορά θερμότητας	107
4.2 Θερμική μάζα κτηρίου.....	112
4.3 Η θερμοχωρητικότητα των υλικών.....	112
4.4 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.....	114
4.4.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας	114
4.4.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας	117
4.4.3 Αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας	119

Υλικά αλλαγής φάσης (PCM)

4.5 Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)	121
4.5.1 Κατηγοριοποίηση των PCM	121
4.5.1.1 Οργανικά.....	122
4.5.1.2 Ανόργανα	124
4.5.1.3 Εύτηκτα	126
4.5.2 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων των PCM	127
4.5.2.1 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης -DSC	127
4.5.2.2 Διαφορική Θερμική Ανάλυση-DTA	128
4.5.2.3 Μέθοδος T-history	129
4.5.3 Μέθοδοι μοντελοποίησης της Αλλαγής Φάσης Υλικών	129
4.5.3.1 Μέθοδος Ενθαλπίας	130
4.5.3.2 Μέθοδος Ενεργού Θερμοχωρητικότητας	132
4.5.3.3 Μέθοδος της θερμικής πηγής	133
4.5.4 Μορφές συσκευασίας των PCM	134
4.5.4.1. Ενσωμάτωση σε κάψουλες	135
4.5.4.2 Σύνθετα υλικά	137
4.5.4.3 Άμεση ενσωμάτωση	137

4.5.4.4 Ενσωμάτωση με απορρόφηση.....	137
Βιβλιογραφία 4 ^{ου} κεφαλαίου.....	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

5.1 Εισαγωγή.....	143
5.2 Χρήση των PCM στο κέλυφος των κτηρίων.....	143
5.2.1 PCM σε τοίχους.....	144
5.2.2 PCM σε οροφές.....	149
5.2.3 PCM σε δάπεδο.....	152
5.3 Χρήση των PCM σε ενεργητικά συστήματα των κτηρίων	155
Βιβλιογραφία 5 ^{ου} κεφαλαίου	157

Β' ΜΕΡΟΣ: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ- ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ- ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

6.1 Λογισμικό TRNSYS	163
6.1.1 Type 56 (Κτήριο)	164
6.1.2 Εισαγωγή PCM στο λογισμικό TRNSYS.....	165
6.1.2.1 Type 1270 (PCM).....	165
6.2 Κτήρια με Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)	167
6.2.1 Επικύρωση του Type 1270 μέσω πειράματος σε τοίχους	167
6.2.2 Προσομοιώσεις κτηρίων με Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)	173
6.2.2.1 Κτήριο στην Αθήνα με PCM στην οροφή	173
6.2.2.2 Κτήριο στην Αθήνα με PCM στο νότιο και βόρειο τοίχο.....	185
6.2.3 Επικύρωση του Type 1270 μέσω πειράματος σε δάπεδο.....	200
6.2.4 Προσομοίωση κτηρίου στην Αθήνα με PCM στο δάπεδο	203
Βιβλιογραφία 6 ^{ου} κεφαλαίου	209

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

7.1 Εισαγωγή	215
7.2 Επικύρωση απλού ηλιακού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης μέσω πειραματικών δεδομένων.....	219
7.2.1 Πειραματικά δεδομένα.....	219

7.2.2	Επικύρωση απλού ηλιακού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης προσομοιωμένο με TRNSYS	223
7.3	Παραμετρική ανάλυση και βελτιστοποίηση ενός ηλιακά υποβοηθούμενου ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με στρώμα PCM στο δάπεδο κτηρίου	227
7.3.1	Γενικά	227
7.3.2	Περιγραφή εξεταζόμενου κτηρίου και χρησιμοποιούμενου PCM	228
7.3.3	Περιγραφή εξεταζόμενου συστήματος	231
7.3.4	Μαθηματική μοντελοποίηση	234
7.3.5	Προσομοίωση και αποτελέσματα	238
7.3.6	Ανάλυση αποτελεσμάτων	258
7.3.7	Ετήσια λειτουργία συστήματος	259
7.3.8	Συμπεράσματα	260
7.4	Οικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση ενδοδαπέδιων συστημάτων θέρμανσης με PCM και με ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας	261
7.4.1	Γενικά	261
7.4.2	Εξεταζόμενες περιπτώσεις και θεωρία	262
7.4.3	Τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία (components) στο TRNSYS	269
7.4.4	Μαθηματική μοντελοποίηση συστημάτων	272
7.4.5	Προσομοίωση και αποτελέσματα	276
7.4.6	Ανάλυση αποτελεσμάτων	296
7.4.7	Συμπεράσματα	299
	Βιβλιογραφία 7 ^{ου} κεφαλαίου	300

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΗΛΙΑΚΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

8.1	Εισαγωγή	305
8.2	Αριθμητική προσομοίωση ηλιακού συστήματος ψύξης με και χωρίς PCM στους τοίχους ακτινοβολίας ενός κτηρίου	309
8.2.1	Γενικά	309
8.2.2	Το εξεταζόμενο κτήριο	309
8.2.3	Το εξεταζόμενο σύστημα ψύξης	311
8.2.3.1	Ηλιακό σύστημα ψύξης με τοίχους ακτινοβολίας	311
8.2.3.2	Ηλιακό σύστημα ψύξης με στρώμα PCM μέσα στους τοίχους ακτινοβολίας	313

8.2.4 Χρησιμοποιούμενα στοιχεία (components) στο TRNSYS	314
8.2.5 Μαθηματική μοντελοποίηση	315
8.2.6 Προσομοίωση και αποτελέσματα	318
8.2.7 Ανάλυση αποτελεσμάτων	330
8.2.8 Ετήσια λειτουργία συστήματος	330
8.2.9 Συμπεράσματα	332
8.3 Ψύξη κτηρίου με πάνελ οροφής και PCM	333
8.3.1 Γενικά.....	333
8.3.2 Μοντέλο (Type) 399 του PCM.....	333
8.3.3 Προσομοίωση συστήματος πάνελ οροφής-PCM για ψύξη κτηρίου.....	338
Βιβλιογραφία 8 ^{ου} κεφαλαίου	343
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	
9.1 Εισαγωγή	351
9.2 Κυριότερα συμπεράσματα	353
9.3 Στοιχεία πρωτοτυπίας της διατριβής	358
9.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	360
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	
Δημοσιεύσεις συγγραφέα	363
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	
Ολοκληρωμένη διαμόρφωση εξεταζόμενων συστημάτων στο TRNSYS	365

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη και η μελέτη διαφόρων ηλιακών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και τη ψύξη κτηρίου σε συνδυασμό με τη χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials-PCM), τα οποία έχουν μέχρι δεκαπλάσια αποθηκευτική ικανότητα, μέσα στα δομικά του υλικά, με στόχο την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη σύγκριση με συμβατικά συστήματα. Ειδικότερα, η ηλιακή θέρμανση με τη σύζευξη ηλιακών συλλεκτών με αντλίες θερμότητας νερού για την κάλυψη των θερμικών φορτίων και η ηλιακή ψύξη με τη σύζευξη ηλιακών συλλεκτών με μηχανή απορρόφησης για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων με την ταυτόχρονη προσθήκη στρώματος PCM στο κέλυφος του κτηρίου, είναι οι κυριότερες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν ενεργειακά και οικονομικά για την Ελλάδα και συγκεκριμένα για την περιοχή της Αθήνας.

Η παρούσα διατριβή χωρίζεται σε δύο μέρη. Το Α' μέρος περιλαμβάνει πέντε κεφάλαια όπου γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος. Συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή που αναφέρεται η σημερινή ενεργειακή κατάσταση τόσο στην Ελλάδα όσο και παγκοσμίως. Παράλληλα αναφέρεται η ισχύουσα κατάσταση στην Ελλάδα όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτηριακό τομέα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται οι βασικές αρχές της ηλιακής ακτινοβολίας και στη συνέχεια αναλύονται οι αρχές λειτουργίας ηλιακών συστημάτων όπως επίπεδοι, συγκεντρωτικοί και με σωλήνες κενού συλλέκτες καθώς επίσης θερμοφωτοβολταϊκά και φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται η χρήση των ηλιακών συστημάτων στον κτηριακό τομέα και συγκεκριμένα παρουσιάζονται συστήματα που χρησιμοποιούνται για θέρμανση και για ψύξη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται οι βασικές αρχές της θερμικής ενέργειας όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας και στη συνέχεια αναλύονται τα PCM, δηλαδή περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας τους, οι ιδιότητες, οι κατηγορίες και οι μέθοδοι ενσωμάτωσής τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη χρήση και την εφαρμογή των PCM στο κέλυφος αλλά και στα ενεργητικά συστήματα των κτηρίων που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Το Β' μέρος περιλαμβάνει τέσσερα κεφάλαια στα οποία γίνεται η μοντελοποίηση πρωτότυπων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης κτηρίου, οι προσομοιώσεις και οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, στο έκτο κεφάλαιο γίνονται προσομοιώσεις, για θέρμανση και κλιματισμό κτηρίων με PCM στο κέλυφος (οροφή, τοίχοι, δάπεδο), με το λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης TRNSYS 17. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική αναφορά των βασικών υπολογιστικών μοντέλων του κτηρίου (Type 56) και του PCM (Type 1270). Η επικύρωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων γίνεται με σύγκριση πειραματικών δεδομένων που είναι διαθέσιμα στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναπτύσσονται και προσομοιώνονται πρωτότυπα συστήματα ηλιακής θέρμανσης κτηρίων με PCM στο κέλυφός τους με το λογισμικό TRNSYS 17. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση και βελτιστοποίηση ενός ηλιακά (επίπεδος συλλέκτης-FPC) υποβοηθούμενου ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με βοηθητική πηγή θερμότητας και με στρώμα PCM στο δάπεδο ενός κτηρίου. Η ιδέα του συστήματος ήταν το ζεστό νερό από έναν ηλιακό συλλέκτη να λειτουργεί ως πηγή θερμότητας για το PCM σε ένα σύστημα θέρμανσης δαπέδου. Επιπροσθέτως, γίνεται οικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση και σύγκριση τριών ενδοδαπέδιων συστημάτων θέρμανσης με στρώμα PCM στο δάπεδο και με ηλιακά διαφορετικές υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας νερού (σύστημα με επίπεδο συλλέκτη, σύστημα με θερμοφωτοβολταϊκό συλλέκτη, σύστημα με επίπεδο και φωτοβολταϊκό συλλέκτη). Στόχος των αξιολογήσεων και των βελτιστοποιήσεων των αναπτυσσόμενων συστημάτων είναι η μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση και το μικρότερο κόστος υλοποίησης. Επιπλέον, η επικύρωση των αποτελεσμάτων ενός απλού ηλιακού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με PCM στο δάπεδο κτηρίου γίνεται με σύγκριση πειραματικών δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνονται προσομοιώσεις συστημάτων για ηλιακή ψύξη κτηρίων με PCM στο κέλυφός τους με το λογισμικό TRNSYS 17 και 18. Ειδικότερα, γίνεται αριθμητική προσομοίωση και ανάλυση ενός ηλιακού συστήματος ψύξης με και χωρίς PCM στους τοίχους ακτινοβολίας ενός κτηρίου. Η σύζευξη ηλιακού συλλέκτη

σωλήνων κενού με μηχανή απορρόφησης και η ταυτόχρονη τοποθέτηση στρώματος PCM στους τοίχους ακτινοβολίας κτηρίου για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων αποτελεί ένα πρωτότυπο σύστημα ψύξης. Στη συνέχεια, μελετάται σύστημα ψύξης κτηρίου με πάνελ οροφής και στρώμα PCM χρησιμοποιώντας το νέο μοντέλο του TRNSYS 18 (Type 399) για την μοντελοποίηση του PCM. Συγκεκριμένα έγινε σύγκριση των διακυμάνσεων των εξωτερικών και των εσωτερικών θερμοκρασιών γραφείου με PCM για τα μετεωρολογικά δεδομένα της Γερμανίας (Βερολίνο) και της Ελλάδας (Αθήνα).

Τέλος, τα συμπεράσματα, τα στοιχεία πρωτοτυπίας και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάζονται στο ένατο κεφάλαιο. Γενικότερα, αποδείχθηκε ότι η εφαρμογή των PCM στο κέλυφος των κτηρίων σε συνδυασμό με ηλιακά συστήματα μειώνει τα θερμικά και τα ψυκτικά φορτία του κτηρίου επιτυγχάνοντας ομαλή διακύμανση των εσωτερικών θερμοκρασιών.

ABSTRACT

The objective of this dissertation is the development and the study of various solar systems used for the heating and the cooling of buildings in combination with the application of Phase Change Materials (PCM), which have up to tenfold storage capacity, in their building materials, aiming the minimization of energy consumption and the comparison with conventional systems. In particular, solar heating by coupling solar collectors with water heat pumps to cover heating loads and solar cooling by coupling solar collectors with an absorption chiller to cover cooling loads with the simultaneous addition of a PCM layer to the building envelope are the main technologies which were developed and studied energetically and financially for Greece and specifically for the location of Athens.

This dissertation is divided into two parts. The first part contains five chapters in which a literature review of the subject is presented. Specifically, in the first chapter there is an introduction that refers to the energy situation of today in Greece as well as in the world. At the same time, the current situation in Greece, regarding the energy savings in the building sector, is mentioned.

The second chapter gives the basic principles of solar energy and analyzes the principles of operation of solar systems such as flat plate collectors, concentrated collectors and evacuated tube collector as well as thermal-photovoltaic and photovoltaic systems.

Chapter 3 deals with the use of solar systems in the building sector and particularly for heating and cooling.

Chapter 4 gives the basic principles of thermal energy in heat transfer and analyzes PCMs, namely their operation, their properties, their categories and their methods of integration.

In the fifth chapter, there is a reference to the use and the application of PCM in the building's envelope as well as in the active systems of buildings, which were found in the international literature.

The second part contains four chapters in which the modeling of novel heating and cooling systems, the simulations and the comparisons of results are presented.

Specifically, in the sixth chapter simulations are made, for heating and cooling of buildings with PCM in the building's envelope (roof, walls, floor), with the energy simulation software TRNSYS 17. In addition, the basic computational models of the building (Type 56) and PCM (Type 1270) are analyzed in detail. The validation of the results of the simulations is done by comparing experimental data from the international literature.

In chapter 7, novel solar heating systems with PCM in the floor of a building are developed and simulated with the TRNSYS 17 software. Specifically, a parametric analysis and optimization of a solar assisted underfloor heating system with an auxiliary heat source and a PCM layer on the floor of a building is carried out. The idea of the system was the warm water from a solar collector to act as a heat source for the PCM in a floor heating system. In addition, there is an energetic, a financial evaluation and a comparison of three underfloor PCM heating systems and different solar-assisted water heat pumps (system with FPC, PVT and FPC-PV). The goal of these optimizations of developing systems is to reduce energy consumption and costs. In addition, the validation of the results of a simple solar underfloor heating system with PCM on the floor is made by comparing experimental data from the international literature.

In chapter 8, simulations of systems for solar cooling of buildings with PCM in their walls with the software TRNSYS 17 and 18 are made. In particular, a numerical simulation of a solar cooling system with and without phase change materials in radiant walls of a building is carried out. The coupling of an evacuated tube collector with an absorption chiller and the simultaneous application of a PCM layer on the building's radiant walls to cover the cooling loads is a novel cooling system. Next, a roof cooling system and a PCM layer is studied using the new model of TRNSYS 18 (Type 399) to model the PCM. In particular, outdoor and indoor temperature fluctuations with PCM, are being compared for the meteorological data of Germany (Berlin) and Greece (Athens).

Finally, the conclusions, the originality of the data and the proposals for future research of this dissertation are presented in chapter 9. In general, it has been proved that the application of PCMs to the building's envelope in combination with solar systems reduces the heating and cooling needs of the building by achieving a normal fluctuation of indoor temperature.

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ΛΑΤΙΝΙΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑ

A_c	Επιφάνεια συλλέκτη, m^2
b	Συντελεστής θερμοκρασίας απόδοσης κελιού, K^{-1}
C	Κόστος, €
C	Κόστος επένδυσης (κεφαλαίου), €
CF	Ετήσια χρηματοροή συστήματος, €
CF_0	Ετήσια χρηματοροή συστήματος αναφοράς με λέβητα, €
C_0	Κόστος κεφαλαίου του συστήματος αναφοράς με λέβητα, €
c_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα, $kJ/kg K$
$c_{p,liquid}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα στην υγρή φάση, $kJ/kg K$
$c_{p,solid}$	Ειδική θερμοχωρητικότητα στην στερεή φάση, $kJ/kg K$
d_r	Διάμετρος σωλήνα, m
d_x	Απόσταση σωλήνων, m
f	Ηλιακή κάλυψη, -
F'	Παράγων απόδοσης συλλέκτη, -
F_R	Παράγων θερμικής απολαβής συλλέκτη, -
$F_R(\tau\alpha)$	Συντελεστής οπτικών απωλειών συλλέκτη, -
$F_R U_L$	Συντελεστής θερμικών απωλειών συλλέκτη, $W/m^2 K$
G_T	Ολική στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια, W/m^2
h	Συντελεστής συναγωγής, $W/m^2 K$
I	Ένταση ρεύματος, A
k	Θερμική αγωγιμότητα, $W/m K$
K_{el}	Κόστος ηλεκτρισμού, $€/kWh$

K_{heat}	Κόστος θέρμανσης, €/kWh
$K_{\text{O\&M}}$	Κόστος λειτουργίας και συντήρησης, €
m	Παροχή μάζας, kg/s
m_{pcm}	Μάζα υλικού αλλαγής φάσης, kg
m_{und}	Παροχή μάζας στο ενδοδαπέδιο σύστημα, kg/s
N	Διάρκεια ζωής επένδυσης, έτη
P_{el}	Ηλεκτρική παραγωγή ηλιακού συλλέκτη, kW
P_{grid}	Ηλεκτρική κατανάλωση, kW
Q	Θερμότητα, kW
Q_{hp}	Θερμότητα στην αντλία θερμότητας, kW
Q_{load}	Θερμικό φορτίο στο κτήριο, kW
Q_{Phase}	Λανθάνουσα θερμότητα του PCM, kJ/kg
q_1, q_2	Ποσότητες εισροής ενέργειας στο PCM στο TRNSYS, kW
r	Επιτόκιο αναγωγής χρήματος, %
Re	Αριθμός Reynolds, -
S	Απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία, W/m ²
T	Θερμοκρασία, °C
U_b	Συντελεστής απωλειών πυθμένου συλλέκτη, W/m ² K
U_e	Πλευρικός συντελεστής απωλειών συλλέκτη, W/m ² K
U_L	Ολικός συντελεστής απωλειών συλλέκτη, W/m ² K
U_t	Συντελεστής απωλειών κορυφής συλλέκτη, W/m ² K
V	Όγκος δοχείου αποθήκευσης, m ³

ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑ

β	Κλίση συλλέκτη, °
γ	Γωνία αζιμουθίου επιφανείας, °
δ	Ηλιακή απόκλιση, °
ΔC	Διαφορά στο κόστος κεφαλαίου, €
ΔCF	Ετήσια χρηματοροή, €
ε_p	Συντελεστής εκπομπής, -
η_{el}	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, -
η_{th}	Θερμικός βαθμός απόδοσης, -
η_{tot}	Συνολικός βαθμός απόδοσης, -
θ_z	Γωνία ζενίθ, °
λ_w	Θερμική αγωγιμότητα νερού, W/m K
λ_r	Θερμική αγωγιμότητα υλικού σωλήνων, W/m K
ρ	Πυκνότητα, kg/m ³
σ	Πάχος τοίχου σωληνώσεων, m
(τα)	Γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας συλλέκτη, -
φ	Γεωγραφικό πλάτος, °

ΔΕΙΚΤΕΣ

abs	ψύκτης απορρόφησης
aux	βοηθητικό
B	κτήριο
boiler	λέβητας
bat	μπαταρία
c	συλλέκτης

$c_{,in}$	είσοδος συλλέκτη
$c_{,out}$	έξοδος συλλέκτη
e	κορυφή συλλέκτη
el	ηλεκτρικός
en	ενεργητικός
$f_{,in}$	είσοδος ρευστού
$f_{,out}$	έξοδος ρευστού
h	θέρμανση
h,s	σύστημα θέρμανσης
hp	αντλία θερμότητας
in	είσοδος
inv	μετατροπέας
l	φορτίο
$liquid$	υγρή κατάσταση
$loss$	θερμικές απώλειες δοχείου αποθήκευσης
max	μέγιστο
min	ελάχιστο
mp	μέγιστη ισχύς
nom	ονομαστική ψύξη
out	έξοδος
ref	συνθήκες αναφοράς
s	ηλιακός
$solid$	στερεή κατάσταση
$stored$	δοχείο αποθήκευσης

t	δοχείο
th	θερμικός
tot	συνολικός
u	ωφέλιμος
und	ενδοδαπέδιο
w _{,in}	είσοδος τοίχου
w _{,out}	έξοδος τοίχου

AKΡΩΝΥΜΙΑ

COP	Συντελεστής συμπεριφοράς (Coefficient of performance)
ETC	Συλλέκτης με σωλήνες κενού (Evacuated tube collector)
FPC	Επίπεδος συλλέκτης (Flat plate collector)
HVAC	Θέρμανση, αερισμός και ψύξη (Heating, ventilation and air conditioning)
NOCT	Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κελιού (Nominal operating cell temperature)
PCM	Υλικό αλλαγής φάσης (Phase change material)
PV	Φωτοβολταϊκό (Photovoltaic)
PVT	Θερμο-φωτοβολταϊκός συλλέκτης (Thermo-photovoltaic collector)
SPP	Απλός χρόνος αποπληρωμής (Simple payback period)
TABS	Θερμικά ενεργητικά συστήματα κτηρίου (Thermally activated building systems)
TES	Αποθήκευση θερμικής ενέργειας (Thermal energy Storage)
TESS	Thermal Energy System Specialists
TFC	Συνολική κατανάλωση καυσίμου (Total Fuel Cost)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**1.1 Γενικά**

Ο άνθρωπος, από τα πρώτα του βήματα πάνω στη γη, αισθάνθηκε την ανάγκη της ενέργειας. Η πρώτη μορφή ενέργειας, που χρησιμοποίησε ήταν η μυϊκή του δύναμη (ανθρώπινη ενέργεια). Στη συνέχεια χρησιμοποίησε την ενέργεια των ζώων (ζωική ενέργεια). Τέλος ανακάλυψε ότι η ίδια η φύση του προσέφερε διάφορες μορφές ενέργειας (π.χ. από το νερό, από τον ήλιο, από τον άνεμο), που έπρεπε ο ίδιος με τη νοημοσύνη του να αξιοποιήσει. Οι μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα είναι:

- Τα στερεά καύσιμα (γαιάνθρακας, λιγνίτης)
- Τα υγρά καύσιμα (πετρέλαιο, βενζίνη)
- Τα αέρια καύσιμα (φυσικό αέριο, υγραέριο)
- Η υδροηλεκτρική ενέργεια
- Η πυρηνική ενέργεια
- Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, η βιομάζα, οι οποίες έχουν άμεση σχέση με την ηλιακή ενέργεια.

Το ποσοστό χρησιμοποίησης των διαφόρων μορφών ενέργειας διαφέρει από χώρα σε χώρα και εξαρτάται κυρίως από την ύπαρξη εγχώριων ενεργειακών πόρων, τη γεωγραφική θέση και άλλες ειδικές συνθήκες.

Οι μορφές ενέργειας που βρίσκουμε στη φύση, όπως ο γαιάνθρακας, το αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, ονομάζονται πρωτογενείς μορφές ενέργειας. Τις μορφές αυτές δεν μπορεί, τις περισσότερες φορές, να τις αξιοποιήσει η τεχνολογία μας. Για παράδειγμα, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε γαιάνθρακα ή αργό πετρέλαιο για την κίνηση των αυτοκινήτων, ούτε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ουράνιο για φωτισμό. Εκτός, λοιπόν από ένα μικρό ποσοστό πρωτογενών μορφών ενέργειας, που χρησιμοποιείται αυτούσιο στον καταναλωτή, το υπόλοιπο μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας που ονομάζονται δευτερογενείς μορφές ενέργειας, και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, τις μεταφορές και την οικιακή/εμπορική οικονομία. Έτσι το αργό πετρέλαιο μετατρέπεται σε βενζίνη, πετρέλαιο ντίζελ, μαζούτ και κηροζίνη για να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία και στις μεταφορές, ο γαιάνθρακας χρησιμοποιείται αυτούσιος στη βιομηχανία για την παραγωγή ατμού, είτε χρησιμοποιείται για την παραγωγή κωκ, που

είναι απαραίτητο στη μεταλλουργία και στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα πυρηνικά καύσιμα και η υδραυλική ενέργεια χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κτλ. Εξάιρεση αποτελεί το φυσικό αέριο το οποίο χρησιμοποιείται αυτούσιο στην οικιακή και εμπορική οικονομία (85%) και το υπόλοιπο στη χημική βιομηχανία και την ηλεκτροπαραγωγή.

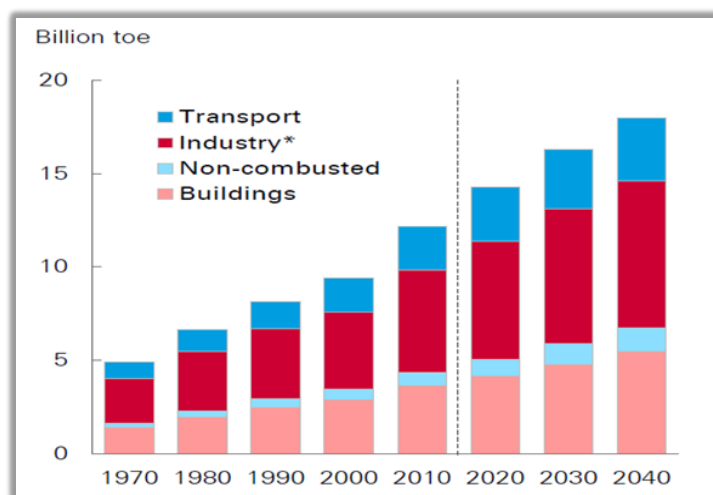
1.2 Η σημερινή παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση

Η ενέργεια διαδραματίζει κύριο ρόλο στην αύξηση του σύγχρονου βιοτικού επιπέδου σε όλο τον κόσμο. Η άνοδος του βιοτικού επιπέδου για την επέκταση του πληθυσμού σε όλο τον κόσμο σημαίνει μια εξάρτηση από μια αξιόπιστη σύγχρονη ενέργεια. Μέχρι το 2040, ο παγκόσμιος πληθυσμός αναμένεται να φθάσει τα 9.2 δισ., από 7.4 δισ. που είναι σήμερα. Επιπλέον, αναμένεται αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης κατά περίπου 25% μέχρι το έτος 2040 [1.1]. Ο κόσμος θα πρέπει να επιστρατεύσει όλες τις οικονομικές πηγές ενέργειας για να συμβαδίσει με αυτή τη σημαντική αύξηση της ζήτησης.

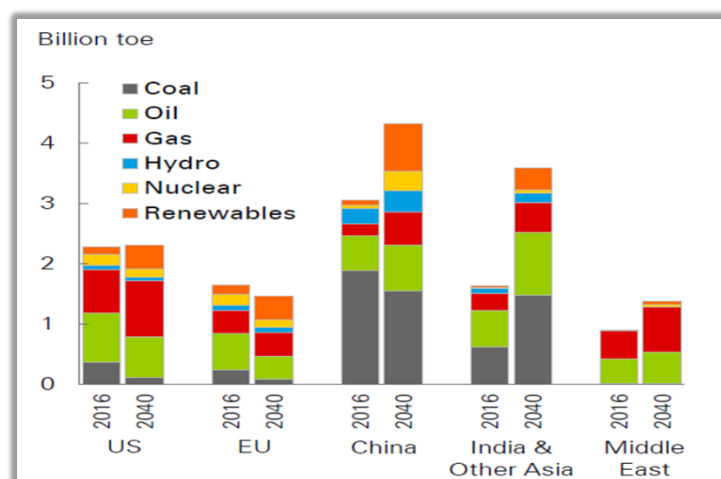
Η αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας είναι ευρεία σε όλους τους κύριους τομείς. Οι διαφορετικές τάσεις στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται και καταναλώνεται η ενέργεια σε αυτούς τους τομείς έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη μεταφορά της ενέργειας. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.1, ο βιομηχανικός τομέας καταναλώνει επί του παρόντος περίπου το ήμισυ του συνόλου των παγκόσμιων ενέργειας και πρώτης ύλης, ενώ το υπόλοιπο αντιπροσωπεύουν κατοικίες και εμπορικά κτήρια (29%) και μεταφορές (20%). Αντίθετα, η χρήση άκαυστων καυσίμων, π.χ. ως πρώτες ύλες για τα πετροχημικά, τα λιπαντικά και την άσφαλτο, γίνεται όλο και πιο σημαντικό στοιχείο της συνολικής βιομηχανικής ζήτησης. Η ενεργειακή ανάπτυξη στον τομέα των κτηρίων αυξάνεται επίσης έντονα, λόγω της αύξησης της ζήτησης για ψύξη χώρου, φωτισμό και ηλεκτρικές συσκευές. Η επιβράδυνση της αύξησης της ζήτησης είναι πιο έντονη στον τομέα των μεταφορών καθώς επιταχύνεται η βελτίωση της αποδοτικότητας των οχημάτων.

Οι χώρες που αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία της αύξησης της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, όπως η Κίνα, χρησιμοποιούν σήμερα πολύ τον γαιάνθρακα. Όμως το 2040 στην Κίνα αναμένεται μείωση της συνολικής κατανάλωσης άνθρακα, η οποία αντισταθμίζεται από την μεγάλη αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αντίθετα,

το μερίδιο του άνθρακα στην Ινδία και σε άλλες αναπτυσσόμενες χώρες της Ασίας παραμένει σε μεγάλο βαθμό αμετάβλητο, έτσι ώστε η ζήτηση άνθρακα να αυξάνεται παράλληλα με τη συνολική ζήτηση ενέργειας. Οι ΗΠΑ και η Ευρώπη ξεκινούν με ποικίλα μείγματα καυσίμων και μοιράζονται παρόμοιες τροχιές μειούμενων μεριδίων άνθρακα και πετρελαίου που τις αντισταθμίζει η αυξανόμενη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα στις ΗΠΑ και το φυσικό αέριο. Η αύξηση της ενεργειακής ζήτησης στη Μέση Ανατολή καλύπτεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από την αύξηση της κατανάλωσης φυσικού αερίου. Η εικόνα 1.2.2 που ακολουθεί παρουσιάζει αναλυτικά την ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας σε δις. τόνους ισοδύναμου πετρελαίου ανά περιοχή το 2016 και την αναμενόμενη ζήτηση το 2040.



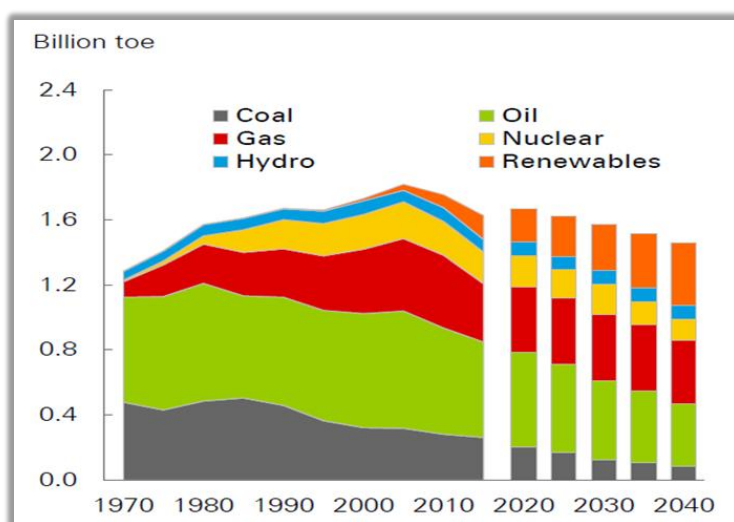
Εικόνα 1.2.1: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά τομέα [1.2].



Εικόνα 1.2.2: Ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας σε δισεκατομμύρια τόνους ανά περιοχή [1.2].

Πιο συγκεκριμένα η Ευρώπη εξακολουθεί να ηγείται της μετάβασης προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Οι εκπομπές άνθρακα της Ευρώπης έως το 2040 είναι πάνω από 35% χαμηλότερες από το 2016. Η μετάβαση αυτή υποστηρίζεται από μια σειρά πολιτικών που στοχεύουν στην ενεργειακή απόδοση και ενθαρρύνουν τη στροφή προς καύσιμα με λιγότερο άνθρακα. Το 2040, η Ευρώπη φαίνεται να καταναλώνει περίπου την ίδια ποσότητα ενέργειας όπως και το 1975. Η μετάβαση σε ένα μείγμα καυσίμων με λιγότερο άνθρακα διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο.

Από την εικόνα 1.2.3 φαίνεται ότι η κατανάλωση πετρελαίου πέφτει σημαντικά και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντιπροσωπεύουν ένα αυξανόμενο μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι το 2040, τα μη ορυκτά καύσιμα παρέχουν περίπου το 40% της ενεργειακής ζήτησης στην Ευρώπη, πάνω από το 25% του 2016 και σημαντικά υψηλότερο από τον παγκόσμιο μέσο όρο του 25%.

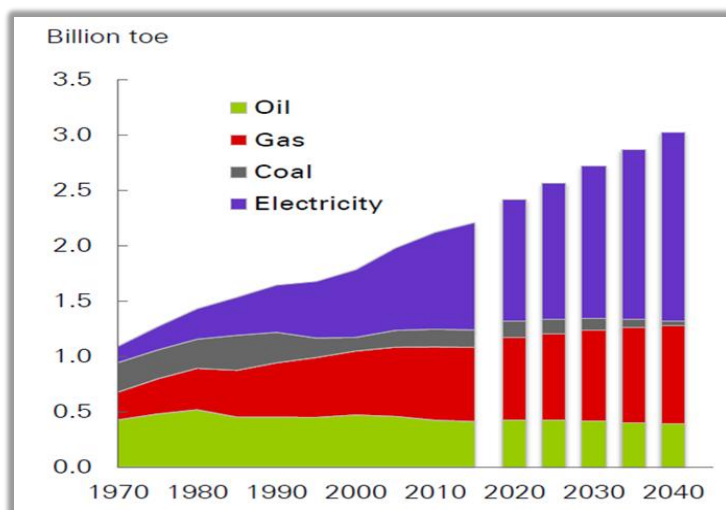


Εικόνα 1.2.3: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε δις τόνους ισοδύναμου πετρελαίου στην Ευρώπη [1.2].

Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας θα συνεχίσει να αυξάνεται μέχρι το 2040, αντικατοπτρίζοντας τη θεμελιώδη συνάφεια της με την αυξανόμενη ευημερία και το καλύτερο βιοτικό επίπεδο για έναν αυξανόμενο πληθυσμό παγκοσμίως. Η αύξηση της χρήσης ενέργειας στα κτήρια οδηγείται από το συνδυασμό αυξανόμενου πληθυσμού και αυξανόμενης ευημερίας, επιτρέποντας στους ανθρώπους να ζουν και να εργάζονται με μεγαλύτερη άνεση. Όλη η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια παρέχεται από την ηλεκτρική ενέργεια, η οποία είναι η πιο αποδοτική πηγή ενέργειας για την

ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων (εικόνα 1.2.4). Επιπλέον, υπάρχει μικρή αύξηση στην κατανάλωση φυσικού αερίου, η οποία κερδίζει μερίδιο από τον άνθρακα και το πετρέλαιο στη θέρμανση χώρου.

Γενικότερα, η βελτίωση του κελύφους του κτηρίου είναι ένα ουσιαστικό βήμα για την επίτευξη της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας αφού η τελευταία επηρεάζεται από το σχεδιασμό και την κατασκευή του κελύφους του κτηρίου [1.3].



Εικόνα 1.2.4: Τελική κατανάλωση ενέργειας σε κτήρια ανά τύπο καυσίμου [1.2].

Όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βλέπουμε ότι ο αέρας και ο ήλιος υποστηρίζονται από πολιτικές για τη μείωση των εκπομπών CO₂ και τη μείωση του κόστους αλλά και για την ανάπτυξη ως πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε παγκόσμιο επίπεδο, το μερίδιο της αιολικής (εικόνα 1.2.5α,β) και ηλιακής ενέργειας (εικόνα 1.2.6α,β) στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται σημαντικά από περίπου 5% το 2016 σε περίπου 17% το 2040.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2.7, οι άνεμοι και η ηλιακή ενέργεια εμφανίζουν έντονη ανάπτυξη στη Βόρεια Αμερική και Ευρώπη και θα παρέχουν περισσότερο από το 20% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας το 2040. Η Μέση Ανατολή και η Αφρική βλέπουν την αύξηση της ηλιακής ενέργειας λόγω του μειωμένου κόστους και των ευνοϊκών ηλιακών πόρων. Ενώ η χρησιμοποίηση της παραγωγικής ικανότητας βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου, η διακοπή εξακολουθεί να περιορίζει την παγκόσμια χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας σε περίπου 30% και 20% αντίστοιχα το 2040.



(α)



(β)

Εικόνα 1.2.5: Αιολικό πάρκο α) σε θαλάσσια περιοχή β) σε ορεινή περιοχή [1.4].

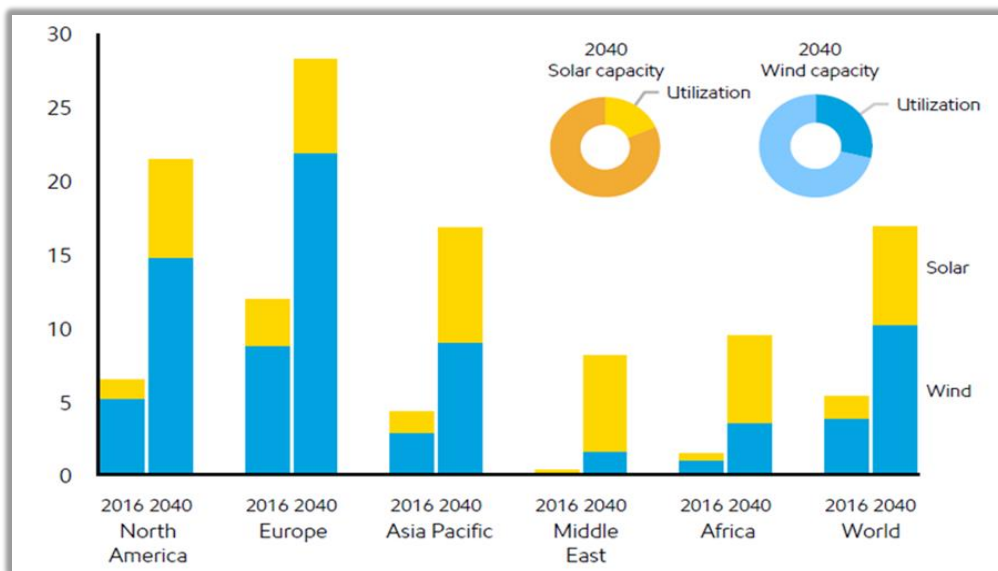


(α)



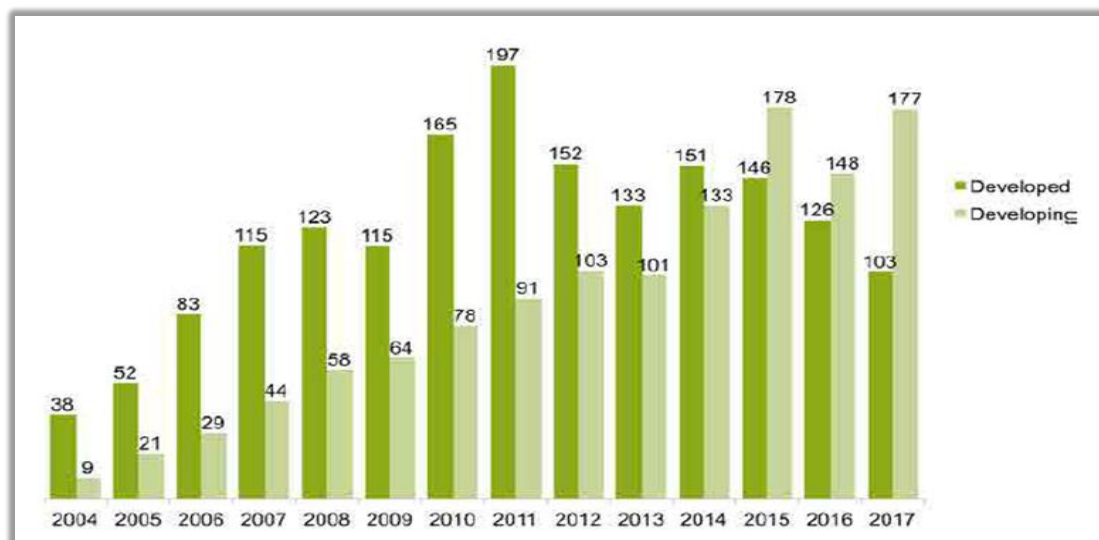
(β)

Εικόνα 1.2.6: α) Ηλιακό πάρκο β) Φωτοβολταϊκά [1.4].



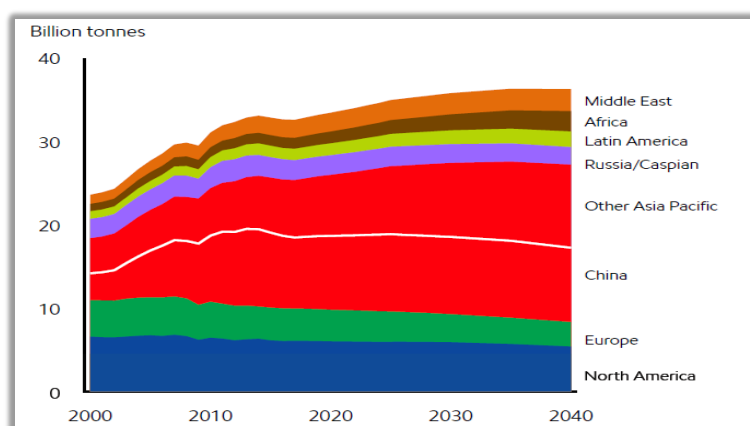
Εικόνα 1.2.7: Η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται σε όλες τις περιοχές. Ποσοστό αιολικής ενέργειας/ηλιακής ενέργειας του ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας που παραδόθηκε σε TWh [1.5].

Αναλυτικά, η εικόνα 1.2.8 διαιρεί τον κόσμο σε αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες οικονομίες και δείχνει ότι μετά από πολλά χρόνια κατά τα οποία οι ανεπτυγμένες χώρες αντιπροσώπευαν το μερίδιο των επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές, το ισοζύγιο μετατοπίστηκε το 2015. Το 2016, οι αναπτυσσόμενες οικονομίες αποτελούσαν την πλειοψηφία των επενδύσεων στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στα καύσιμα και το 2017 το χάσμα αυξήθηκε απότομα, τόσο που ο αναπτυσσόμενος κόσμος αντιπροσώπευε το 63% των συνολικών επενδύσεων στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι ανεπτυγμένες χώρες σε παγκόσμιο επίπεδο μόλις το 37%.



Εικόνα 1.2.8: Παγκόσμιες νέες επενδύσεις στην ανανεώσιμη ενέργεια σε δις δολάρια: Αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες για την περίοδο 2004-2017 [1.6].

Οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ αυξήθηκαν σχεδόν στο 40% από το 2000 έως το 2016, παρά τη μείωση κατά περίπου 10% των εκπομπών στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ είναι πιθανό να κορυφωθούν έως το 2040, σε περίπου 10% πάνω από το επίπεδο του 2016. Οι συνδυασμένες εκπομπές CO₂ στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική μειώνονται κατά περίπου 15% μέχρι το 2040 έναντι του 2016. Η Κίνα συνεισέφερε περίπου το 60% της αύξησης των εκπομπών από το 2000 έως το 2016. Οι εκπομπές εκτός της Βόρειας Αμερικής, της Ευρώπης και της Κίνας αυξάνονται κατά περίπου 35% από το 2016 έως το 2040, με το μερίδιο των παγκόσμιων εκπομπών να φτάνει το 50% μέχρι το 2040.

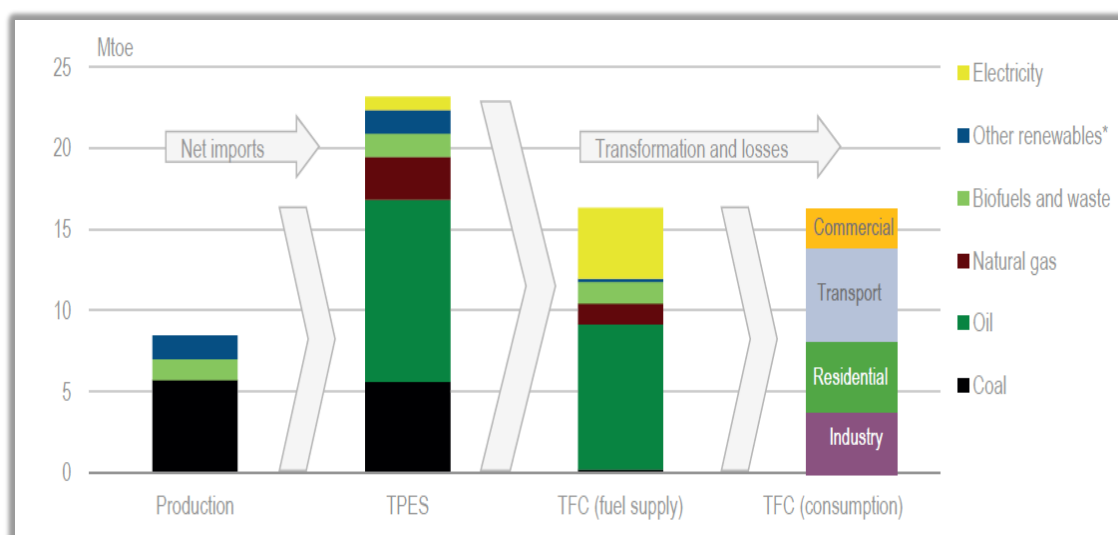


Εικόνα 1.2.9: Η κορύφωση των εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια [1.5].

1.3 Η ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα

Η Ελλάδα διαθέτει μεγάλη ποσότητα παραγωγής γαιάνθρακα που καλύπτει την εγχώρια ζήτηση για άνθρακα, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα της ενέργειας. Ο γαιάνθρακας εξακολουθεί να είναι το κυρίαρχο καύσιμο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας σχεδόν το ένα τρίτο της συνολικής παραγωγής, αλλά η χρήση του μειώνεται. Το πετρέλαιο είναι το πιο σημαντικό καύσιμο και η χώρα εξαρτάται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τις εισαγωγές πετρελαίου. Ο τομέας των μεταφορών, ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος τομέας κατανάλωσης ενέργειας, κυριαρχείται από πετρελαϊκά προϊόντα. Επιπλέον, και ο οικιακός τομέας χρησιμοποιεί καύσιμα πετρελαίου.

Η Εικόνα 1.3.1 δείχνει μια επισκόπηση της παραγωγής ενέργειας, της συνολικής παροχής πρωτογενούς ενέργειας (total primary energy supply-TPES) και της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου (total fuel consumption-TFC) το 2016.

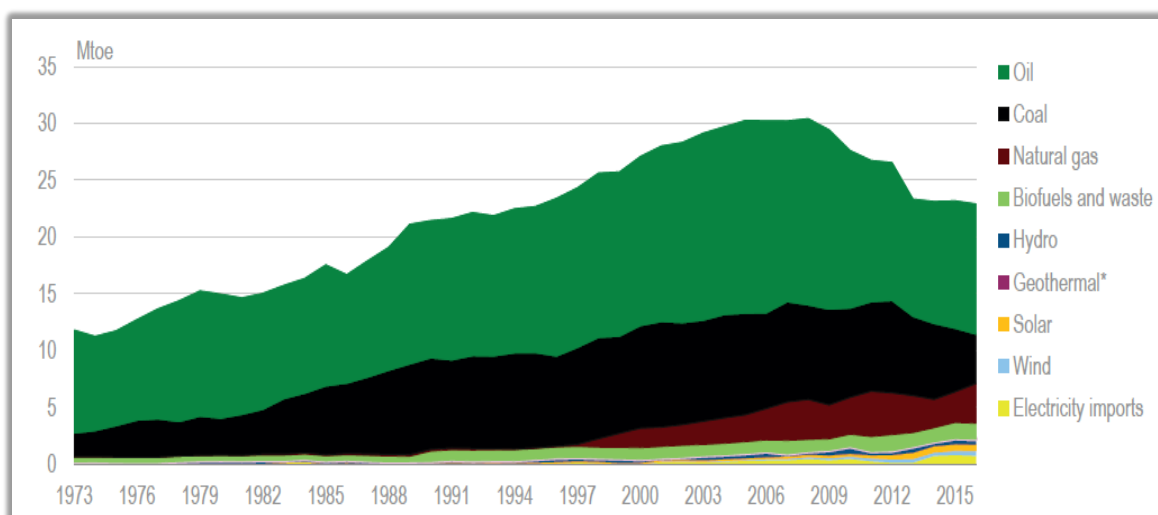


Εικόνα 1.3.1: Επισκόπηση της παραγωγής ενέργειας, της συνολικής παροχής πρωτογενούς ενέργειας (total primary energy supply-TPES) και της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου (total fuel consumption-TFC) το 2016 [1.7].

Η συνολική παροχή πρωτογενούς ενέργειας της Ελλάδας μειώθηκε κατά 24% από το 2006 έως το 2016, κυρίως λόγω της οικονομικής κρίσης στη χώρα μετά το 2009. Το πετρέλαιο είναι το κυρίαρχο καύσιμο στην Ελλάδα, το οποίο αντιπροσωπεύει το ήμισυ της συνολικής παροχής πρωτογενούς ενέργειας (TPES) το 2016, αν και το συνολικό απόθεμα πετρελαίου μειώθηκε σχεδόν κατά το ένα τρίτο από το 2006. Το

μερίδιο του πετρελαίου στο TPES είναι το δεύτερο μεγαλύτερο από τα κράτη μέλη του International Energy Agency (IEA).

Ο άνθρακας είναι το δεύτερο πιο κυρίαρχο καύσιμο που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα, αντιπροσωπεύοντας το 19% του TPES το 2016. Χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συν ένα μικρό μερίδιο στον τομέα της βιομηχανίας. Η παροχή άνθρακα μειώθηκε σχεδόν κατά το ήμισυ κατά την τελευταία δεκαετία, από 8.4 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (Mtoe) το 2006 σε 4.4 Mtoe το 2016, λόγω της μειούμενης χρήσης από τους σταθμούς παραγωγής άνθρακα. Η Ελλάδα εισήγαγε το φυσικό αέριο στο ενεργειακό της σύστημα στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και κατέστη το τρίτο κυρίαρχο πρωτογενές καύσιμο το 2016, αντιπροσωπεύοντας το 15% του TPES. Η παροχή σε φυσικό αέριο έφθασε τα 4.0 Mtoe το 2011 και μειώθηκε κατά 12% δηλαδή σε 3.5 Mtoe το 2016. Η εικόνα 1.3.2 παρουσιάζει την συνολική παροχή πρωτογενούς ενέργειας (total primary energy supply-TPES) ανά πηγή, από το 1973 έως το 2015.



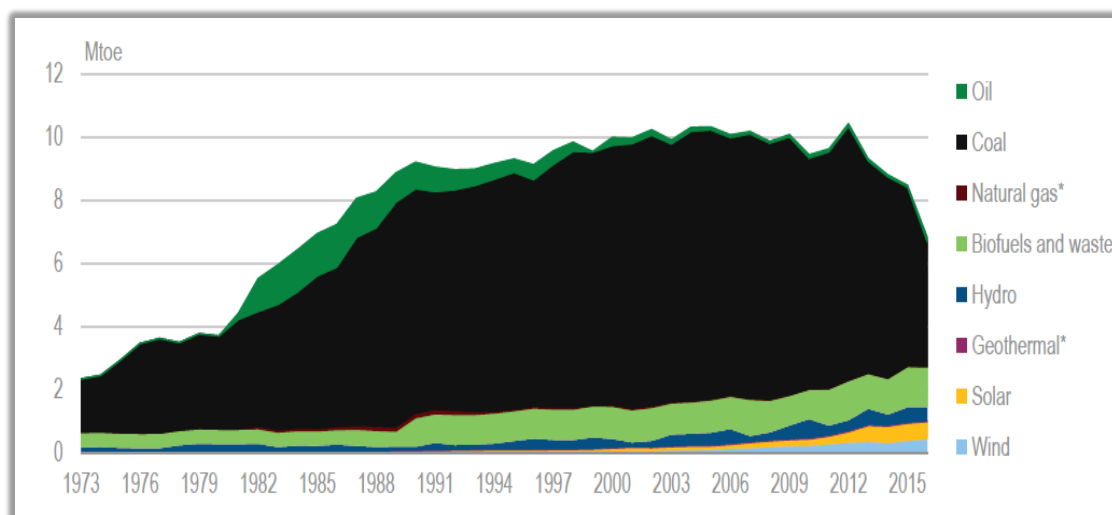
Εικόνα 1.3.2: Συνολική παροχή πρωτογενούς ενέργειας (total primary energy supply-TPES) ανά πηγή από το 1973 έως το 2015 [1.7].

Το μερίδιο της ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μικρό, αλλά υπερδιπλασιάστηκε από 5.9% το 2006 σε 12.5% το 2016. Τα βιοκαύσιμα αντιπροσωπεύουν σχεδόν το ήμισυ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα TPES, κυρίως πρωτογενή στερεά βιοκαύσιμα που χρησιμοποιούνται στον οικιακό τομέα, αλλά η αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας την τελευταία δεκαετία είναι αποτέλεσμα της ταχείας αύξησης της παραγωγής αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Το μερίδιο της

ηλιακής ενέργειας στο TPES είναι το δεύτερο υψηλότερο μεταξύ των χωρών μελών του IEA μετά την Ισπανία.

Παραγωγή ενέργειας και αυτάρκεια

Η παραγωγή άνθρακα μειώθηκε κατά 30% το 2016 σε σύγκριση με το 2015, αλλά εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει περισσότερο από το ήμισυ της συνολικής παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα όπως δείχνει και η εικόνα 1.3.3. Η εναπομένουσα παραγωγή ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, από τις οποίες η παραγωγή βιοκαυσίμων αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μερίδιο, ακολουθούμενη από ηλιακή, υδροηλεκτρική και αιολική ενέργεια. Η παραγωγή πετρελαίου ανήλθε στα 1.3 Mtoe περίπου στα μέσα της δεκαετίας του 1980, αλλά έκτοτε μειώθηκε σε αμελητέα επίπεδα.



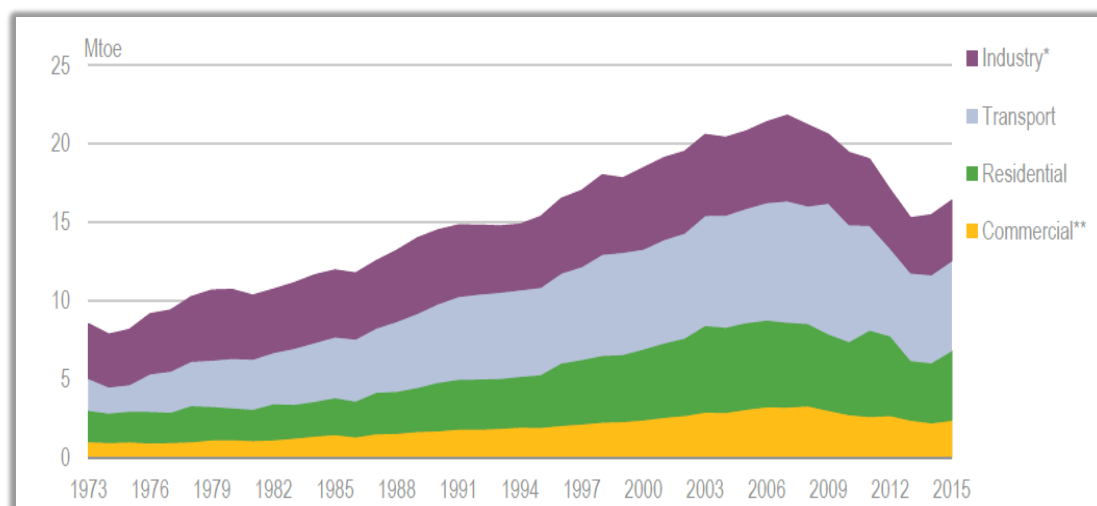
Εικόνα 1.3.3: Παραγωγή ενέργειας ανά πηγή από το 1973 έως το 2015 [1.7].

Επιπλέον η μεγάλη παραγωγή λιγνίτη επιτρέπει στην Ελλάδα να είναι σχεδόν αυτάρκης στην κατανάλωση άνθρακα. Ωστόσο, η ασήμαντη παραγωγή αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου αφήνει την Ελλάδα να εξαρτάται από τις εισαγωγές των εν λόγω καυσίμων. Η συνολική παραγωγή ενέργειας αντιπροσωπεύει λιγότερο από το ένα τρίτο του TPES στη χώρα. Η Ρωσία είναι ο μεγαλύτερος προμηθευτής φυσικού αερίου στην Ελλάδα και η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή αργού πετρελαίου μετά το Ιράκ.

Ο τομέας των μεταφορών είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 35% της ενεργειακής κατανάλωσης. Ακολουθεί ο οικιακός τομέας που αντιπροσωπεύει το 27% της ενεργειακής κατανάλωσης, η βιομηχανία με 23% και το εμπόριο με 15%. Η τελική κατανάλωση ενέργειας όλων των τομέων μειώθηκε κατά

την τελευταία δεκαετία εξαιτίας της οικονομικής ύφεσης, και η βιομηχανία παρουσίασε τη μεγαλύτερη πτώση κατά 29% από το 2007.

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η δεύτερη υψηλότερη πηγή ενέργειας, ειδικά στον εμπορικό τομέα. Η εικόνα 1.3.4 παρουσιάζει την συνολική ενεργειακή κατανάλωση ανά τομέα από το 1973 έως το 2015.



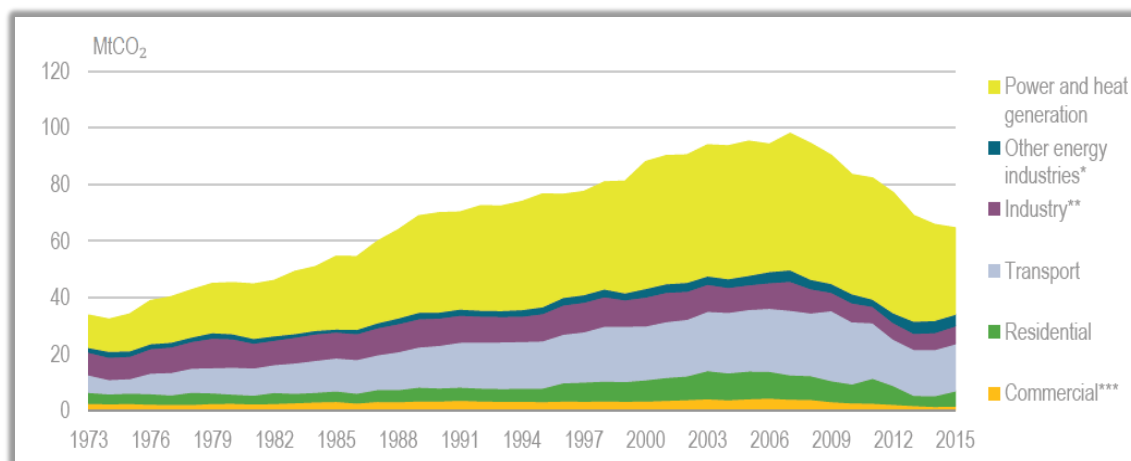
Εικόνα 1.3.4: Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση ανά τομέα από το 1973 έως το 2015 [1.7].

Εκπομπές CO₂ ανά τομέα

Ο μεγαλύτερος τομέας εκπομπών CO₂ είναι ο τομέας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.3.5. Οι εκπομπές από τον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 30.5 MtCO₂ το 2015, ποσό που αντιπροσωπεύει σχεδόν το ήμισυ των συνολικών εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια. Μεταξύ 2007 και 2015, οι εκπομπές από τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκαν κατά 37%, αποτέλεσμα του αυξημένου μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και της πτώσης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε από 7.5% το 2007 σε 28.9% το 2015. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε από 62.7 τεραβατώρες (TWh) το 2007 σε 51.8 TWh το 2015, μείωση κατά 17% και η Ελλάδα μείωσε τις εκπομπές τις κατά 34 % κατά την ίδια περίοδο.

Ο τομέας των μεταφορών είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος τομέας που αντιπροσωπεύει το 25.8% των συνολικών εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την ενέργεια το 2015. Οι εκπομπές από τον τομέα των μεταφορών μειώθηκαν από 22.9 MtCO₂ το 2007 σε 16.7 MtCO₂ το 2015.

Σε όλους τους άλλους τομείς σημειώθηκε επίσης απότομη πτώση των εκπομπών κατά την τελευταία δεκαετία. Οι εκπομπές από τον κλάδο της βιομηχανίας μειώθηκαν από 10.2 MtCO₂ το 2007 σε 6.3 MtCO₂ το 2015, μείωση κατά 38%, και αντίστοιχα ο οικιακός και ο εμπορικός τομέας παρουσίασαν μείωση 38% και 60% των εκπομπών CO₂ αντίστοιχα. Ο οικιακός τομέας είχε εκπομπές 5.4 MtCO₂ το 2015 και ο εμπορικός τομέας 1.6 MtCO₂. Ενώ η επιβράδυνση της οικονομίας είχε μεγάλη επίδραση στις μειώσεις των εκπομπών, σε αυτό συνέβαλε επίσης και η αντικατάσταση του πετρελαίου με φυσικό αέριο στους βιομηχανικούς, οικιακούς και εμπορικούς τομείς. Ο κλάδος της βιομηχανίας αύξησε την κατανάλωση φυσικού αερίου κατά 43%, ενώ η κατανάλωση πετρελαίου μειώθηκε κατά 47% μεταξύ 2007 και 2015. Παρομοίως, η αλλαγή καυσίμου πραγματοποιήθηκε και στον οικιακό τομέα, όπου το φυσικό αέριο αυξήθηκε κατά 101% και το πετρέλαιο μειώθηκε κατά 45% και στον εμπορικό τομέα, όπου το φυσικό αέριο αυξήθηκε κατά 85% και το πετρέλαιο μειώθηκε κατά 52%, κατά την ίδια περίοδο.



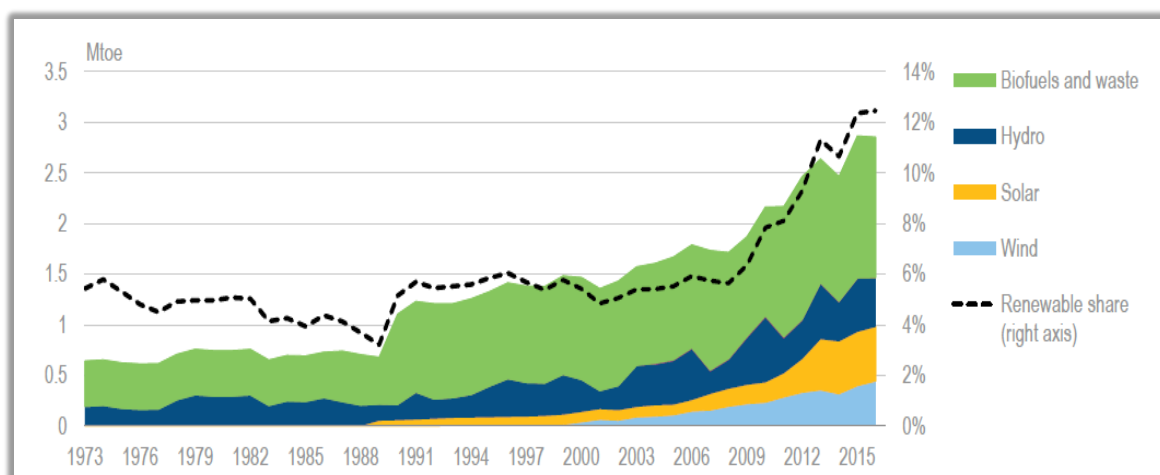
Εικόνα 1.3.5: Εκπομπές CO₂ ανά τομέα από το 1973 έως το 2015 [1.8].

Ανανεώσιμες πηγές στην Ελλάδα

Η Ελλάδα έχει μεγάλους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους και το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει σημειώσει αύξηση στα αιολικά και ηλιακά φωτοβολταϊκών (PVs) τα τελευταία χρόνια, χάρη στη μείωση του κόστους τεχνολογίας.

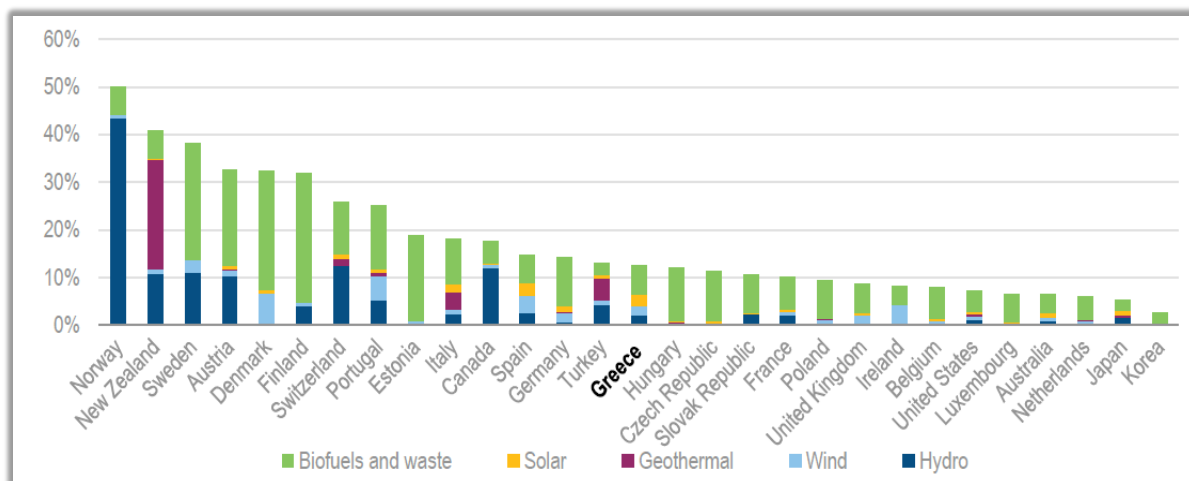
Η επιτάχυνση και η απλούστευση των σύνθετων διαδικασιών αδειοδότησης βελτίωσε επίσης την κατάσταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Λόγω της θετικής εμπειρίας των ανταγωνιστικών δημοπρασιών και των μεγάλων νησιών που διασυνδέονται με το ελληνικό ηπειρωτικό σύστημα, η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να αυξήσει τη συμβολή της και να συμβάλλει στη διαφοροποίηση του ελληνικού ενεργειακού μίγματος, εν μέσω της μείωσης του κόστους τεχνολογίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική παροχή σε πρωτογενή ενέργεια (TPES) αυξήθηκε σημαντικά τα τελευταία χρόνια, σε νέο ανώτατο επίπεδο 12.5% το 2016. Τα βιοκαύσιμα είναι η μεγαλύτερη ανανεώσιμη πηγή πρωτογενούς ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας περίπου το ήμισυ του ανανεώσιμου μεριδίου στο TPES. Η παροχή βιοκαυσίμων ανήλθε σε 1.4 εκατομμύρια τόνους ισοδυνάμου πετρελαίου το 2016, αντιπροσωπεύοντας μια αύξηση 36% από το 2006. Τα στερεά βιοκαύσιμα αντιπροσώπευαν τα τρία τέταρτα του συνόλου της προσφοράς βιοκαυσίμων στο TPES και χρησιμοποιούνται κυρίως για θέρμανση σε οικιακούς λέβητες όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3.6. Η σημαντικότερη ανάπτυξη προέρχεται και από την ηλιακή ενέργεια, η οποία έχει αυξηθεί σχεδόν πενταπλάσια από το 2006 και αντιπροσώπευε το 19% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο TPES το 2016. Η αιολική ενέργεια αυξήθηκε επίσης ταχύτατα και τριπλασιάστηκε την τελευταία δεκαετία. Η υδροηλεκτρική ενέργεια έχει μεγάλες ετήσιες διακυμάνσεις, καθώς η ποσότητα νερού, που διατίθεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλάζει κατά τη διάρκεια βροχερού καιρού ή κατά τη διάρκεια ξηρασίας.



Εικόνα 1.3.6: Το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική παροχή πρωτογενούς ενέργειας (TPES) από το 1973 έως το 2016 [1.7].

Η Ελλάδα, όσον αφορά τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο TPES, έχει μια μέση τιμή μεταξύ των χωρών μελών του ΙΕΑ, με 14 χώρες πάνω από αυτή και 14 κάτω από αυτή όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.3.7.

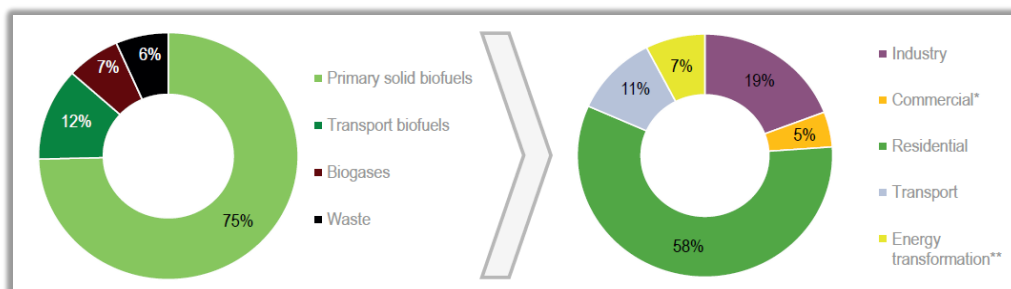


Εικόνα 1.3.7: Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα κράτη-μέλη του ΙΕΑ για το 2016 [1.7].

Η Ελλάδα διαθέτει περίπου 3 gigawatts (GW) θερμική ισχύ ηλιακών θερμικών συλλεκτών που εγκαθίστανται σε κατοικίες και μερικές εμπορικές ηλιακές εγκαταστάσεις θέρμανσης και ψύξης. Ωστόσο, το ΚΑΠΕ πιστεύει ότι υπάρχει τεράστιο αναξιοποίητο δυναμικό στον τριτογενή τομέα (ξενοδοχεία, δημόσια κτήρια, νοσοκομεία και βιομηχανίες). Η Ελλάδα είναι ένας κορυφαίος κατασκευαστής ηλιακών θερμικών εγκαταστάσεων, με περισσότερο από το 50% της παραγωγής ηλιακών θερμικών εγκαταστάσεων να εξάγονται. Επιπλέον, ο νέος Αναπτυξιακός Νόμος 4399/2016 προβλέπει μείωση φόρου εισοδήματος για μονάδες συμπαραγωγής και εγκαταστάσεις θέρμανσης και ψύξης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και σταθεροποίηση του συντελεστή φόρου εισοδήματος.

Τα στερεά βιοκαύσιμα χρησιμοποιούνται για θέρμανση σε οικιακούς λέβητες. Η ενεργειακή κατανάλωση του οικιακού τομέα αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μερίδιο της ζήτησης βιοκαυσίμων στην Ελλάδα όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3.8. Η βιομάζα από άχυρο, από κλαδέματα ελιάς και πυρήνα ελιάς, μίσχους βαμβακιού και υπολείμματα ξύλου χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων και ξύλου για θέρμανση (ισοδύναμη με 1.6 TWh). Η Ελλάδα έχει εγκαταστήσει 2 MW ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα, με επτά εγκαταστάσεις. Το ΚΑΠΕ υπολογίζει ότι περίπου 1.75 TWh παραμένουν

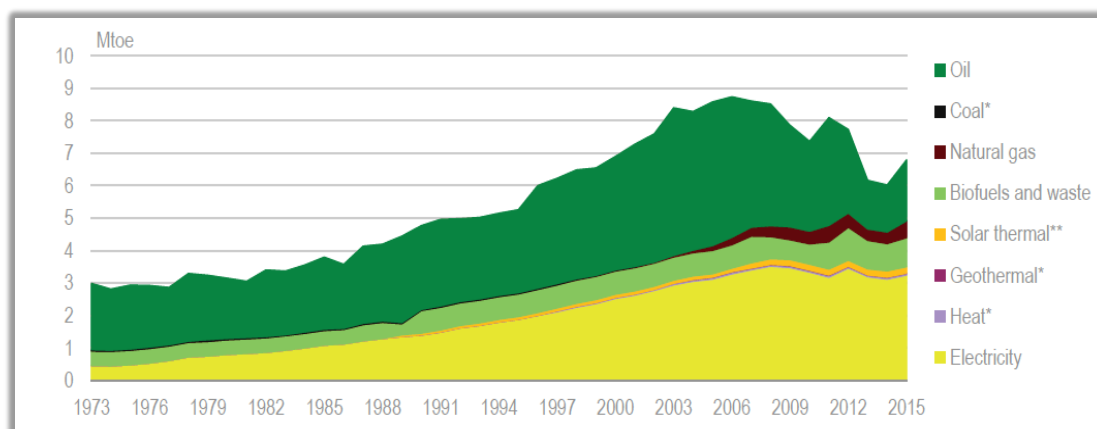
αναξιοποίητα, με πιθανότητα μετριασμού του διοξειδίου του άνθρακα κατά περίπου 460.000 τόνους.



Εικόνα 1.3.8: Παροχή και κατανάλωση βιοκαυσίμων στην Ελλάδα το 2015 [1.7].

Κτήρια

Ο κτηριακός τομέας στην Ελλάδα αντιπροσωπεύει το 41% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου (TFC), το μεγαλύτερο μέρος του οποίου ανήκει στον τομέα των κατοικιών. Το TFC μειώθηκε κατά περίπου 20% μεταξύ του 2005 και του 2015 όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3.9, το οποίο είναι παρόμοιο με τους άλλους τομείς. Ο ηλεκτρισμός ήταν υπεύθυνος για το μεγαλύτερο μερίδιο του TFC στον τομέα των κτηρίων, που αντιπροσωπεύει το 48%. Το πετρέλαιο ήταν η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή, αντιπροσωπεύοντας το 28% του TFC, τα βιοκαύσιμα ήταν υπεύθυνα για το 13% και το φυσικό αέριο για το 8% [1.9].

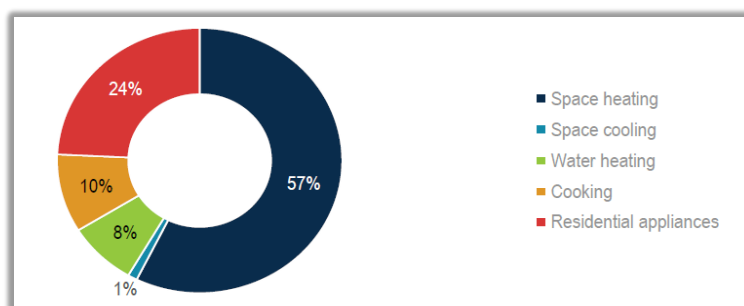


Εικόνα 1.3.9: Συνολική κατανάλωση καυσίμων (TFC) στο οικιακό και εμπορικό τομέα ανά πηγή από το 1973 έως το 2015 [1.9].

Η κατανάλωση φυσικού αερίου έχει τριπλασιαστεί την τελευταία δεκαετία αλλά η μικρή συμβολή του στην κατανάλωση στον κτηριακό τομέα αντικατοπτρίζει την περιορισμένη αφομοίωση των συστημάτων θέρμανσης με φυσικό αέριο στην Ελλάδα.

Η θέρμανση χώρων αντιπροσωπεύει την πλειοψηφία, το 57% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στον οικιακό τομέα όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.3.10. Η ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση των οικιστικών χώρων μειώθηκε κατά 44% μεταξύ του 2000 και του 2014. Αυτό αντανακλά εν μέρει την κίνηση μακριά από αναποτελεσματικούς θερμαντήρες πετρελαίου αλλά περισσότερο τον αντίκτυπο της αύξησης των τιμών των καυσίμων και της οικονομικής και χρηματοπιστωτικής κρίσης που οδήγησε σε χαμηλότερα εισοδήματα, με αποτέλεσμα τα νοικοκυριά να μειώσουν τη χρήση της θέρμανσης ή να στραφούν σε εναλλακτικές λύσεις χαμηλού κόστους. Οι μεταβολές αυτές έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου, αλλά όχι το ίδιο επίπεδο αύξησης της κατανάλωσης φυσικού αερίου, γεγονός που αντανακλά τη χαμηλή απορρόφηση εναλλακτικών και αποδοτικότερων τεχνολογιών φυσικού αερίου. Η βιομάζα προσφέρει εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί από μερικά νοικοκυριά στην Ελλάδα για τη θέρμανση χώρων. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα κατάλληλης βιομάζας είναι περιορισμένη και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλες μορφές βιομάζας τοπικής προέλευσης. Η καύση αυτών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή σωματιδιακής ύλης και άλλων ρύπων που δημιουργούν κινδύνους για το περιβάλλον και την υγεία.

Τέλος, οι λέβητες συμπύκνωσης με φυσικό αέριο ή οι ηλεκτρικές αντλίες θερμότητας παρουσιάζουν δύο εναλλακτικές τεχνολογίες θέρμανσης χώρων που θα μπορούσαν να βελτιώσουν την απόδοση στον οικιακό τομέα. Η μικρή πληροφόρηση (που δημιουργεί αβεβαιότητες γύρω από τη νέα τεχνολογία), τα περιορισμένα κεφάλαια για την κάλυψη των εξόδων αγοράς και εγκατάστασης και η ανεπαρκής υποδομή (ιδίως η υποδομή φυσικού αερίου για τη στήριξη της ανάπτυξης) έχουν εμποδίσει την είσοδο αυτών των τεχνολογιών στην οικιακή αγορά.



Εικόνα 1.3.10: Ενεργειακή κατανάλωση στον οικιακό τομέα ανά χρήση ενέργειας το 2014 [1.10].

1.4 Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια της Ελλάδας

Η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει συνεχή αύξηση με σοβαρές επιπτώσεις στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος, στην εξάντληση των φυσικών πόρων, και κατά συνέπεια στην ποιότητα ζωής. Για την αντιμετώπιση όλων αυτών των επιπτώσεων, πρωταρχικό ρόλο διαδραματίζει η εξοικονόμηση ενέργειας, συμβάλλοντας αποτελεσματικά στην παγκόσμια οικονομία, στην κάλυψη των κοινωνικών και αναπτυξιακών αναγκών, αλλά και στην προστασία του περιβάλλοντος. Η εξοικονόμηση ενέργειας θεωρείται η φθηνότερη ευγενής μορφή ενέργειας, είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμη και μπορεί να πραγματοποιηθεί στον οικιακό τομέα, τη βιομηχανία και τις μεταφορές, που απορροφούν το σύνολο της καταναλισκόμενης ενέργειας σε κάθε χώρα. Ο στόχος της εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις εξής δράσεις:

- Αλλαγή της ενεργειακής συμπεριφοράς καταναλωτών στην καθημερινή τους ζωή.
- Τεχνολογική βελτίωση του κτηριακού κελύφους.
- Τεχνολογική βελτίωση των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων.
- Εισαγωγή νέων ενεργειακών τεχνολογιών και καυσίμων.
- Στροφή σε προϊόντα, που απαιτούν λιγότερη ενέργεια ανά μονάδα προϊόντος (π.χ. χρήση ημικατεργασμένου χαρτιού για την παραγωγή τελικών προϊόντων).
- Εισαγωγή νέων τεχνολογιών, που εξασφαλίζουν παραγωγή προϊόντων με λιγότερη ενέργεια.

Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας στα ελληνικά κτήρια ανέρχεται στο 6%, ενώ ο αντίστοιχος ρυθμός αύξησης για το σύνολο της καταναλισκόμενης ενέργειας στην Ελλάδα είναι περίπου 2%. Στην Ελλάδα, το πρόβλημα της θερμικής άνεσης επικεντρώνεται το καλοκαίρι, κυρίως λόγω του κλίματος, αλλά και επειδή η πλειοψηφία των κατασκευαστών κτηρίων δε δίνουν σημασία σε φωτισμό και ψύξη [1.11]. Η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς για την κάλυψη των φορτίων αιχμής κυρίως κατά τους θερινούς μήνες (λόγω κλιματισμού), αυξάνεται συνεχώς με μέσο ετήσιο ρυθμό τα 400 MW, γεγονός που συνεπάγεται την αναγκαιότητα για έναν επιπλέον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως.

Στη χώρα μας οι δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας στον κτηριακό τομέα είναι ιδιαίτερα υψηλές και μπορούν να υλοποιηθούν σχετικά εύκολα με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων. Για παράδειγμα, η επιλογή των υαλοπινάκων αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα των κτηρίων, διότι επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση ενέργειας [1.11]. Πρέπει να επισημανθεί ότι το 70% των ελληνικών κτηρίων δεν είναι θερμομονωμένα, ενώ ταυτόχρονα το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτά έχουν κακή αεροστεγανότητα και παλιάς τεχνολογίας ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις (θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού κ.ά.). Ειδικότερα, ο κανονισμός θερμομόνωσης θεσπίστηκε στην Ελλάδα το 1979 και έγινε απαραίτητη προϋπόθεση για την έκδοση οικοδομικής άδειας το 1980. Έως τότε αφενός μεν η θερμομόνωση στα κτήρια ήταν προαιρετική, αφετέρου η τεχνολογία και η γνώση των μονωτικών υλικών και των τεχνικών εφαρμογής δεν ήταν ανεπτυγμένες. Επομένως το μεγαλύτερο ποσοστό των σπιτιών ήταν και είναι χωρίς μόνωση. Από το 1980 εξαιτίας του κανονισμού θερμομόνωσης, τα κτήρια άρχισαν να μονώνονται με υλικά αμφίβολων ιδιοτήτων, κυρίως όσον αφορά στο χρόνο ζωής τους με αποτέλεσμα τη μη διατήρηση των θερμομονωτικών τους ιδιοτήτων (συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, μηχανικές αντοχές). Ο τρόπος εφαρμογής ήταν ελλιπής (πολλές θερμογέφυρες, εμφάνιση υγρασίας κτλ.) και κατά συνέπεια το ελληνικό κτήριο συνεχίζει να είναι δαπανηρό όσον αφορά στο θέμα της συντήρησής του. Ο μηχανικός ή ο ιδιοκτήτης προτιμούσε να ξοδέψει χρήματα για την κατασκευή του σπιτιού βάζοντας σε δεύτερη μοίρα το κόστος συντήρησής του. Κοντά στο τέλος της δεκαετίας του 1980 άρχισαν να εμφανίζονται πιο προηγμένα υλικά με αντίστοιχες τεχνικές, γεγονός που συνέβαλε σε μικρό ποσοστό στην βελτίωση του προβλήματος, όχι όμως σε πολύ μεγάλο βαθμό [1.12].

Το ελληνικό σπίτι ακόμα και σήμερα εξακολουθεί να είναι δαπανηρό όσον αφορά στη συντήρησή του, αλλά και στην ενεργειακή κατανάλωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αφενός τη λήψη ημίμετρων για την αντιμετώπιση εκ των υστέρων των προβλημάτων που δημιουργούνται εσωτερικά, και αφετέρου την υπερβολική επιβάρυνση των ανθρώπων από βλαβερές ουσίες της ατμόσφαιρας και του περιβάλλοντος κάνοντας τη ζωή καθημερινά όλο και πιο δύσκολη. Παρόλα αυτά, αποτελέσματα προσομοιώσεων έδειξαν ότι υπάρχει περιθώριο για εξοικονόμηση ενέργειας, ειδικά για φωτισμό, στα ελληνικά κτήρια [1.11]. Γενικότερα, η σημερινή υψηλής ενεργειακής απόδοσης τεχνολογία χρήσης και διαχείρισης ενέργειας, μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά στην εξοικονόμησή της στα κτήρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1.1] UN Population Division, World Population Prospects: The 2017 Revision, New York, United States 2017.
- [1.2] BP Statistical Review of World Energy 2018.
- [1.3] International Energy Agency. Technology roadmap: energy efficient building envelopes, OECD/IEA 2013.
- [1.4] Frankfurt School-UNEP. Global trends in renewable energy investment, 2018.
- [1.5] Exxon Mobil 2018, Outlook for Energy: A View to 2040.
- [1.6] UN Environment, Bloomberg New Energy Finance 2018.
- [1.7] International Energy Agency (IEA), World Energy Balances, OECD/IEA, Paris 2017.
- [1.8] IEA, CO₂ Emissions from Fuel Combustion (OECD countries), 2017.
- [1.9] European Commission, Report on Long-term Strategy for Mobilising Investment in the Renovation of the National Stock of Residential and Commercial Buildings, Both Public and Private, Athens 2014.
- [1.10] International Energy Agency (IEA), Energy Efficiency Indicators, OECD/IEA, Paris 2017.
- [1.11] A. Stegou-Sagia, K. Antonopoulos, C. Angelopoulou, G. Kotsiovelos, The impact of glazing on energy consumption and comfort, Energy Conversion and Management 2007;48:2844–2852.
- [1.12] www.bioclima.com.gr <accessed 2018>.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ***Ηλιακή ενέργεια*****2.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία**

Η ηλιακή ενέργεια, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ύπαρξη της ζωής στη Γη. Καθορίζει τη θερμοκρασία στην επιφάνειά της και παρέχει ουσιαστικά το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία όλων των φυσικών συστημάτων. Ο ήλιος ενεργεί ως μία τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα). Η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφανείας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, όταν η απόσταση γης-ηλίου λαμβάνει τη μέση τιμή της είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά: $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$. Η μέση απόσταση γης-ηλίου είναι $1.495 \times 10^{11} \text{ m}$ και μεταβάλλεται κατά $\pm 1.7\%$ λόγω της τροχιάς της γης περί του ήλιου.

Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτινών από την ατμόσφαιρα της Γης, η ένταση τους ελαττώνεται, αφού τα φωτόνια σκεδάζονται στα μόρια της ατμόσφαιρας, στα πολύ μικρής διαμέτρου d σωματίδια, αλλά και στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματά της, όπως οι υδρατμοί, η σκόνη και ο καπνός. Ακόμα, ένα άλλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας. Παραδείγματος χάριν, η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, έτσι ώστε η ένταση των ακτινών αυτών, στην επιφάνεια της γης, να είναι εξαιρετικά μειωμένη και η καρκινογόνος δράση της αισθητά περιορισμένη. Έτσι, στην επιφάνεια της γης, φτάνουν τελικώς δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός:

- η απευθείας ή άμεση b (beam)

Άμεσος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη κατευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβεί διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή της άμεσου ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G_b και του κεκλιμένου G_{bT} .

- η σκεδαζόμενη στα μόρια του αέρα, η οποία ονομάζεται διάχυτη d (diffuse)

Διάχυτος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα (G_d).

Η μέση στιγμιαία άμεση και διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου G_b και G_d προκύπτει με λογιστική ανάλυση των μετρήσεων της ολικής ακτινοβολίας και προσεγγίζονται (σε W/m^2) για κάθε ώρα, $t=7,8,\dots,18$ της ημέρας και κάθε μέρα, $D=1\div 365$, του έτους από τις παρακάτω εξισώσεις [2.1]:

$$G_b = M_t + A_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365}D - P_t\right) \quad (2.1.1)$$

$$G_d = m_t + a_t \cdot \sin\left(\frac{360}{365}D - p_t\right) \quad (2.1.2)$$

όπου οι συντελεστές M_t , A_t , P_t , m_t , a_t , p_t δίδονται για κάθε ώρα από τον πίνακα 2.1.1.

Πίνακας 2.1.1 : Τιμές των παραπάνω συντελεστών [2.1]

<i>Χρόνος t</i> (ώρες-hrs)	M_t (kW/m ²)	A_t (kW/m ²)	P_t (μοίρες- degrees)	m_t (kW/m ²)	a_t (kW/m ²)	p_t (μοίρες- degrees)
7:00	0.007	0.046	86.18	0.048	0.111	81.23
8:00	0.057	0.068	87.31	0.134	0.127	82.45
9:00	0.119	0.104	87.94	0.208	0.133	83.94
10:00	0.191	0.129	88.31	0.261	0.129	85.60
11:00	0.258	0.153	89.35	0.283	0.117	86.05
12:00	0.319	-0.181	-88.88	0.271	0.095	82.71
13:00	0.342	-0.194	-89.18	0.243	0.081	81.95
14:00	0.325	0.183	87.21	0.210	0.083	87.23
15:00	0.269	0.166	86.22	0.176	0.087	89.53
16:00	0.183	0.147	82.10	0.141	-0.085	-88.19
17:00	0.078	0.131	79.85	0.104	-0.079	-88.97
18:00	-0.025	0.114	77.36	0.051	0.091	86.79

Τέλος, η ολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσου και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες. Με G συμβολίζεται η ολική ακτινοβολία του οριζοντίου επιπέδου ενώ G_T του κεκλιμένου.

Ο υπολογισμός της στιγμιαίας ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου G_t γίνεται από την παρακάτω σχέση [2.1]:

$$G_t = G_b \cdot R_b + G_d \cdot \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + (G_b + G_d) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (2.1.3)$$

όπου : α) ρ είναι η αντανακλαστικότητα του εδάφους (0.2 για συνηθισμένο έδαφος-0.7 για χιονισμένο έδαφος)

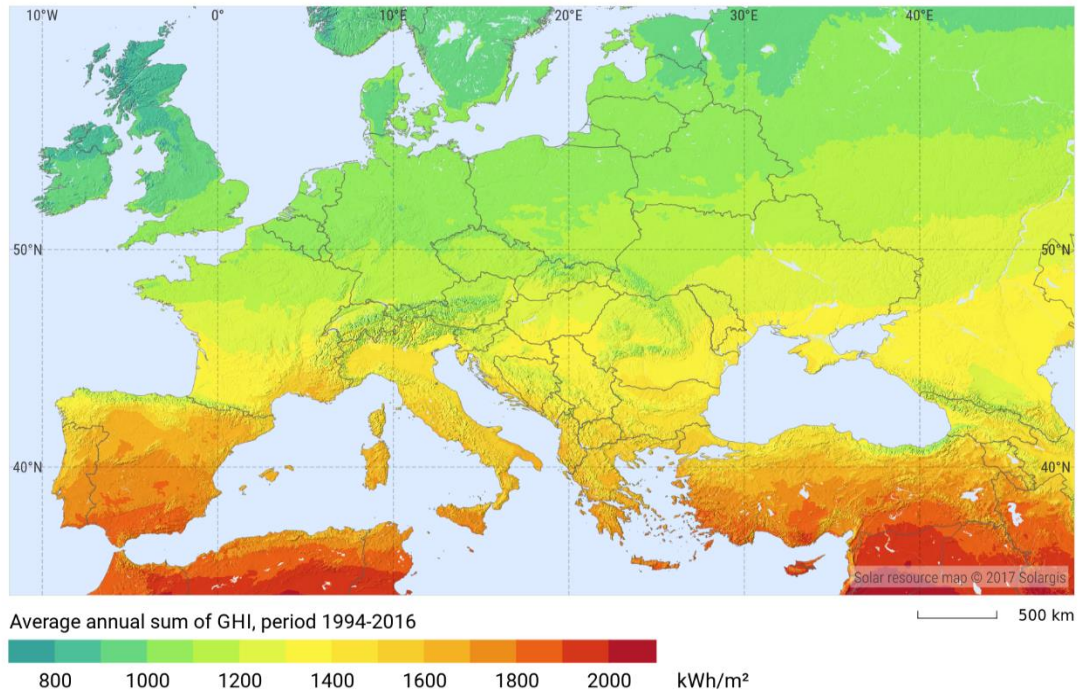
β) β είναι η γωνία κλίσης του κεκλιμένου επιπέδου

γ) R_b είναι ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας

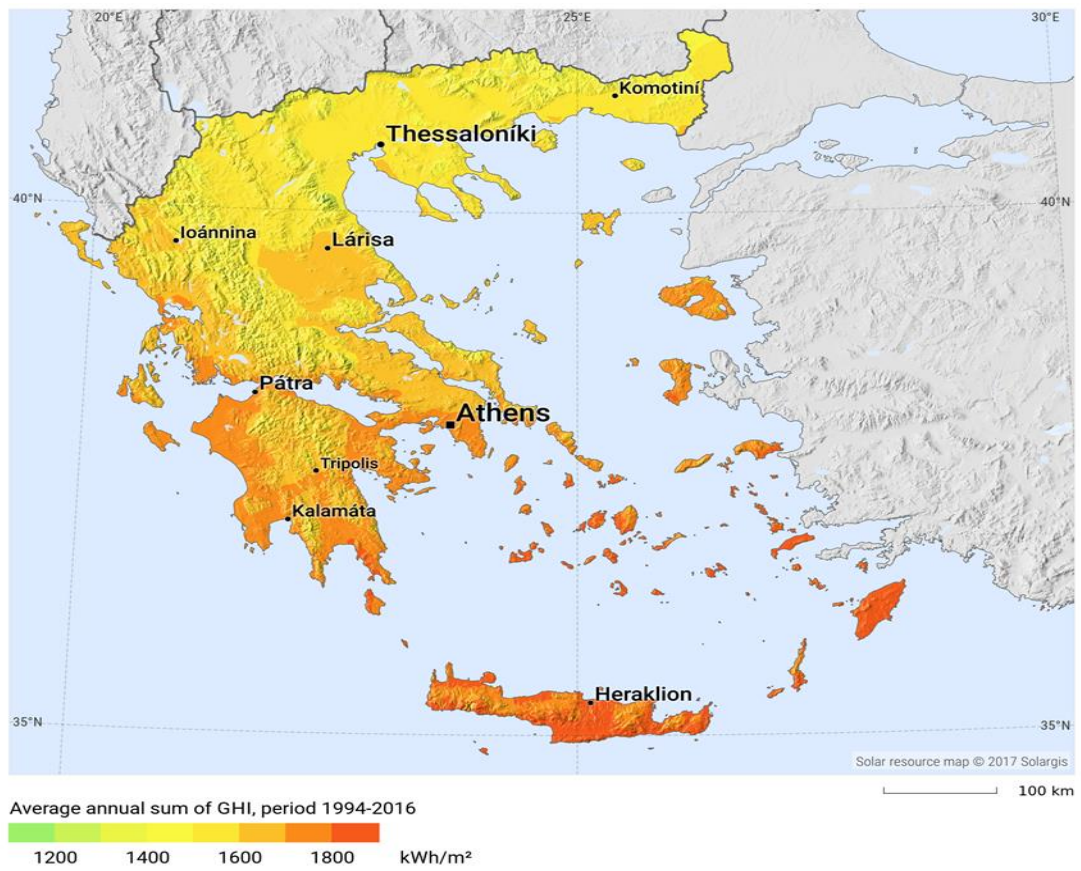
Η ανακλώμενη ακτινοβολία εξαρτάται γενικά από τη μορφολογία και το χρώμα του εδάφους και την πυκνότητα των νεφών, ενώ η ολική, απευθείας και διάχυτη, εξαρτώνται σε γενικές γραμμές από τους επόμενους παράγοντες:

- τη σύσταση- κατάσταση της ατμόσφαιρας, τη δεδομένη χρονική στιγμή (π.χ. υγρασία ή ατμοσφαιρικά αιωρήματα)
- την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους
- τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνεια του συλλέκτη (ύψος του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας).

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη Γη, κατανέμεται ανομοιόμορφα στις διάφορες περιοχές. Οι περιοχές κοντά στον Ισημερινό λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία από τις υπόλοιπες. Η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εποχές και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, το κλίμα (τα σύννεφα σκεδάζουν σε σημαντικό βαθμό τις ακτίνες του ήλιου) και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν αποφασιστικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που διατίθεται και προσπίπτει στα ηλιακά συστήματα. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία (kW/m^2) αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια (συνήθως σε kWh/m^2). Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1.1. Η χώρα μας συγκαταλέγεται μεταξύ των χωρών υψηλής ακτινοβολίας. Αυτό αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα, ιδιαίτερα σε σχέση με τις χώρες του ευρωπαϊκού βορρά, στην εφαρμογή των ηλιακών συστημάτων. Στην εικόνα 2.1.2 φαίνεται αναλυτικά η ετήσια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία της Ελλάδας με τη νότια Ελλάδα να δέχεται υψηλότερη ακτινοβολία απ' την υπόλοιπη.



Εικόνα 2.1.1: Χάρτης ετήσιας οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας των χωρών της Ευρώπης [2.2].



Εικόνα 2.1.2: Χάρτης ετήσιας οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας της Ελλάδας [2.2].

2.2. Γωνίες ήλιου και επιφανείας-χρήσιμες έννοιες και σχέσεις

Γεωγραφικό Πλάτος, φ : καθορίζεται από τη θέση του επιπέδου στη γη.

Γωνία ζενίθ, θ_z : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ηλίου.

Ηλιακό ύψος, α : $\alpha = 90^\circ - \theta_z$

Αζιμούθιο επιφάνειας, γ : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση.

Αζιμούθιο ηλίου, γ_s : είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

Κλίση επιπέδου, β : είναι η γωνία που σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο.

Ωριαία γωνία, ω : είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονά της με ρυθμό $0.25^\circ/\text{min}$. Η ωριαία γωνία δύσης ηλίου ω_s υπολογίζεται από την σχέση:

$$\cos\omega_s = -\tan\varphi \cdot \tan\delta \quad (2.2.1)$$

και από αυτή την σχέση μπορεί να υπολογιστεί η διάρκεια της ημέρας N σε ώρες:

$$N = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \quad (2.2.2)$$

Ηλιακή απόκλιση, δ : είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει $-23.45 < \delta < 23.45$ με θετικές τιμές προς το βορρά. Υπολογίζεται από τη σχέση [2.1]:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (2.2.3)$$

όπου n είναι η ημέρα του έτους.

Γωνία πρόσπτωσης, θ : της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτινών και της καθέτου στην επιφάνεια. Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο στραμμένες προς το νότο ($\gamma = 0^\circ$) ισχύει [2.1]:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\omega \quad (2.2.4)$$

Επίσης ορίζεται ο λόγος της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο οριζοντίου επιπέδου [2.1]:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} \quad (2.2.5)$$

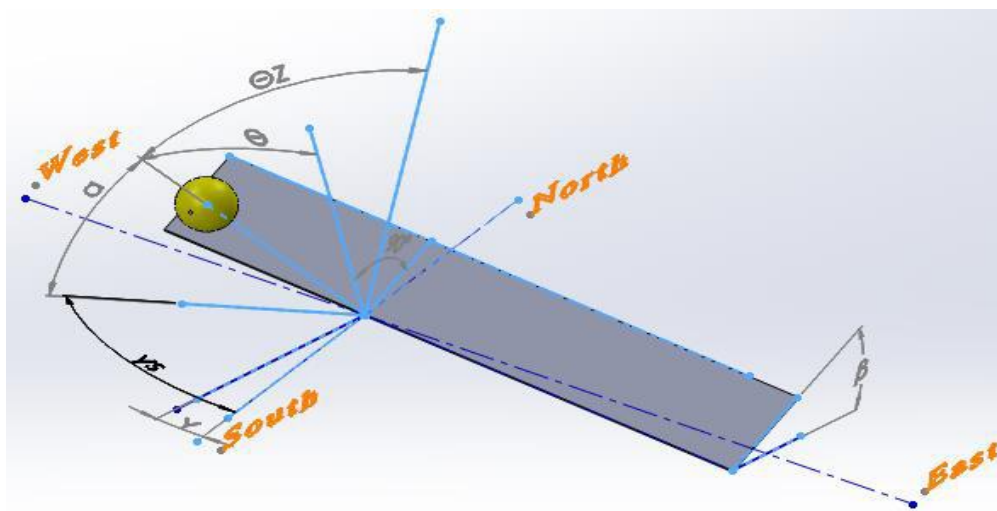
Για κεκλιμένες επιφάνειες στο βόρειο ημισφαίριο και στραμμένες προς το νότο ($\gamma=0^\circ$), όταν είναι γνωστή η άμεσος ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας G_b και θέλουμε να υπολογίσουμε την άμεσο ακτινοβολία κεκλιμένης επιφάνειας G_{bT} ορίζεται η σχέση [2.1]:

$$R_b = \frac{\sin\delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\omega}{\sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega} \quad (2.2.6)$$

Όσον αφορά την επίδραση του προσανατολισμού και κλίσης της επιφάνειας, ως προς την μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ισχύουν πρακτικά οι παρακάτω κανόνες [2.1]:

- α) Για μέγιστη ετήσια ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος, $\beta=\varphi$.
- β) Για μέγιστη θερινή ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά 15° μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους, $\beta=\varphi-15^\circ$.
- γ) Για μέγιστη χειμερινή ενέργεια απαιτείται κλίση συλλέκτη κατά 15° μεγαλύτερη του γεωγραφικού πλάτους, $\beta=\varphi+15^\circ$.
- δ) Αποκλίσεις από τις παραπάνω τιμές προκαλούν μικρές μειώσεις ενέργειας, π.χ. απόκλιση του β κατά 15° μειώνει την ενέργεια μόνο κατά 5%.
- ε) Ο βέλτιστος προσανατολισμός συλλέκτη είναι ο νότιος για το βόρειο ημισφαίριο και ο βόρειος για το νότιο ημισφαίριο, δηλαδή ο συλλέκτης πρέπει να είναι στραμμένος προς τον ισημερινό. Αποκλίσεις μέχρι 20° προκαλούν μικρές μειώσεις της προσπίπτουσας ενέργειας.

Το παρακάτω σχήμα 2.2.1 παρουσιάζει τις γωνίες που περιεγράφηκαν παραπάνω:



Σχήμα 2.2.1: Γωνίες μεταξύ ήλιου και κεκλιμένου επιπέδου [2.3].

2.3. Ηλιακή ενέργεια- Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Ηλιακή ενέργεια καλείται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο, τέτοιες είναι το φως, η θερμότητα και διάφορες ακτινοβολίες. Χαρακτηρίζεται από πολλά πλεονεκτήματα όπως συμβαίνει βέβαια με όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με τα πιο σημαντικά να είναι [2.4]:

- Είναι ενέργεια φιλική προς το περιβάλλον
- Το μηδενικό κόστος πρώτης ύλης (ήλιος)
- Απεξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα και την κυμαινόμενη τιμή τους
- Δυνατότητα αυτοπαραγωγής, αποφόρτισης των υποδομών και αποφυγής των απωλειών από μεγάλα δίκτυα μεταφοράς

Όμως πέρα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της, έχει και κάποια χαρακτηριστικά που καθιστούν δυσχερή την αξιοποίησή της όπως [2.4]:

- Το κόστος επένδυσης είναι ακόμα σε υψηλά επίπεδα σε σχέση με αυτό των συμβατικών μορφών.
- Οι μονάδες της είναι διεσπαρμένες και δεν υπάρχει η δυνατότητα να συγκεντρωθούν και να αποθηκευτούν σε μεγάλες ποσότητες ισχύος.
- Ο συντελεστής εκμετάλλευσής της είναι μικρός επειδή η διαθεσιμότητά της είναι περιορισμένη και με διακυμάνσεις για παράδειγμα λόγω συννεφιάς.

Ηλιακά συστήματα

Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία με τρεις τρόπους:

- Τα θερμικά ηλιακά συστήματα, στα οποία χρησιμοποιούνται κατάλληλοι συλλέκτες για τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας και την αποθήκευση της με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό.
- Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (PV), που μετατρέπεται η ηλιακή ενέργεια απ' ευθείας σε ηλεκτρική μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.
- Τα θερμοφωτοβολταϊκά ή υβριδικά φωτοβολταϊκά (PVT) που αποτελούν μια πιο καινούργια και εναλλακτική εκδοχή από τα κλασικά φωτοβολταϊκά.

Κάθε όμως σύστημα μετατροπής και αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνει και κάποια υποσυστήματα:

- Το σύστημα συλλογής και μετατροπής
- Ένα σύστημα αποθήκευσης, καθώς δεν έχουμε τη συνεχόμενη παροχή ηλιακής ενέργειας, έτσι πρέπει να αποθηκεύουμε αυτό που συλλέγεται για να χρησιμοποιηθεί λίγο αργότερα
- Ένα σύστημα ελέγχου του όλου συστήματος και της καλής λειτουργίας
- Ένα σύστημα μεταφοράς και χρήσης ενέργειας

2.4 Ηλιακοί συλλέκτες

Υπάρχουν τρία βασικά είδη ηλιακών συλλεκτών:

- Επίπεδοι συλλέκτες
- Συλλέκτες κενού
- Συγκεντρωτικοί συλλέκτες

2.4.1 Επίπεδοι συλλέκτες (Flat Plate Collectors)

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι η επικρατέστερη μορφή συλλέκτη που χρησιμοποιείται. Οι Hottel και Whillier τη δεκαετία του 1950 ήταν οι πρώτοι που σχεδίασαν ένα επίπεδο ηλιακό συλλέκτη σε μορφή αντίστοιχη με τη σημερινή [2.3]. Η παρακάτω εικόνα 2.4.1 δείχνει επίπεδους συλλέκτες.



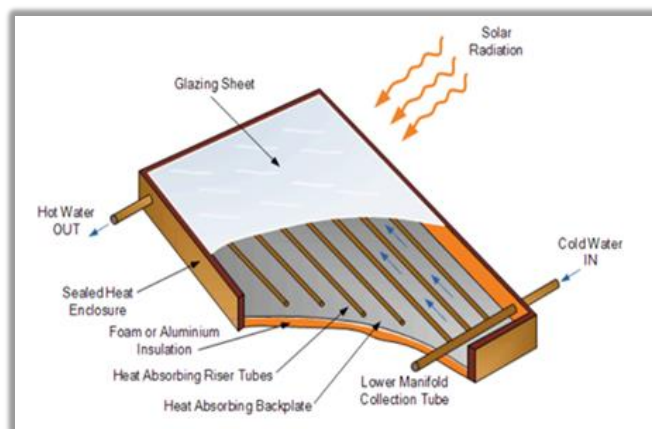
Εικόνα 2.4.1: Επίπεδοι συλλέκτες [2.5].

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης στα κτήρια [2.6] αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για θέρμανση χώρων με ενδοδαπέδια θέρμανση είτε μέσω συστημάτων με fan coil. Οι θερμοκρασίες για ζεστό νερό χρήσης και θέρμανσης κυμαίνονται από 40 έως 90°C. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για παραγωγή ψύξης μέσω ψυκτών απορρόφησης [2.7] και προσρόφησης [2.8]. Στη βιβλιογραφία συναντάμε πολλές πειραματικές εργασίες και προσομοιώσεις που στόχο έχουν τον προσδιορισμό και την εκτίμηση της απόδοσης των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών. Τα λογισμικά που έχουν χρησιμοποιηθεί για διάφορες μελέτες των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών είναι το TRNSYS [2.9] το ANSYS [2.10], το FLUENT [2.11] και το COMSOL [2.12].

Αρχές λειτουργίας

Ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης αποτελείται συνήθως από τον απορροφητήρα ή πλάκα απορρόφησης (absorber) που στη ουσία είναι ένα μεγάλο φύλλο από χαλκό ή αλουμίνιο, καθώς είναι και τα δύο καλοί αγωγοί θερμότητας, που είναι βαμμένο με μαύρο χρώμα για να απορροφήσει όσο το δυνατόν περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία για μέγιστη απόδοση. Ο απορροφητήρας είναι εφοδιασμένος με σύστημα μεταφοράς της ενέργειας σε ρευστό, π.χ. σωλήνες (flow tubes) αν πρόκειται για συλλέκτη θέρμανσης υγρού ή αεραγωγούς αν πρόκειται για θερμαντήρα αέρα. Αυτοί οι σωλήνες είναι συνήθως συγκολλημένοι απευθείας στην πλάκα απορρόφησης για να εξασφαλιστεί η μέγιστη επαφή επιφάνειας και η μεταφορά θερμότητας. Το ηλιακό φως θερμαίνει την απορροφητική επιφάνεια που αυξάνει τη θερμοκρασία. Καθώς η πλάκα θερμαίνεται, αυτή η θερμότητα διέρχεται και απορροφάται από το ρευστό που ρέει μέσα στους

χάλκινους σωλήνες, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται από το νοικοκυριό. Οι σωλήνες και η πλάκα απορρόφησης περικλείονται σε μονωμένο μεταλλικό ή ξύλινο κουτί με ένα φύλλο υαλοπίνακα, είτε από γυαλί είτε από πλαστικό στο μπροστινό μέρος, για να προστατεύεται η κλειστή πλάκα απορρόφησης και να δημιουργείται ένας μονωτικός χώρος αέρα. Το διάκενο αέρα μεταξύ της πλάκας και του υαλοπίνακα παγιδεύει αυτή τη θερμότητα, εμποδίζοντας έτσι τη διαφυγή της στην ατμόσφαιρα. Καθώς η πλάκα απορρόφησης θερμαίνεται, μεταφέρει τη θερμότητα στο ρευστό μέσα στο συλλέκτη, αλλά χάνει επίσης θερμότητα στο περιβάλλον. Για να ελαχιστοποιηθεί αυτή η απώλεια θερμότητας, ο πυθμένας και οι πλευρές ενός επίπεδου συλλέκτη είναι μονωμένοι. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να θερμαίνουν το ρευστό χρησιμοποιώντας είτε άμεσο είτε έμμεσο ηλιακό φως από ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών γωνιών. Λειτουργούν επίσης σε διάχυτο φως, το οποίο κυριαρχεί στις συννεφιασμένες ημέρες, καθώς σημαντικό είναι η απορροφούμενη θερμότητα και όχι τόσο το φως, που είναι σημαντικό στα φωτοβολταϊκά. Πόσο ζεστό γίνεται το κυκλοφορούν νερό εξαρτάται κυρίως από την εποχή του χρόνου, πόσο καθαρός είναι ο ουρανός και πόσο αργά το νερό ρέει μέσα από τους σωλήνες των συλλεκτών. Τα κύρια μέρη ενός επίπεδου συλλέκτη φαίνονται στην εικόνα 2.4.2.



Εικόνα 2.4.2: Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης [2.13].

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η συμπεριφορά του συλλέκτη περιγράφεται από την παρακάτω σχέση ισολογισμού ενέργειας που εκφράζει τον καταμερισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ενέργεια, θερμικές απώλειες και οπτικές απώλειες [2.1]:

$$Q_u = A_c \cdot [S - U_L(T_{p,m} - T_a)] \quad (2.4.1)$$

όπου:

$Q_u =$ Ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς (W),

$A_c =$ Επιφάνεια του συλλέκτη (m^2),

$S =$ Απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και των οπτικών απωλειών (W/m^2),

$U_L =$ Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, που εκφράζει τις θερμικές απώλειες από το συλλέκτη στο περιβάλλον μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) και αποτελείται από τρεις επιμέρους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.4.2)$$

όπου

$U_t =$ Συντελεστής θερμικών απωλειών κορυφής

$U_b =$ Συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένα

$U_e =$ Συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών,

$T_{p,m} =$ Μέση θερμοκρασία του απορροφητήρα ($^\circ C$)

$T_a =$ Θερμοκρασία του περιβάλλοντος ($^\circ C$)

Όμως πολλές φορές παρουσιάζει δυσκολίες η μέτρηση της $T_{p,m}$ ανάλογα το συλλέκτη και τις συνθήκες και γι' αυτό το λόγο αντικαθίσταται η θερμοκρασία του απορροφητήρα με τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη $T_{f,i}$ μέσω της εξίσωσης [2.1]:

$$T_{p,m} = T_{f,i} + \frac{Q_u}{A_c \cdot U_L \cdot F_R} \cdot (1 - F_R) \quad (2.4.3)$$

όπου $F_R =$ παράγοντας θερμικής απολαβής του συλλέκτη

Οπότε με αντικατάσταση προκύπτει η σχέση:

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [S - U_L \cdot (T_{f,i} - T_a)] \quad (2.4.4)$$

$$\text{όπου } S = (\tau\alpha) \cdot G_T \quad (2.4.5)$$

όπου $(\tau\alpha)$ είναι το μέσο και συγχρόνως το προσαυξημένο γινόμενο διαπερατότητας – απορροφητικότητας και G_T είναι η στιγμιαία τιμή της ακτινοβολίας.

Σαν στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του συλλέκτη (η_i), ορίζεται ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύος (Q_u), ως προς την αντίστοιχη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ($A_c G_T$), οπότε προκύπτει [2.1]:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R \cdot (\tau\alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{T_i - T_a}{G_T} \quad (2.4.6)$$

2.4.2 Συλλέκτες με σωλήνα κενού (Evacuated Tube Collectors)

Όπως προαναφέραμε οι συμβατικοί επίπεδοι συλλέκτες έχουν αναπτυχθεί πολύ σε περιοχές με ζεστό κλίμα. Τα οφέλη τους όμως μειώνονται σημαντικά με το κρύο και τη συννεφιά. Επιπλέον, η επιρροή των καιρικών συνθηκών όπως η υγρασία έχουν ως συνέπεια την αλλοίωση των υλικών κατασκευής με αποτέλεσμα την πτώση της απόδοσης. Οι συλλέκτες με σωλήνα κενού λειτουργούν αντίθετα από τους υπόλοιπους συλλέκτες της αγοράς. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές πειραματικές εργασίες και προσομοιώσεις που στόχο έχουν την αύξηση της απόδοσης του συλλέκτη [2.14] αλλά και το χαμηλό κόστος [2.15].

Αρχές λειτουργίας

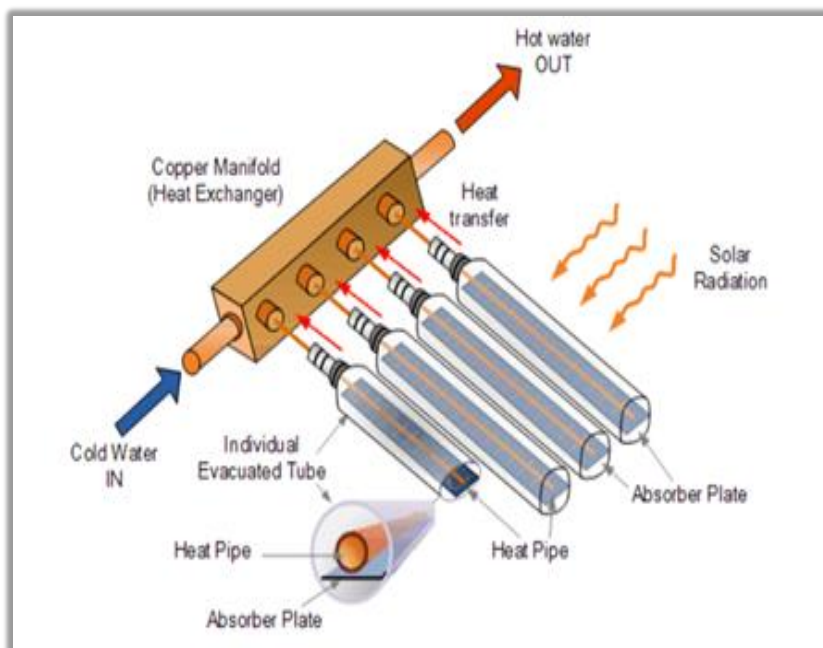
Ο συλλέκτης κενού αποτελείται από έναν αριθμό σειρών παράλληλων διαφανών γυάλινων σωλήνων συνδεδεμένων σε ένα σωλήνα κεφαλής και οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη θέση της μαύρης πλάκας απορρόφησης θερμότητας που είδαμε στον προηγούμενο επίπεδο συλλέκτη. Η εικόνα 2.4.3 δείχνει ένα συλλέκτη που αποτελείται από πολλούς σωλήνες κενού. Αυτοί οι γυάλινοι σωλήνες είναι κυλινδρικού σχήματος.



Εικόνα 2.4.3: Συλλέκτης αποτελούμενος από πολλούς σωλήνες κενού [2.15].

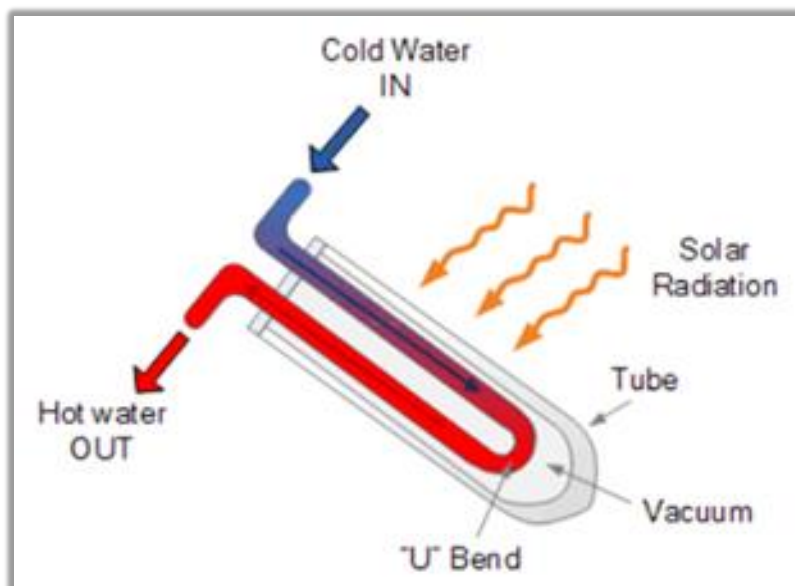
Κάθε σωλήνας αποτελείται από ένα χοντρό γυάλινο εξωτερικό σωλήνα και ένα λεπτότερο γυάλινο εσωτερικό σωλήνα (που ονομάζεται "διπλός γυάλινος σωλήνας") ή από ένα "σωλήνα θερμοσφαιριδίων" ο οποίος καλύπτεται με ειδική επίστρωση που απορροφά την ηλιακή ενέργεια αλλά εμποδίζει την απώλεια θερμότητας. Οι σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από βοριοπυριτικό ή γυαλί σόδας, που είναι ισχυρό, ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες και έχει υψηλή μετάδοση για ηλιακή ακτινοβολία. Σε αντίθεση με τους επίπεδους συλλέκτες, οι συλλέκτες με σωλήνες κενού δε θερμαίνουν το νερό απευθείας μέσα στους σωλήνες. Αντ' αυτού, ο αέρας απομακρύνεται ή εκκενώνεται από το χώρο μεταξύ των δύο σωλήνων, σχηματίζοντας ένα κενό (εξ ου και οι ονομαζόμενοι σωλήνες κενού). Αυτό το κενό λειτουργεί ως μονωτής μειώνοντας κάθε απώλεια θερμότητας σημαντικά στην ατμόσφαιρα που το περιβάλλει είτε μέσω μεταφοράς είτε μέσω ακτινοβολίας καθιστώντας το συλλέκτη πολύ πιο αποδοτικό από το εσωτερικό μονωτικό που προσφέρουν οι επίπεδοι συλλέκτες. Με τη βοήθεια αυτού του κενού, οι συλλέκτες σωλήνων κενού γενικά παράγουν υψηλότερες θερμοκρασίες ρευστού από ό, τι οι αντίστοιχοι επίπεδοι συλλέκτες, οπότε αυτό μπορεί να γίνει πολύ καυτό το καλοκαίρι. Επιπλέον, η γωνία του ηλιακού φωτός είναι πάντα κάθετη προς τους σωλήνες απορρόφησης θερμότητας που επιτρέπει στους συλλέκτες κενού να λειτουργούν καλά ακόμη και όταν το ηλιακό φως είναι χαμηλό, όπως όταν είναι νωρίς το πρωί ή αργά το απόγευμα ή όταν σκιάζονται από σύννεφα. Οι συλλέκτες με σωλήνες κενού είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε περιοχές με κρύους, θολερούς χειμερινούς καιρούς.

Επιπλέον, μέσα σε κάθε γυάλινο σωλήνα, ένα επίπεδο ή καμπύλο πτερύγιο από αλουμίνιο ή χαλκό συνδέεται με μεταλλικό σωλήνα θερμότητας που διέρχεται από τον εσωτερικό σωλήνα όπως δείχνει αναλυτικά η εικόνα 2.4.4. Το πτερύγιο καλύπτεται με επιλεκτική επικάλυψη που μεταφέρει θερμότητα σ' ένα ανόργανο μη τοξικό πτητικό ρευστό που κυκλοφορεί μέσω του σωλήνα. Αυτός ο σφραγισμένος αγωγός θερμότητας χαλκού μεταφέρει την ηλιακή θερμότητα μέσω της μεταφοράς του εσωτερικού ρευστού σε ένα "ζεστό βολβό" που θερμαίνει έμμεσα ένα χάλκινο εναλλάκτη θερμότητας μέσα στη δεξαμενή κεφαλής. Αυτοί οι χαλκοσωλήνες είναι όλοι συνδεδεμένοι με έναν κοινό που στη συνέχεια συνδέεται με μια δεξαμενή αποθήκευσης, θερμαίνοντας έτσι το ζεστό νερό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το ζεστό νερό μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί τη νύχτα ή την επόμενη ημέρα λόγω των μονωτικών ιδιοτήτων της δεξαμενής.



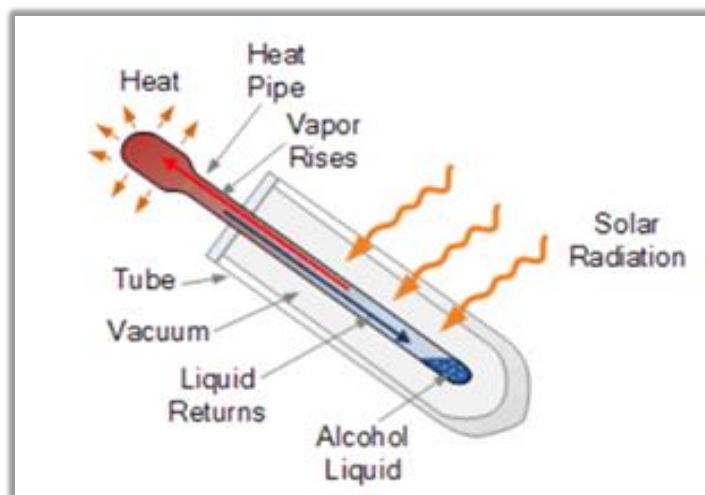
Εικόνα 2.4.4: Συλλέκτης με σωλήνες κενού [2.16].

Υπάρχουν διάφορα είδη συλλεκτών κενού όπως ο συλλέκτης κενού με κυλινδρικό απορροφητήρα και σωλήνωση σε σχήμα U (εικόνα 2.4.5). Πιο συγκεκριμένα, ο ένας σωλήνας φέρει το κρύο και ο άλλος το ζεστό νερό.



Εικόνα 2.4.5: Συλλέκτης κενού με αγωγό τύπου U [2.16].

Παραλλαγή αυτού του σωλήνα μπορεί να προκύψει με χρήση θερμοσωλήνα (heat pipe) (εικόνα 2.4.6).



Εικόνα 2.4.6: Συλλέκτης κενού με θερμοσωλήνα [2.16].

Συμπερασματικά, τα πλεονεκτήματα των συλλεκτών με σωλήνες κενού είναι τα εξής:

- Συνήθως ο ηλιακός συλλέκτης χρησιμοποιεί ατομικούς στρογγυλεμένους σωλήνες οι οποίοι είναι πάντα κάθετοι στις ακτίνες του ήλιου για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας. Αυτό επιτρέπει σε ένα σύστημα ηλιακού ζεστού νερού που χρησιμοποιεί έναν συλλέκτη με σωλήνες κενού να λειτουργεί σε πολύ υψηλή απόδοση και θερμοκρασία για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ένα συμβατικό επίπεδο συλλέκτη.
- Οι συλλέκτες κενού, όπως και οι επίπεδοι συλλέκτες, απορροφούν τόσο άμεση όσο και διάχυτη ακτινοβολία όμως ο βαθμός απόδοσης λόγω του κυλινδρικού σχήματος είναι σαφώς υψηλότερος σε χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης. Αυτό συγκριτικά τους δίνει ένα πλεονέκτημα κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Τα δομικά προβλήματα βάρους της στέγης που προκαλούνται από τα τυπικά συστήματα επίπεδοι συλλέκτη εξαλείφονται καθώς οι ηλιακοί σωλήνες δε γεμίζουν με μεγάλες ποσότητες βαρέος ύδατος.
- Ο συνδυασμός επιλεκτικής επιφάνειας και αποτελεσματικής μεταφοράς προσδίδει καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Το κενό μειώνει τις απώλειες μεταφοράς και αγωγιμότητας, οπότε οι συλλέκτες κενού μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες απ' τους επίπεδους. Οι ιδιότητες μόνωσης του κενού είναι τόσο καλές που ενώ ο εσωτερικός σωλήνας μπορεί να είναι τόσο υψηλός όσο 150°C, ο εξωτερικός σωλήνας είναι πιο δροσερός στην αφή. Αυτό σημαίνει ότι οι θερμοαντίες νερού

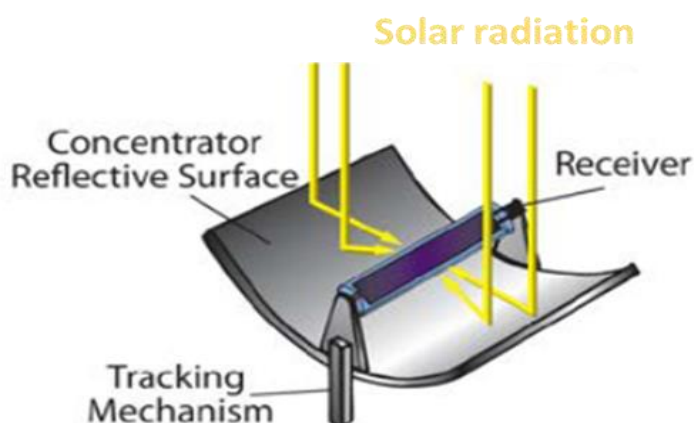
με σωλήνα κενού μπορούν να λειτουργήσουν καλά και μπορούν να ζεσταίνουν το νερό σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες ακόμη και σε κρύο καιρό όταν οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν χαμηλή απόδοση λόγω απώλειας θερμότητας.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Σε περίπτωση που υγρασία εισχωρήσει εντός του σωλήνα, υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης.
- Το σχετικά υψηλό κόστος, το οποίο μπορεί να αποσβεστεί από τη μεγαλύτερη απόδοση τους.

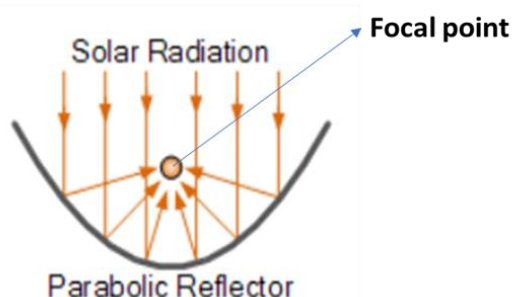
2.4.3. Συγκεντρωτικοί συλλέκτες (Concentrating Collectors)

Όταν είναι επιθυμητή η απόδοση της ενέργειας σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές που επιτυγχάνονται με τους συνήθεις επίπεδους συλλέκτες, κυρίως για ηλεκτροπαραγωγή, μπορεί να γίνει χρήση των συγκεντρωτικών συλλεκτών. Σ' αυτούς, οι υψηλές θερμοκρασίες αναπτύσσονται με συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια μικρή περιοχή εστιακού σημείου (δέκτης), μειώνοντας έτσι και τις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Η συγκέντρωση επιτυγχάνεται με παρεμβολή μιας οπτικής ανακλαστικής ή διαθλαστικής συσκευής μεταξύ της πηγής της ακτινοβολίας (ήλιος) και της επιφάνειας απορρόφησης. Τα κύρια μέρη του συγκεντρωτικού συλλέκτη είναι ο συγκεντρωτής (concentrator) και ο δέκτης (receiver), ο οποίος περιλαμβάνει τον απορροφητήρα με το σύστημα μετατροπής της ακτινοβολίας σε άλλη μορφή ενέργειας και τα σχετικά καλύμματα καθώς και τη μόνωση (εικόνα 2.4.7).



Εικόνα 2.4.7: Συγκεντρωτικός συλλέκτης [2.17].

Το σχήμα των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών πρέπει να σχεδιάζεται ειδικά έτσι ώστε όλο το εισερχόμενο ηλιακό φως να αντανακλάται στην επιφάνεια του συλλέκτη και να φτάνει στο ίδιο σημείο εστίασης ανεξάρτητα από το μέρος του συλλέκτη που το φως του ήλιου χτυπά πρώτα (εικόνα 2.4.8).



Εικόνα 2.4.8: Εστίαση ηλιακής ακτινοβολίας σ' ένα σημείο.

Συγκεντρώνοντας τους ηλιακούς συλλέκτες για οικιακές εφαρμογές είναι συνήθως μια παραβολική κοιλότητα σχήματος U (εξ ου και το όνομά τους).

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- PTC (Parabolic Trough Concentrator) ή Παραβολικός συλλέκτης με κάτοπτρο
- CPC (Compound Parabolic concentrator) ή Σύνθετος παραβολικός συλλέκτης
- Συλλέκτης με παραβολοειδές κάτοπτρο (Solar Dish Collector)
- Επιμήκης συλλέκτης με φακούς/κάτοπτρα Fresnel
- Ηλιακός πύργος (Solar Tower)

Οι παραβολικοί συλλέκτες με κάτοπτρο (PTC) αποτελούν το πιο διαδεδομένο είδος των συγκεντρωτικών συλλεκτών. Οι Chahine et al. [2.18] αναλύουν τη χρήση των PTC σε εφαρμογές με HVAC συστήματα. Οι Marrakchi et al. [2.19] προσδιόρισαν τη θερμοκρασιακή διακύμανση σ' ένα παραβολικό συλλέκτη με κάτοπτρο χρησιμοποιώντας το λογισμικό COMSOL.

Αρχές λειτουργίας

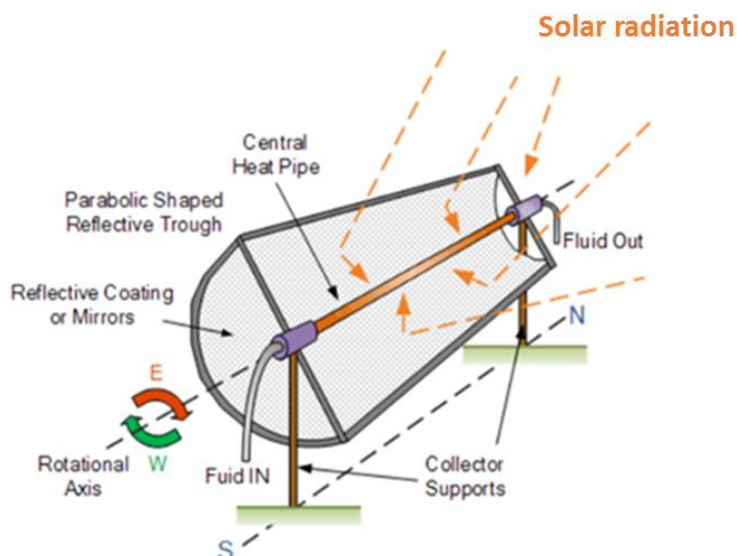
Ένας παραβολικός συλλέκτης κατασκευάζεται ως ένας μακρύς παραβολικός ανακλαστικός καθρέφτης ο οποίος είναι συνήθως βαμμένος με αντανακλαστικό ασήμι ή είναι κατασκευασμένος από γυαλισμένο αλουμίνιο ή χρησιμοποιεί καθρέπτες που εκτείνονται γραμμικά στο σχήμα της καμπύλης. Ένας μεταλλικός μαύρος σωλήνας θερμότητας μέσα σε ένα σφραγισμένο γυάλινο σωλήνα που μπορεί επίσης να εκκενωθεί

χρησιμοποιείται για τη μείωση των θερμικών απωλειών. Ο σωλήνας θερμότητας περιέχει ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας το οποίο αντλείται γύρω από έναν βρόχο εντός του σωλήνα που απορροφά τη θερμότητα καθώς διέρχεται.

Ένας παραβολικός συλλέκτης μπορεί να παράγει πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες πιο αποτελεσματικά από έναν επίπεδο συλλέκτη, δεδομένου ότι η επιφάνεια του απορροφητή είναι πολύ μικρότερη. Το υγρό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο είναι συνήθως ένα μείγμα νερού και άλλου πρόσθετου ή θερμικού ελαίου, αντλείται μέσω του σωλήνα και απορροφά την ηλιακή θερμότητα φτάνοντας θερμοκρασίες άνω των 200°C. Το ζεστό νερό αποστέλλεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας όπου θερμαίνει απευθείας μια δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού για χρήση στο σπίτι κάνοντας αυτό το είδος ηλιακής θέρμανσης ένα ενεργό σύστημα κλειστού βρόχου. Ωστόσο, οι υπέρυθροι ανακλαστές χρησιμοποιούν μόνο άμεση ηλιακή ακτινοβολία για να θερμαίνουν το σωλήνα του δέκτη καθώς η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία δεν μπορεί να επικεντρωθεί στον απορροφητή καθιστώντας τον λιγότερο αποτελεσματικό όταν ο ουρανός είναι θολός ή ο ήλιος είναι εκτός ευθυγράμμισης. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, οι περισσότεροι συγκεντρωτικοί συλλέκτες απαιτούν κάποια μορφή μηχανικού εξοπλισμού που προσανατολίζει συνεχώς τους συλλέκτες προς τον ήλιο, διατηρώντας τον απορροφητήρα αγωγού θερμότητας στο σωστό εστιακό σημείο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συστήματος παρακολούθησης του ήλιου που ευθυγραμμίζει τα κάτοπτρα με τον ήλιο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, μεγιστοποιώντας το κέρδος της ηλιακής θερμότητας.

Ο συλλέκτης γενικά έχει έναν και μοναδικό άξονα περιστροφής κατά μήκος του κατόπτρου, ο οποίος μπορεί να προσανατολιστεί προς την ανατολή, προς τη δύση, να εντοπίζει τον ήλιο από βορρά προς νότο ή να κατευθύνεται προς βορρά, προς νότο και να εντοπίζει τον ήλιο από ανατολικά προς δυτικά. Τα παραβολικά κάτοπτρα είναι γενικά ευθυγραμμισμένα σε άξονα βορρά προς νότο και περιστρέφονται για να παρακολουθούν τον ήλιο καθώς μετακινείται στον ουρανό κάθε μέρα από το πρωί μέχρι το βράδυ. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου λειτουργίας παρακολούθησης είναι ότι απαιτείται ελάχιστη ρύθμιση συλλογής κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα τα ηλιακά κάτοπτρα να βλέπουν πάντα τον ήλιο το μεσημέρι, αλλά η απόδοση του συλλέκτη νωρίς το πρωί ή αργά το απόγευμα μειώνεται σημαντικά λόγω των μεγάλων γωνιών πρόσπτωσης των κατόπτρων.

Οι παραβολικοί συλλέκτες με κάτοπτρο είναι πιο αποδοτικοί για βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες ποσότητες ζεστού νερού όλο το εικοσιτετράωρο. Επίσης, η σύνδεση παραβολικών κατόπτρων για τη δημιουργία πεδίων συλλογής απαιτεί μεγάλες εκτάσεις γης για την εγκατάσταση, αλλά αντισταθμίζουν την ανάγκη για συμβατική ενέργεια και παρέχουν εξοικονόμηση ενέργειας και περιβαλλοντικά οφέλη.



Εικόνα 2.4.9: Παραβολικός κατοπτρικός συλλέκτης [2.20].



Εικόνα 2.4.10: Συγκεντρωτικοί συλλέκτες στον Καναδά [2.21].

2.5 Φωτοβολταϊκά συστήματα (PV)

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με σκοπό είτε την πώληση στο δίκτυο είτε την αυτοκατανάλωση. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ φωτοβολταϊκών στοιχείων ή κυψέλες μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Μπορούν να τοποθετηθούν στις οροφές, στις στέγες κτηρίων όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5.1, σε οποιοδήποτε ανοιχτό ιδιόκτητο χώρο (φωτοβολταϊκά πάρκα), σε ανοιχτούς χώρους πάρκινγκ ως σκίαστρα.



Εικόνα 2.5.1: Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε στέγη [2.22].

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

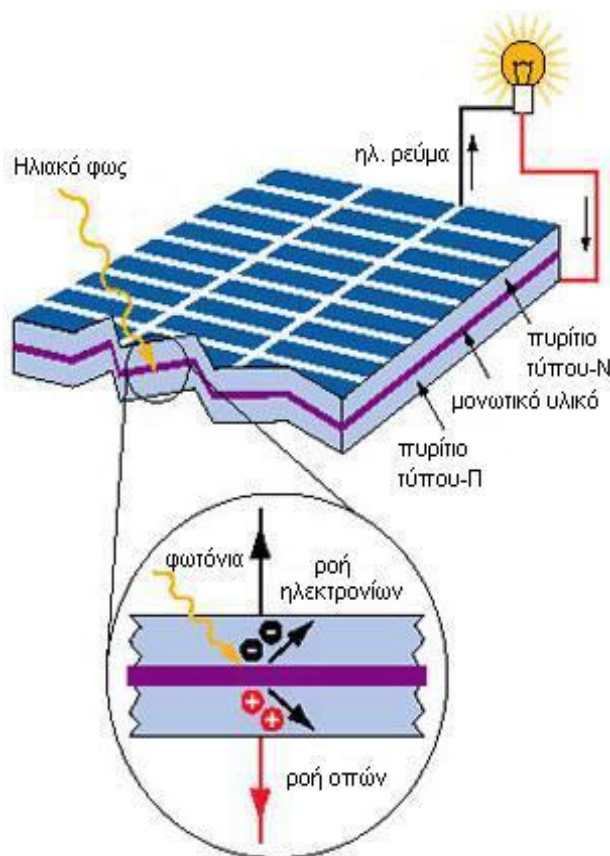
Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, αποτελεί τη βασική φυσική διαδικασία μέσω της οποίας ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική. Ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο, το αρσενιούχο γάλλιο ή ο δισελινιοϊνδιούχος χαλκός, χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Το στοιχείο του κρυσταλλικού πυριτίου ωστόσο παραμένει το πιο διαδεδομένο φωτοβολταϊκό στοιχείο [2.23].

Πιο συγκεκριμένα το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής Φ/Β, λόγω της υφιστάμενης υποδομής για το συγκεκριμένο υλικό αυτό την τελευταία πενήνταετία. Η τεχνογνωσία πάνω στο πυρίτιο οφείλεται στις πολλαπλές εφαρμογές του στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και στα Φ/Β πλαίσια που

τροφοδοτούν δορυφόρους και υποστηρίχθηκε από μεγάλες κυβερνητικές και βιομηχανικές επενδύσεις. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός για την επεξεργασία του πυριτίου ώστε να έχει την απαιτούμενη καθαρότητα και κρυσταλλική δομή. Σε συνδυασμό με την αφθονία του στη γη και τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά, το πυρίτιο είναι ικανό και συμφέρον μέσο για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Το μόνο μειονέκτημα του πυριτίου είναι ότι είναι εύθραυστο και ως εκ τούτου απαιτεί τον σχηματισμό στοιχείων μεγάλου πάχους [2.23].

Όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού, τότε ένα μέρος αυτού ανακλάται, ένα άλλο τη διαπερνά, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από το υλικό. Η απορρόφηση του φωτός, έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας, η οποία συνήθως είναι θερμότητα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους, σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται σε μεγάλο βαθμό η τεχνολογική πρόοδος του τομέα της ηλεκτρονικής και του τομέα της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια, δηλαδή “πακέτα” ηλιακής ενέργειας. Τα φωτόνια περιλαμβάνουν διαφορετικά ποσά ενέργειας, που αντιστοιχούν στα διάφορα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος. Η τεχνολογία, μας έδωσε τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούν διόδους ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n με τη μορφή επίπεδης πλάκας. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, μπορεί να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο διαρκεί η πρόσπτωση της ακτινοβολίας, δημιουργείται περίσσεια φορέων, δηλαδή περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Οι φορείς αυτοί, κυκλοφορούν στο στερεό και αν δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, δέχονται την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης p-n. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κατευθύνονται προς το τμήμα τύπου-n και οι οπές προς το τμήμα τύπου-p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Αν στους ακροδέκτες συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο, παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο (εικόνα 2.5.2). Τελικά, η όλη διάταξη αποτελεί

μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του κυττάρου. Η ύπαρξη της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες της παραπάνω διάταξης, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Εικόνα 2.5.2: Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [2.24].

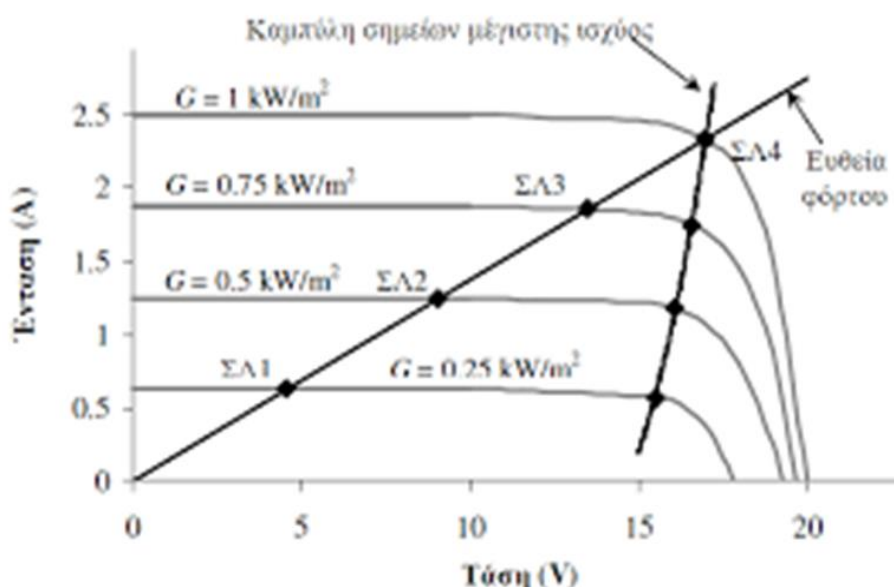
Η καμπύλη I-V ενός Φ/B στοιχείου

Για τον έλεγχο της αποδοτικής λειτουργίας ενός Φ/B στοιχείου αλλά και για το σχεδιασμό των ηλεκτρονικών που συνδυάζονται μ' αυτό πρέπει να προσδιορισθούν τα σημεία μέγιστης ισχύος, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου. Γενικότερη επιδίωξη είναι το σημείο λειτουργίας του στοιχείου σε κάθε διαφορετική κατάσταση, που θα προκύψει π.χ. από μεταβολή της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας, να αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος, P_m , για τη δεδομένη κατάσταση (Σχήμα 2.5.3, για την καμπύλη I-V, με $E = 1 \text{ kW/m}^2$).

Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αποδίδεται στην αντίσταση μόνο για ορισμένο επίπεδο ακτινοβολίας. Σε διαφορετικές τιμές αποδίδεται ισχύς μικρότερη από την αντίστοιχη

μέγιστη ισχύ. Στο σχήμα 2.5.3 τα σημεία ΣΛ1, ΣΛ2, ΣΛ3 και ΣΛ4 αποτελούν τα τέσσερα σημεία λειτουργίας αντίστοιχα των τεσσάρων τιμών έντασης της ακτινοβολίας. Μόνο το ΣΛ4 συμπίπτει με το ΣΜΙ της I-V, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας $E = 1 \text{ kW/m}^2$ όπως προαναφέρθηκε. Στις υπόλοιπες καμπύλες I-V τα δύο σημεία δε συμπίπτουν. Για να συμβεί κάτι τέτοιο πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση, έτσι ώστε η νέα ευθεία φόρτου να περνά από το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της νέας καμπύλης I-V. Οι τιμές ρεύματος-τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος συμβολίζονται με I_m και V_m . Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει το Φ/Β στοιχείο, υπό δεδομένη προσπίπτουσα μας δίνεται από την σχέση:

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (2.5.1)$$



Σχήμα 2.5.3: Η καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου [2.24].

Υποσυστήματα Φ/Β συστημάτων

Στο εμπόριο διατίθενται φωτοβολταϊκά πάνελ σε διάφορες τιμές ονομαστικής ισχύος, ανάλογα με την τεχνολογία και τον αριθμό των φωτοβολταϊκών κυψελών που τα αποτελούν. Έτσι, για παράδειγμα ένα πάνελ 36 κυψελών μπορεί να έχει ονομαστική ισχύ 70-80W, ενώ μεγαλύτερα πάνελ μπορεί να φτάσουν και τα 250W. Εκτός από το πυρίτιο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή των πάνελ όπως κadmium με τελλούριο (Cd-Te) και ο ινδοδισεληνιούχος χαλκός. Σε αυτές τις κατασκευές η μορφή του στοιχείου διαφέρει σημαντικά από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου και έχει

συνήθως τη μορφή λωρίδας πλάτους μερικών χιλιοστών και μήκους αρκετών εκατοστών [2.25].

Πρακτικά ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 1kW συνδεδεμένο με το δίκτυο παράγει 1300-1700 kWh ετησίως με ένα βαθμό απόδοσης 5-15 %, ανάλογα με την τεχνολογία του και τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής. Κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Σύστημα μετατροπής ισχύος
- Ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου και προστασίας
- Μπαταρίες για περιπτώσεις αυτοκατανάλωσης

A) Σύστημα μετατροπής ισχύος [2.25]

Τα φωτοβολταϊκά παράγουν συνεχές ρεύμα ενώ τα φορτία καταναλώνουν εναλλασσόμενο ρεύμα. Για τη μετατροπή της ισχύος χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς σε εναλλασσόμενο (DC/AC). Σκοπός των συστημάτων μετατροπής ισχύος είναι η κατάλληλη ρύθμιση των χαρακτηριστικών του παραγόμενου ρεύματος (f_v), ώστε να καταστεί δυνατή η τροφοδοσία των διάφορων καταναλώσεων.

Ο αντιστροφέας (inverter) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Είναι δυνατόν να υπάρχει ως αυτόνομη ηλεκτρονική συσκευή ή ως βαθμίδα άλλης ηλεκτρονικής συσκευής. Ως αυτόνομη συσκευή χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις συστημάτων όπου χρειάζεται να μετατρέψουμε 12V ή 14V, σε εναλλασσόμενη 220V, ενώ ως βαθμίδα χρησιμοποιείται στα UPS (συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος). Η κυριότερη διάκριση των αντιστροφέων όσον αφορά τη χρήση τους σε εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι σε αντιστροφείς διασυνδεδεμένων και αυτόνομων συστημάτων.

Τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή του αντιστροφέα αποτελούν η αξιοπιστία, η ενεργειακή απόδοση, οι αρμονικές παραμορφώσεις, το κόστος και η συμβατότητα με τις τεχνικές απαιτήσεις της ΔΕΗ. Σε ένα τυπικό σύστημα ο αντιστροφέας τοποθετείται σε απόσταση από τα φωτοβολταϊκά και σε στεγασμένο χώρο. Ωστόσο έχουν αναπτυχθεί πλαίσια με ενσωματωμένους αντιστροφείς με συνέπεια την αντικατάσταση των καλωδιώσεων, χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη ασφάλεια.

B) Ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου και προστασίας

Το φωτοβολταϊκό σύστημα συμπληρώνουν οι ηλεκτρονικές διατάξεις ελέγχου, οι καλωδιώσεις (συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος) και σχετικό ηλεκτρολογικό υλικό, οι διατάξεις ασφαλείας, ο μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας και σύστημα παρακολούθησης της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος [2.25].

Γ) Μπαταρίες [2.4]

Σε περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων είναι απαραίτητη η χρήση μπαταριών για την αποθήκευση ενέργειας και χρησιμοποίησης της λίγο αργότερα. Η επιλογή της σωστής μπαταρίας που να καλύπτει τις ανάγκες μας σε ρεύμα δεν είναι εύκολη υπόθεση. Για παράδειγμα, διαφορετικού τύπου μπαταρία πρέπει να εγκαταστήσουμε σε αυτόνομο για μόνιμη κατοικία και διαφορετικού τύπου για εξοχικό σπίτι ή για φωτισμό. Η τιμή των μπαταριών κυμαίνεται ανάλογα με τον τύπο και τα χαρακτηριστικά τους. Επιλέγοντας λάθος μπαταρίες το αποτέλεσμα θα είναι να σπαταλήσουμε ενέργεια και παραπάνω χρήματα.

Στα αυτόνομα δίκτυα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης, οι οποίες διακρίνονται σε:

- Μπαταρίες ανοιχτού τύπου με υγρά. Σε αυτές ξεβιδώνοντας τα πώματα μπορούμε εύκολα να παρακολουθήσουμε την περιεκτικότητα σε ηλεκτρολύτη και να μετράμε την πυκνότητα του με πυκνόμετρο. Ο ρυθμιστής φόρτισης αναζωογονεί (equalization) την μπαταρία μια φορά τον μήνα παρέχοντας μεγάλη ποσότητα ρεύματος για μερικές ώρες. Με το equalization μειώνουμε τις πιθανότητες δημιουργίας κρυστάλλων στην επιφάνεια της πλάκας μολύβδου και της θείωσης, παράγοντες που μειώνουν την διάρκεια ζωής των μπαταριών. Κατά την φόρτιση και αποφόρτιση εκλύουν αέρια γι' αυτό τοποθετούνται σε χώρο που αερίζεται και η συντήρησή τους γίνεται τουλάχιστον ανά εξάμηνο καθώς τα υγρά των μπαταριών πρέπει να καλύπτουν τα στοιχεία (πλάκες) μολύβδου.
- Μπαταρίες κλειστού τύπου. Αυτές είναι ιδανικές όταν δεν έχουμε τον χρόνο να τις παρακολουθήσουμε καθώς δεν χρειάζονται συντήρηση. Το equalization δεν είναι δυνατό γιατί οι μπαταρίες είναι κλειστού τύπου και υπάρχει κίνδυνος ατυχήματος. Επίσης τα αέρια ανακυκλώνονται μέσα στην μπαταρία σε αντίθεση με τις μπαταρίες ανοιχτού τύπου.

2.6 Θερμοφωτοβολταϊκά συστήματα (PV-Thermal)

Μια πιο καινούργια και εναλλακτική εκδοχή από τα κλασικά φωτοβολταϊκά αποτελούν τα θερμοφωτοβολταϊκά ή υβριδικά φωτοβολταϊκά (PVT).

Τα θερμοφωτοβολταϊκά ή υβριδικά φωτοβολταϊκά (PV/T ή PVT) είναι συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμική και ηλεκτρική ενέργεια. Η ιδιομορφία των PVT έγκειται στο γεγονός πως όχι μόνο χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά παράλληλα παράγουν και θερμική ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας εργαζόμενο μέσο αέρα ή συνήθως νερό. Με τον τρόπο αυτό, όχι μόνο αυξάνεται η απόδοση του συστήματος λόγω της χρησιμοποίησης του μέσου για σκοπούς θέρμανσης, αλλά αυξάνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού που με την απαγωγή θερμότητας μειώνεται η θερμοκρασία του. Η χρήση του νερού ως εργαζόμενο μέσο, είναι αποδοτική όλο το χρόνο κυρίως σε χώρες με ήπιο ή θερμό κλίμα, αντίθετα η κυκλοφορία αέρα απαιτεί απλούστερη και φθηνότερη διάταξη αλλά η ψύξη του φωτοβολταϊκού είναι λιγότερο αποδοτική. Η θέρμανση του φωτοβολταϊκού οφείλεται στην απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και η ψύξη τους θεωρείται αναγκαία για την καλή απόδοσή τους. Ο συνήθης τρόπος ψύξης του φωτοβολταϊκού με νερό είναι η κυκλοφορία του μέσω εναλλάκτη θερμότητας σε επαφή με το πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στη συνέχεια το ζεσταμένο νερό αποθηκεύεται σε κάποιο δοχείο για την εκμετάλλευση του και αυτό με τη σειρά του τροφοδοτεί πάλι τα θερμοφωτοβολταϊκά και επαναλαμβάνεται ο κύκλος.

Ένας σημαντικός όγκος έρευνας έχει εξελιχθεί στην ανάπτυξη της τεχνολογίας PVT από τη δεκαετία του 1970. Η πρώτη εργασία έγινε από τον Martin Wolf το 1976 με επίπεδους συλλέκτες [2.26]. Η ιδέα αυτής της συνδυασμένης τεχνολογίας είναι να χρησιμοποιηθεί πολύτιμη επιφάνεια στέγης ενός κτηρίου τόσο για θέρμανση όσο και για ηλεκτρική ενέργεια καθώς και για τη βελτίωση της ηλεκτρικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών μονάδων που τους ψύχουν με ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας.

Περισσότερη δουλειά σε αυτόν τον τύπο υβριδικών συστημάτων γίνεται από τους Zondag et al. [2.27-2.28], οι οποίοι διερεύνησαν αριθμητικά τη συμπεριφορά του PVT. Σε αυτήν, συνέκριναν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από ένα δυναμικό τρισδιάστατο μοντέλο και αυτά που αποκτήθηκαν από ένα άλλο με τρία σταθερά μοντέλα (1D, 2D, 3D). Τα αριθμητικά αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν επίσης με πειραματικά, όπου

υπήρχε ένα μέγιστο σφάλμα της τάξης του 5%. Επιπλέον, ο Chow [2.29] πρότεινε ένα σαφές δυναμικό μοντέλο. Μελετήσε την επίδραση ορισμένων παραμέτρων, όπως τη παροχή μάζας και τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με αγωγιμότητα μεταξύ του απορροφητή και του φωτοβολταϊκού κυττάρου PV επί του θερμικού και την ηλεκτρική απόδοση.

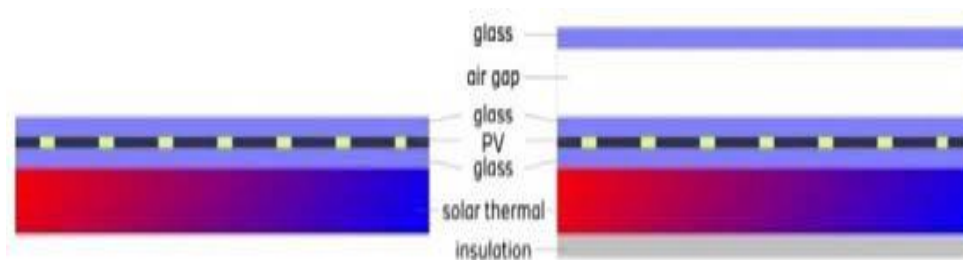
Οι Bhattarai et al. [2.30] συνέκριναν ένα ηλιακό θερμικό σύστημα με ένα συμβατικό ηλιακό σύστημα, αριθμητικά και πειραματικά. Διαπίστωσαν ότι η αποτελεσματικότητα της εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας του συλλέκτη PV / T είναι μεγαλύτερη από αυτή του συμβατικού ηλιακού συστήματος.

Οι Dupeyrat et al. [2.31] διεξήγαγαν μια πειραματική μελέτη για τη βελτίωση των θερμικών ιδιοτήτων των συλλεκτών PV/T. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν συνολική απόδοση του συλλέκτη PV/T πάνω από 87% (ως 79% θερμική απόδοση και ηλεκτρική απόδοση ως 8.7%).

Οι Touafek et al. [2.32] διεξήγαγαν μια πειραματική μελέτη ενός συστήματος PVT και ενός συμβατικού PV. Παρατήρησαν μια βελτίωση της ηλεκτρικής απόδοσης του φωτοβολταϊκού συλλέκτη λόγω της παρουσίας του θερμικού συστήματος. Υποστήριξαν επίσης ότι η θερμική απόδοση του PVT θα μπορούσε να βελτιωθεί με τη προσθήκη υαλοπινάκων αλλά στην περίπτωση αυτή θα μειωνόταν η ηλεκτρική απόδοση. Επομένως, θα πρέπει να βρεθεί ένας συμβιβασμός μεταξύ των δύο αποδόσεων.

Σύμφωνα με την ανασκόπηση της αγοράς [2.33] πάνω από 30 κατασκευαστές παράγουν συλλέκτες PVT, με το μεγαλύτερο μέρος τους να παράγουν ακάλυπτους συλλέκτες PVT (χωρίς προστατευτικό γυάλινο κάλυμμα μετωπικής προστασίας, (Εικόνα 2.6.1, αριστερά). Γενικά, οι συλλέκτες PVT χωρίς κάλυμμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υποστηρίζοντας ένα σύστημα ζεστού νερού ή ένα σύστημα θέρμανσης χαμηλής θερμοκρασίας (για παράδειγμα σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας). Τα τελευταία χρόνια η χρήση συλλεκτών PVT για ψύξη χώρου, η οποία βασίζεται σε μακρά ακτινοβολούμενες απώλειες θερμότητας από την επιφάνεια συλλέκτη, οδηγώντας σε διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ αυτής της επιφάνειας και του ουρανού, είναι συνήθης. Οι συλλέκτες PVT χωρίς κάλυμμα είναι πιο κατάλληλοι για ψύξη, επειδή οι απώλειες θερμότητας είναι υψηλότερες σε σύγκριση με έναν καλυμμένο συλλέκτη PVT, ενώ οι συλλέκτες με κάλυμμα είναι σε θέση να επιτύχουν υψηλότερες

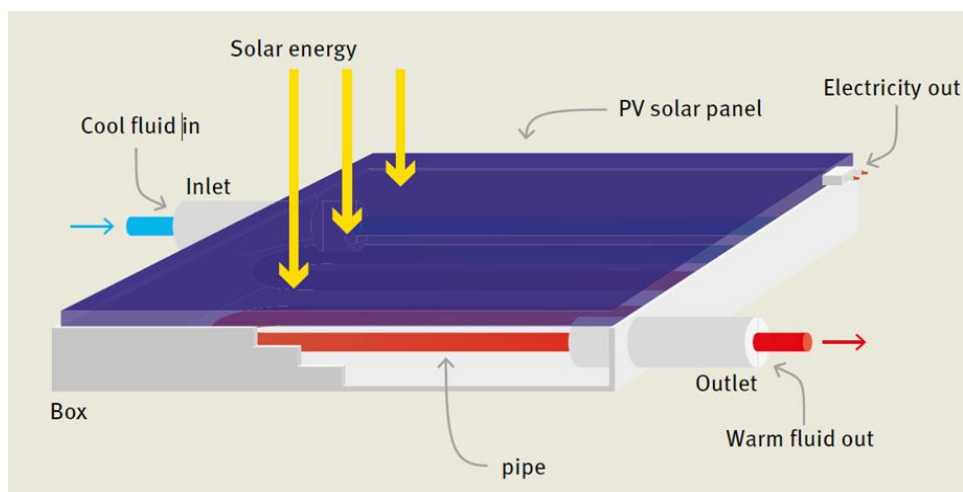
θερμοκρασίες λόγω του πρόσθετου τζαμιού και συνεπώς είναι πιο κατάλληλοι για θέρμανση (Εικόνα 2.6.1 δεξιά).



Εικόνα 2.6.1: Συλλέκτες PVT χωρίς και με κάλυμμα [2.34].

Αρχές λειτουργίας

Υβριδικά συστήματα PV-T, που συνδυάζουν τις βασικές αρχές του Φ/Β και των ηλιακών-θερμικών συλλεκτών, παράγουν τόσο ηλεκτρική ενέργεια όσο και χρήσιμη θερμική από την ίδια περιοχή ανοίγματος. Η εικόνα 2.6.2 δείχνει τη διάταξη ενός PVT.



Εικόνα 2.6.2: Διάταξη ενός θερμοφωτοβολταϊκού ή υβριδικού φωτοβολταϊκού (PVT) [2.35].

Σε σύστημα PVT, ο θερμικός απορροφητής και τα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι ενσωματωμένα σε ένα ενιαίο στοιχείο. Το ηλιακό φως, που δεν είναι μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και δε χάνεται στο περιβάλλον, μεταφέρεται στο θερμικό απορροφητή και στο ρευστό. Σαν αποτέλεσμα, τόσο η θερμότητα όσο και η ηλεκτρική ενέργεια παράγονται από το ίδιο πάνελ. Σε ένα συμβατικό φωτοβολταϊκό στοιχείο, το 90% του ηλιακού φωτός απορροφάται, αλλά μόνο περίπου το 15% αυτού μετατρέπεται σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια [2.36]. Το υπόλοιπο αποθηκεύεται μερικώς ως θερμική

ενέργεια (και γι' αυτό το λόγο τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να φτάσουν σε θερμοκρασίες μέχρι και 80°C κατά τη λειτουργία σε ζεστές ημέρες) και τελικά χάνεται στο περιβάλλον. Σε μια μονάδα PVT, ένα χρήσιμο κλάσμα της απώλειας θερμότητας μεταφέρεται αντ' αυτού σε ρεύμα υγρού στο πίσω μέρος του ηλιακού στοιχείου με αποτέλεσμα μια θερμική απόδοση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Η απόδοση των ηλιακών κυψελών πυριτίου πέφτει κατά 0.4% ανά °C σε αύξηση θερμοκρασίας από 25°C [2.37-2.38]. Αν απαιτείται θερμότητα σε χαμηλή θερμοκρασία (π.χ. για αντλίες θερμότητας ή θέρμανση πισίνας στους ~40°C) η φωτοβολταϊκή μονάδα ψύχεται από το υγρό έτσι ώστε η μονάδα η ίδια να λειτουργεί με μεγαλύτερη απόδοση, κάνοντας την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα PVT υψηλότερη από εκείνη ενός ισοδύναμου συμβατικού φωτοβολταϊκού συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι σε μια ηλιόλουστη μέρα που η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού φτάνει τους 80°C, μια φωτοβολταϊκή μονάδα με μέγιστη απόδοση 18%, στην τυπική θερμοκρασία των 25°C, θα λειτουργεί με απόδοση περίπου 14% εάν δεν υπάρχει περίπτωση ψύξης.

Όσον αφορά το βαθμό απόδοσης ενός PVT, ο Zontag [2.27] μελέτησε την απόδοση διαφορετικών τύπων θερμοφωτοβολταϊκών και έδειξε πως σε καλής ποιότητας συλλέκτες ο συνολικός βαθμός απόδοσης (θερμικός, ηλεκτρικός) μπορεί να ξεπεράσει το 70% και σε αυτούς με χαμηλότερη ποιότητα δεν πέφτει κάτω από το 60%. Επίσης κατέληξε στην εξής σχέση που δείχνει τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του φωτοβολταϊκού με το βαθμό απόδοσής του:

$$\eta_{el} = \eta_o \cdot [1 - \beta \cdot (T - T_{ref})] \quad (2.6.1)$$

όπου:

η_{el} = ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης σε κανονικές συνθήκες

η_o = ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού σε συνθήκες αναφοράς

T = θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου

T_{ref} = θερμοκρασία αναφοράς (25°C)

β = βαθμός απόδοσης κελιού (0.0045 τυπική τιμή)

Για το θερμικό βαθμό απόδοσης του συλλέκτη και τη θερμότητα που παράγει, οι σχέσεις είναι όμοιες με αυτές των απλών θερμικών ηλιακών συστημάτων που είδαμε νωρίτερα. Προφανώς ο συνολικός βαθμός απόδοσης (η_{tot}) θα είναι:

$$\eta_{tot} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad (2.6.2)$$

Η απόδοση του θερμοφωτοβολταϊκού έχει να κάνει με τον τύπο της μονάδας απαγωγής θερμότητας που χρησιμοποιείται γιατί η απόδοση στη συναλλαγή θερμικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό καθορίζει την απόδοση μετατροπής του ηλεκτρισμού και της θερμότητας.

Τέλος, παρά την έλλειψη μακροπρόθεσμων δεδομένων απόδοσης συστήματος από τα έργα έρευνας, το δυναμικό των συστημάτων PVT έχει επιβεβαιωθεί με αξιόπιστες προσομοιώσεις από υπολογιστικά εργαλεία, όπως το TRNSYS [2.39]. Έχει υπολογιστεί ότι τα συστήματα PVT μπορούν να καλύψουν περίπου το 60% της ζήτησης για θέρμανση [2.40-2.41] και περισσότερο από το 50% της μέσης ζήτησης για ψύξη [2.41] των κατοικιών στη νότια Ευρώπη. Επιπλέον, οι συλλέκτες PVT που χρησιμοποιούν θερμό αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αερισμό και θέρμανση χώρου ή για προθέρμανση του αέρα, μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε τοίχους κτηρίων και οροφές [2.42-2.43].

Τα συστήματα PVT που ενσωματώνονται σε δομικά στοιχεία έχουν τη δυνατότητα μείωσης της πρωτογενούς ενέργειας που απαιτείται για τη θέρμανση και ψύξη από συμβατικά συστήματα κατά 30% [2.44], και σε εφαρμογές προθέρμανσης όπου η θερμοκρασία του ρευστού διατηρείται χαμηλή, όπως σε συνδυασμένα συστήματα PVT /αντλιών θερμότητας, η ηλεκτρική απόδοση μπορεί να αυξηθεί κατά 4-10% σε σύγκριση με ένα ισοδύναμο μη ψυχόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα [2.45].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[2.1] Κ.Α. Αντωνόπουλος, *Θερμικά-Ηλιακά συστήματα*, Αθήνα, 2004.

[2.2] <http://www.solargis.com> < accessed 2018>.

[2.3] Ε.Α. Μπέλλος, *Διδακτορική διατριβή: Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτίρια*, Αθήνα, Οκτώβριος 2016.

[2.4] Κ. Μόσχος, Διπλωματική εργασία: Προσομοίωση υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από ηλιακά συστήματα για θέρμανση κτιρίου, Αθήνα, Φεβρουάριος 2016.

[2.5] <https://www.eurostar-solar.com>. < accessed 2018>.

[2.6] K.M. Pandey, R. Chaurasiya, A review on analysis and development of solar flat plate collector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;67:641-650.

[2.7] E. Bellos, C. Tzivanidis, Performance analysis and optimization of an absorption chiller driven by nanofluid based solar flat plate collector, *Journal of Cleaner Production* 2018;174:256-272.

[2.8] A. Mahesh, Solar collectors and adsorption materials aspects of cooling system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;73:1300-1312.

[2.9] M. Nájera-Trejo, I.R. Martín-Domínguez, J.A. Escobedo-Bretado, Economic feasibility of flat plate vs evacuated tube solar collectors in a combisystem, SHC 2015, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, *Energy Procedia* 2016;91:477 – 485.

[2.10] T. Beikircher, P. Osgyan, M. Reuss, G. Streib, Flat plate collector for process heat with full surface aluminium absorber, vacuum super insulation and front foil, SHC 2013 International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Freiburg, Germany, *Energy Procedia* 2014;48:9 –17.

[2.11] D.G. Gunjo, P. Mahanta, P.S. Robi, CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition, *Renewable Energy* 2017;160:24-36.

[2.12] A. Álvarez, J. Tarrío-Saavedra, S. Zaragoza, J. López-Beceiro, R. Artiaga, S. Naya, B. Álvarez, Numerical and experimental study of a corrugated thermal collector, *Case Studies in Thermal Engineering* 2016;8:41–50.

[2.13] B. Ramlow, B. Nusz, *Solar Water Heating--Revised & Expanded Edition: A Comprehensive Guide to Solar Water and Space Heating Systems (Mother Earth News Wiser Living Series) Paperback* – July 1, 2010.

- [2.14] K. Chopra, V.V. Tyagi, A.K. Pandey, A. Sari, Global advancement on experimental and thermal analysis of evacuated tube collector with and without heat pipe systems and possible applications, *Applied Energy* 2018; 228: 351-389.
- [2.15] A. Andemeskel, T. Suriwong, W. Wamae, Effects of Aluminum Fin Thickness Coated with a Solar Paint on the Thermal Performance of Evacuated Tube Collector, 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies, Thailand, *Energy Procedia* 2017;138: 429–434.
- [2.16] C. Laughton, *Solar Domestic Water Heating: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*, Earthscan expert series 2010.
- [2.17] Zafrullah, Jagoo, *Tracking Solar Concentrators: A Low Budget Solution (SpringerBriefs in Energy)*, Springer 2013.
- [2.18] K. Chahine, R. Murr, M. Ramadan, H. El Hage, M. Khaled, Use of parabolic troughs in HVAC applications – Design calculations and analysis, *Case Studies in Thermal Engineering* 2018;12:285-291.
- [2.19] S. Marrakchi, Z. Leemrani, H. Asselman, A. Aoukili, A. Asselman, Temperature distribution analysis of parabolic trough solar collector using CFD, *Procedia Manufacturing* 2018;22:773-779.
- [2.20] H. Tyagi, A.K. Agarwal, P.R. Chakraborty, S. Powar, *Applications of Solar Energy (Energy, Environment, and Sustainability)*, Springer 2018.
- [2.21] <http://www.skyfuel.com> <accessed 2018>.
- [2.22] G.N. Tiwari, A. Tiwari, Shyam, *Handbook of Solar Energy Theory, Analysis and Applications (Energy Systems in Electrical Engineering)*, Springer 2016.
- [2.23] K. Mertens, *Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice*, Wiley:1 edition 2013.
- [2.24] X. Αρ. Νικολόπουλος, Διπλωματική εργασία, Εφαρμογή υβριδικού AC/DC Μικροδικτύου για την ενσωμάτωση Οικιακών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε Ευφυή Δίκτυα, Αθήνα 2015.

- [2.25] A. Smets, K. Jäger, O. Isabella, R.V. Swaaij, M. Zeman, *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*, UIT Cambridge 2016.
- [2.26] M. Wolf, Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences, *Energy Conversion and Management* 1976;16: 79–90.
- [2.27] H.A. Zondag, D.W. De Vries, W.G.J. Van Helden, R.J.C. Van Zolingen, A.A. Van Steenhoven, The yield of different combined PV-thermal collector designs, *Solar Energy* 2003;74:253–69.
- [2.28] H.A. Zondag, Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:891-959.
- [2.29] T.T. Chow, Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model, *Solar Energy* 2003;75:143–52.86.
- [2.30] S. Bhattarai, J. Ohb, S.H. Euh, G.K. Kaflea, G.H. Kima, Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2012;103:184–93.
- [2.31] P. Dupeyrat, C. Ménézo, H. Wirth, M. Rommel, Improvement of PV module optical properties for PV-thermal hybrid collector application, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2011;95:2028–36.
- [2.32] K. Touafek, M. Haddadi, A. Malek, Experimental study on a new hybrid photovoltaic thermal collector, *Appl. Solar Energy* 2009;45:181–6.
- [2.33] M. Adam, Final report on “Verbundprojekt: Standardisierung und Normung von multifunktionalen PVT Solarkollektoren (PVT-Norm)”, Teilvorhaben: PVT-Systemanwendungen und Simulationen; 2014.
- [2.34] J. Cremers , I. Mitina , N. Palla , F. Klotz , X. Jobard , U. Eicker , Experimental Analyses of Different PVT Collector Designs for Heating and Cooling Applications in Buildings. 6th International Building Physics Conference, IBPC, *Energy Procedia* 2015;78:1889 – 1894.

- [2.35] [www.imperial.ac.uk/grantham-institute/Solar-Thermal and Hybrid Photovoltaic-Thermal Systems for Renewable Heating](http://www.imperial.ac.uk/grantham-institute/Solar-Thermal%20and%20Hybrid%20Photovoltaic-Thermal%20Systems%20for%20Renewable%20Heating).<accessed 2018>.
- [2.36] P. Dupeyrat, C. Ménézo, S. Fortuin, Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system, *Energy and Buildings* 2014;68:751-755.
- [2.37] J. L. Gray, *The Physics of the Solar Cell*, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons 2011.
- [2.38] M.A. Green, *Silicon solar cells: advanced principles & practice*, Centre for photovoltaic devices and systems, University of New South Wales 1995.
- [2.39] TRNSYS, <http://www.trnsys.com/> ,<accessed 2017>.
- [2.40] A. Ramos, M. A. Chatzopoulou, I. Guarracino, J. Freeman, C. N. Markides, Hybrid photovoltaic-thermal solar systems for combined heating/cooling and power provision in the urban environment, *Energy Conversion and Management* 2017;150:838-850.
- [2.41] N. Aste, C. Del Pero, F. Leonforte, Optimization of Solar-Thermal Fraction in PVT Systems, *Energy Procedia* 2012;30:8-18.
- [2.42] T.T. Chow, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy* 2010;87:365-379.
- [2.43] H.A. Zondag, Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:891-959.
- [2.44] T. Yang, A.K. Athienitis, A study of design options for a building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system with glazed air collector and multiple inlets, *Solar Energy* 2014;104:82-92.
- [2.45] E. Bertram, J. Glembin, G. Rockendorf, Unglazed PVT collectors as additional heat source in heat pump systems with borehole heat exchanger, *Energy Procedia* 2012;30:414-423.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

Τα ηλιακά συστήματα αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση, το δροσισμό ή την παραγωγή θερμού νερού χρήσης στα κτήρια. Η ενσωμάτωση των ηλιακών συστημάτων στα κτήρια του αστικού περιβάλλοντος δεν είναι πάντοτε εύκολη, γιατί συχνά παρουσιάζονται τα παρακάτω προβλήματα:

- Κακός προσανατολισμός κτηρίου
- Πυκνότητα δόμησης
- Σκιασμός ηλιακών συλλεκτών από γειτονικά κτήρια
- Έλλειψη χώρου για την εγκατάστασή τους στα κτήρια

Παρόλα αυτά η χρήση επίπεδων ηλιακών συλλεκτών για κάλυψη του απαιτούμενου ζεστού νερού χρήσης είναι κάτι που είναι πολύ διαδεδομένο στην Ελλάδα. Επιπλέον, με τα φωτοβολταϊκά παράγεται ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του εκάστοτε κτηρίου.

Γενικότερα, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση και για ψύξη των κτηρίων. Για θέρμανση τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας, συλλέκτες αέρα καθώς και συστήματα με εναλλάκτες θερμότητας (π.χ. Fan coil) παράγουν την απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης ή μέρος αυτής από την ηλιακή ενέργεια. Για ψύξη χρησιμοποιούνται μηχανές απορρόφησης ή προσρόφησης που οδηγούνται από την ηλιακή ενέργεια αλλά χρησιμοποιείται επίσης και ο ενδοδαπέδιος δροσισμός.

3.1 Ηλιακά συστήματα για θέρμανση στα κτήρια

Το φορτίο θέρμανσης των κτηρίων μπορεί να καλυφθεί με την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Οι επίπεδοι συλλέκτες (FPC) είναι ιδανικοί στις εφαρμογές θέρμανσης. Ηλιακά Συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη θέρμανση κτηρίων είναι τα εξής:

- Σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ηλιακά
- Σύστημα με Fan Coils και ηλιακά
- Σύστημα υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από ηλιακά
- Σύστημα υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από ηλιακά και τερματικά σώματα

3.1.1 Ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης

Η ενδοδαπέδια θέρμανση (εικόνα 3.1.1) είναι μια λύση που επιλέγεται όλο και περισσότερο την τελευταία δεκαετία, ως μια πρωτοπόρα επιλογή που λύνει οικολογικά και αποτελεσματικά το πρόβλημα της θέρμανσης του σπιτιού, με χαμηλό κόστος συντήρησης. Ωστόσο λίγοι πιθανόν γνωρίζουν πως η ενδοδαπέδια θέρμανση είχε πρωτοεμφανιστεί από τα αρχαία χρόνια και είχε βρεθεί κυρίως σε ρωμαϊκά κτήρια. Τότε έκαigan ξύλα και μέσω υπόγειων καναλιών μετέφεραν το θερμό αέρα κάτω από το δάπεδο.

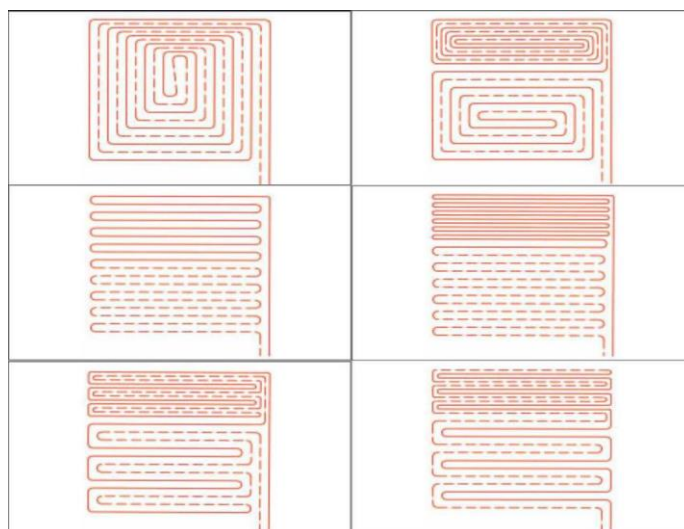


Εικόνα 3.1.1: Ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης [3.1].

Η λειτουργία και εγκατάσταση της ενδοδαπέδιας θέρμανσης δεν είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και κατά βάση στηρίζεται στην επίστρωση σωληνώσεων στο δάπεδο και την επικάλυψη τους με θερμομετόν. Αναλυτικότερα, ειδικά διαμορφωμένες θερμομονωτικές και ηχομονωτικές πλάκες τοποθετούνται πάνω στο μπετόν του δαπέδου, σε όλη του την επιφάνεια. Ένας συνεχόμενος σωλήνας δικτυωμένου πολυαιθυλενίου υψηλής αντοχής τοποθετείται στέρα σε όλη την επιφάνεια των πλακών. Το σύστημα πλακών/σωλήνα καλύπτεται με ειδικό θερμομετόν. Πάνω στο θερμομετόν τοποθετείται το δάπεδο όπως ξύλο, πλακάκια, μάρμαρο, γρανίτης, κ.ά. Από τους σωλήνες αυτούς διαπερνά θερμό νερό, θερμοκρασίας 30-45°C, που ζεσταίνει το δάπεδο, με αποτέλεσμα τελικά όλο το πάτωμα να μετατρέπεται σε ένα τεράστιο θερμαντικό σώμα. Μάλιστα η έννοια ενδοδαπέδια θέρμανση δεν αναφέρεται στο πως παράγεται η θερμότητα αλλά στο πως αποδίδεται στο περιβάλλον. Γι' αυτό για την παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι διαθέσιμες όλες οι γνωστές βασικές διατάξεις

(καυστήρας, λέβητας ή κυκλοφορητής) αν και πιο αποτελεσματική λύση αποτελούν οι αντλίες θερμότητας, ενώ ως καύσιμο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί πετρέλαιο, φυσικό αέριο, υγραέριο, ξύλο, pellet ή οποιοδήποτε άλλο υλικό καύσης.

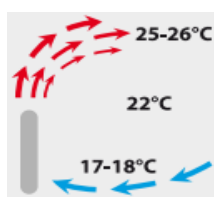
Το ενδοδαπέδιο σύστημα μπορεί να έχει πιο πυκνά και πιο αραιά σημεία, ανάλογα με τις τοπικές ανάγκες του χώρου. Όταν η απόσταση των σωλήνων αυξάνει, τότε μεγαλύτερη θερμοκρασία νερού απαιτείται για να αποδοθεί το ζητούμενο φορτίο και αντίστροφα. Η εικόνα 3.1.2 δείχνει διάφορους σχεδιασμούς του συστήματος της σωλήνωσης που συναντώνται.



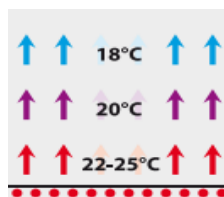
Εικόνα 3.1.2: Τρόποι σωλήνωσης ενδοδαπέδιας θέρμανσης (Με συνεχή γραμμή το θερμό κομμάτι και με διακεκομμένη η πιο κρύα επιστροφή) [3.2-3.3].

Πλεονεκτήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης

Η ενδοδαπέδια θέρμανση έχει αρκετά πλεονεκτήματα, με κυριότερο την αίσθηση θαλπωρής και άνεσης που προσφέρει. Αυτό συμβαίνει γιατί απλούστατα η θερμοκρασία στο χώρο κατανέμεται εντελώς διαφορετικά από ότι με τις περισσότερες λύσεις θέρμανσης. Πρώτα από όλα η θερμοκρασία είναι υψηλότερη χαμηλά και μειώνεται στα ψηλότερα στρώματα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3.1.3: Πως θερμαίνει η συμβατική θέρμανση [3.4].



Εικόνα 3.1.4: Πως θερμαίνει η ενδοδαπέδια θέρμανση [3.4].

Έτσι δεν υπάρχουν τα θερμά ρεύματα που δημιουργούν τα συμβατικά θερμαντικά σώματα, την αποπνικτική ατμόσφαιρα και το αίσθημα θερμικού κορεσμού. Άλλωστε με την ενδοδαπέδια θέρμανση η θερμοκρασία κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το εύρος του δαπέδου και γενικότερα του κτηρίου, χαρίζοντας μια αίσθηση φυσικής ζεστασιάς. Η μεγάλη διαφορά της ενδοδαπέδιας θέρμανσης είναι πως τελικά το ζεστό νερό που διαπερνά τις σωληνώσεις εκπέμπει αργά αλλά σταθερά και ομοιόμορφα τη ζέστη σε όλη την επιφάνεια. Έτσι όλο το δάπεδο γίνεται ένα γιγάντιο θερμαντικό σώμα, ενώ εξαιτίας του θερμομπετού που επιστρώνεται από πάνω και κυρίως του θερμομονωτικού υλικού διογκωμένης πολυστερίνης που τοποθετείται από κάτω, αποφεύγονται οι απώλειες ενέργειας. Αυτό προσφέρει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι ο χώρος μένει στην επιθυμητή θερμοκρασία για αρκετή ώρα ακόμα και όταν σβηστεί ο μηχανισμός, χωρίς να υπάρχει χρέωση. Μάλιστα για ακόμα μεγαλύτερη μείωση των απωλειών από τους εξωτερικούς τοίχους, συχνά επιλέγεται περιμετρικά η πυκνότερη διάστρωση σωλήνων, ώστε να δημιουργούν ένα είδος φράγματος στο ψύχος, ενώ αντιστρόφως στο κέντρο εφαρμόζονται πιο αραιά. Επιπλέον με την ενδοδαπέδια θέρμανση η υγρασία του χώρου διατηρείται σε κανονικά και σταθερά επίπεδα και δεν υπάρχει μεταφορά σκόνης από τα ρεύματα αέρα. Οι συνθήκες διαμονής είναι ιδανικές για πάσχοντες από άσθμα ή αλλεργίες. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει και με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή ενέργεια) και με νέες τεχνολογίες (αντλίες θερμότητας) με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας έως και 60%. Ακόμα, η ενδοδαπέδια θέρμανση έχει ακριβότερο κόστος κατασκευής, που όμως καλύπτεται γρήγορα από το χαμηλό κόστος λειτουργίας. Επιπροσθέτως, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να είναι χρήσιμο και το καλοκαίρι, καθώς διοχετεύοντας κρύο νερό μετατρέπεται σε ενδοδαπέδια ψύξη, αποφεύγοντας τα ενεργοβόρα και κυρίως ανθυγιεινά κλιματιστικά. Από την άλλη υπάρχει και η επιλογή της ηλεκτρικής ενδοδαπέδιας θέρμανσης, όπου πλέον στο δάπεδο στρώνονται ηλεκτρικές αντιστάσεις (καλωδιώσεις) από τις οποίες διαπερνά ηλεκτρική ενέργεια, όμως είναι αρκετά πιο σπάνια, ενώ δεν προσφέρει ψύξη

παρά μόνο θέρμανση. Τέλος, με την ενδοδαπέδια θέρμανση όλοι οι χώροι είναι ελεύθεροι και η αρχιτεκτονική διαμόρφωση γίνεται μια εύκολη διαδικασία.

Μειονεκτήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης

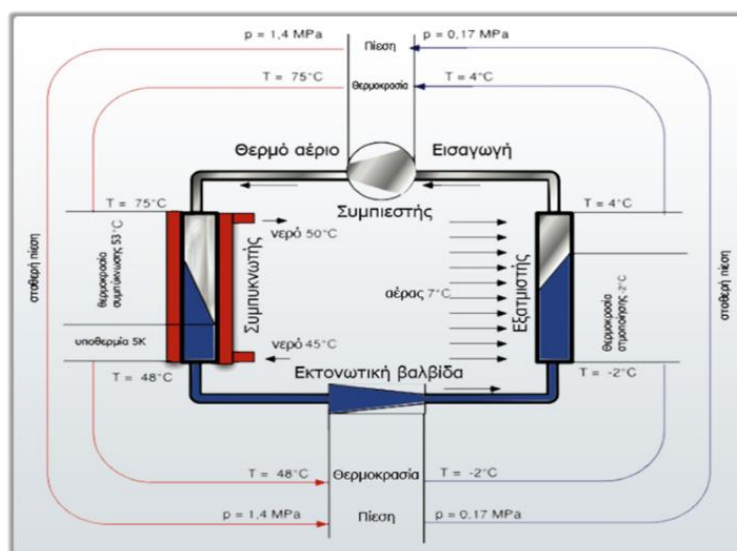
Όπως όλα τα συστήματα θέρμανσης, συμβατικά ή «εναλλακτικά», και η ενδοδαπέδια θέρμανση έχει τα αδύνατα σημεία της, με κυριότερο ίσως μειονέκτημα το γεγονός ότι είναι ένα σύστημα μεγάλης αδράνειας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι απαιτείται κάποιος χρόνος προκειμένου να αντιληφθεί τις διάφορες εντολές που του δίνουμε (on-off, μεταβολές θερμοκρασίας). Έτσι, από τη στιγμή που θέτουμε σε λειτουργία το σύστημα, είναι απαραίτητο να περάσει κάποια ώρα μέχρι να θερμανθεί ο χώρος. Προορίζεται συνεπώς για εφαρμογές θέρμανσης με αρκετές ώρες λειτουργίας ημερησίως προκειμένου να είναι αποδοτικό (τόσο όσον αφορά τη θέρμανση που μας προσφέρει όσο και για να αξιοποιηθεί το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους λειτουργίας). Έτσι, εάν κάποιος έχει απαιτήσεις θέρμανσης οι οποίες είναι λιγότερες από 5-6 ώρες ημερησίως, ενδεχομένως η ενδοδαπέδια θέρμανση να μην είναι το κατάλληλο σύστημα καθώς για να αποδώσει θα πρέπει να λειτουργεί περισσότερες ώρες απ' ό,τι πραγματικά χρειάζεται. Για το λόγο αυτό δεν είναι κατάλληλη και για εξοχικές κατοικίες. Στα «πλην» είναι και το γεγονός ότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι σαφώς μεγαλύτερο από εκείνο των καλοριφέρ, κάτι το οποίο αποτελεί μειονέκτημα για κάποιον ο οποίος δεν ενδιαφέρεται για τη μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση ή δε διαθέτει το απαιτούμενο κεφάλαιο.

Τέλος, παρόλο που για κάποιους ενδεχομένως να μην αποτελεί αρνητικό στοιχείο, στην ενδοδαπέδια θέρμανση δεν επιτρέπεται η χρήση χαλιών, μοκετών κλπ. στο δάπεδο καθώς, όπως είναι λογικό, θα καίμε καύσιμο χωρίς να έχουμε την απαιτούμενη θέρμανση. Πάντως, σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί σε κάποια συγκεκριμένα δωμάτια να τοποθετήσει κάποιο χαλί, υπάρχει η δυνατότητα, να τοποθετηθούν στα συγκεκριμένα σημεία πυκνότερες σωληνώσεις.

3.1.2 Αντλίες θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας είναι μηχανήματα τα οποία «αντλούν» θερμότητα (με τη μορφή ψύξης ή θέρμανσης) από μια δεξαμενή θερμότητας (αέρας περιβάλλοντος, δεξαμενή νερού, υπόγεια νερά, λίμνη κλπ) προς ένα χώρο, μέσω ενός κύκλου εξάτμισης και συμπύκνωσης ενός εργαζόμενου μέσου, με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο

κύκλος λειτουργίας των αντλιών θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη κατοικιών αλλά και επαγγελματικών χώρων επειδή είναι πλήρως αναστρέψιμος. Η εγκατάσταση αντλίας θερμότητας είναι οικονομική όταν υπάρχουν ευνοϊκά τιμολόγια ρεύματος, υψηλό κόστος καυσίμου για λέβητες-καυστήρες, υψηλός ετήσιος αριθμός ωρών λειτουργίας, ανάγκη θέρμανσης το χειμώνα και ψύξης το καλοκαίρι [3.5].



Εικόνα 3.1.5: Τυπική μορφή αντλίας θερμότητας [3.6].

Τρόπος λειτουργίας

Η αρχή λειτουργία της αντλίας θερμότητας εφαρμόζεται ως επί το πλείστον σε ψυγεία, καταψύκτες και συσκευές κεντρικού κλιματισμού κτηρίων (για ψύξη και θέρμανση) και ζεστού νερού χρήσης. Η λειτουργία της βασίζεται στη λειτουργία της μηχανής Carnot, που λειτουργεί όμως κατά τη φορά του ψυκτικού κύκλου. Η ποιότητα της αντλίας χαρακτηρίζεται από το συντελεστή συμπεριφοράς COP (Coefficient of Performance).

Τέσσερις λειτουργικές μονάδες συνεργάζονται ώστε η θερμότητα που αντλείται από το περιβάλλον να φτάσει σε υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας: 1) Ο εξαμιστής/ατμοποιητής, 2) ο συμπίεστης, 3) ο συμπυκνωτής και 4) η εκτονωτική βαλβίδα.

Ένας ανεμιστήρας ωθεί τον εξωτερικό αέρα στην αντλία θερμότητας όπου συναντά τον εξαμιστή. Αυτός είναι συνδεδεμένος σε ένα κλειστό σύστημα που περιέχει ένα ψυκτικό μέσο που μπορεί να μετατραπεί σε αέριο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Όταν ο εξωτερικός αέρας συναντάται με τον εξαμιστή το ψυκτικό μέσο μετατρέπεται σε αέριο.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας ένα συμπιεστή, το αέριο φτάνει σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία στην οποία μπορεί να μεταφερθεί στο συμπυκνωτή του συστήματος θέρμανσης του σπιτιού. Ταυτόχρονα, το ψυκτικό μέσο με τη βοήθεια του συμπυκνωτή επανέρχεται στην υγρή μορφή, έτοιμο να μετατραπεί σε αέριο για άλλη μια φορά και να συλλέξει νέα θερμότητα. Ηλεκτρική ενέργεια δαπανάται για την κίνηση του συμπιεστή και αυτή είναι η κύρια κατανάλωση της μηχανής αυτής.

Μια αντλία θερμότητας εκτελεί πάντα ψυκτικό κύκλο και ποτέ θερμικό γιατί τέτοιος κύκλος δεν υφίσταται. Συχνά στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η αντλία θερμότητας “αντιστρέφει” τον κύκλο του ψυκτικού ρευστού και ανάλογα με την περίπτωση ακολουθεί ψυκτικό κύκλο το καλοκαίρι ή “θερμαντικό” το χειμώνα. Το μόνο που αντιστρέφεται είναι ο ρόλος του συμπυκνωτή με το ρόλο του ατμοποιητή. Το καλοκαίρι ο ατμοποιητής είναι τοποθετημένος μέσα στον ψυχρόμενο χώρο και τον ψύχει, αφού αντλεί θερμότητα από αυτόν. Αντί λοιπόν να μεταφέρονται οι συσκευές του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή από το χώρο στο περιβάλλον, με τη χρήση τετράοδης βαλβίδας αντιστρέφεται η ροή του ψυκτικού μέσου διατηρώντας φυσικά το ψυκτικό κύκλο, στον οποίο συνεχίζεται κανονικά η προσφορά μηχανικού έργου, για τη συμπίεση των ατμών του ψυκτικού μέσου [3.7].

Όταν η αντλία θερμότητας λειτουργεί για θέρμανση, τότε θερμότητα Q_{in} αντλείται από ένα ψυχρό σχετικά θερμοδοχείο και με τη βοήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας P_{el} διαβιβάζεται η νέα θερμότητα Q_{heat} σε ένα θερμοδοχείο υψηλότερης θερμοκρασίας.

Η επόμενη εξίσωση δίνει τον ορισμό του COP για θέρμανση για αντλία θερμότητας με μηχανική συμπίεση [3.2]:

$$COP = \frac{Q_{heat}}{P_{el}} \quad (3.1.1)$$

Ο ορισμός του COP για θέρμανση για αντλία θερμότητας με θερμική συμπίεση [3.2]:

$$COP = \frac{Q_{heat}}{Q_{in}} \quad (3.1.2)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις για ψύξη γράφονται ως εξής:

$$COP = \frac{Q_{cool}}{P_{el}} \quad (3.1.3)$$

$$COP = \frac{Q_{cool}}{Q_{in}} \quad (3.1.4)$$

Η μέγιστη τιμή για το συντελεστή συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας δίνεται από τον αντίστοιχο του κύκλου Carnot [3.2]:

$$COP_{carnot,heating} = \frac{T_{hot}}{T_{hot}-T_{cold}} \quad (3.1.5)$$

$$COP_{carnot,cooling} = \frac{T_{cold}}{T_{hot}-T_{cold}} \quad (3.1.6)$$

Οι θερμοκρασίες είναι σε μονάδες Kelvin και η T_{hot} αφορά τη θερμοκρασία του συμπυκνωτή, ενώ η T_{cold} τη θερμοκρασία του ατμοποιητή. Συνήθως ο πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς είναι κοντά στο 50% του αντίστοιχου Carnot, κάτι που διαφέρει ανάλογα το σχεδιασμό και τη μηχανή. Αναλυτικότερα, τη μελέτη του κύκλου για ψύξη την ξεκινάμε από την στιγμή που το ψυκτικό υγρό εισέρχεται στον ατμοποιητή. Η είσοδος του ψυκτικού ρευστού στον ατμοποιητή ελέγχεται από την άεργη εκτονωτική-στραγγαλιστική διάταξη (βαλβίδα). Η διάταξη αυτή ελαττώνει την πίεση του υγρού, το οποίο ατμοποιείται σε χαμηλή θερμοκρασία. Κατά την ατμοποίηση, ποσά θερμότητας προσδίδονται σε αέριο, το οποίο αποκτά υψηλή πίεση και θερμοκρασία στο συμπιεστή. Το συμπιεσμένο αέριο φθάνει στο συμπυκνωτή και προσδίδει ποσά θερμότητας στο μέσο συμπύκνωσης (αέρας ή νερό). Το συμπυκνωμένο αέριο, στη συνέχεια, υγροποιείται και οδηγείται στην εκτονωτική διάταξη. Ο κύκλος για θέρμανση χώρου περιλαμβάνει τα ίδια στάδια με τον κύκλο ψύξης μόνο που σε αυτή την περίπτωση το στοιχείο που εκτελούσε την ατμοποίηση εδώ εκτελεί την συμπύκνωση και το αντίστροφο. Η μετατροπή του ψυκτικού κύκλου σε κύκλο θέρμανσης γίνεται με τη βοήθεια της τετράοδης βαλβίδας, που οδηγεί το ψυκτικό υγρό μετά την έξοδό του από τον συμπιεστή και την εκτονωτική διάταξη στους εναλλάκτες θερμότητας ψυκτικού μέσου, ανάλογα με την επιλογή των απαιτήσεων μέσω διακόπτη.

Κατηγορίες αντλιών θερμότητας [3.8-3.9]

Υπάρχουν διάφορα είδη αντλιών θερμότητας αλλά η αρχή λειτουργίας τους είναι ίδια. Ανάλογα όμως με την επιλογή της πηγής "άντλησης" ενέργειας και το μέσο απόδοσης της ενέργειας διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Αντλίες θερμότητας αέρα-νερού:** εκμεταλλεύονται για την άντληση ενέργειας τον αέρα του περιβάλλοντος. Το θερμικό μέσο απόδοσης ενέργειας είναι συνήθως το νερό που μπορεί να κυκλοφορεί στο δίκτυο θέρμανσης (ενδοδαπέδια, σώματα ακτινοβολίας, fan coils) ή σε κάποιο εναλλάκτη από

θερμοδοχείο με ενσωματωμένη αντλία θερμότητας (ζεστού νερού χρήσης). Είναι ιδανικές για κάθε είδους κατοικία και λειτουργούν τόσο σε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες όσο και σε θερμοκρασίες μέχρι -20°C .

- **Αντλίες θερμότητας αέρα– αέρα:** είναι οι πιο συνηθισμένες στις σύγχρονες εγκαταστάσεις, έχουν ως πηγή άντλησης ενέργειας αλλά και ως μέσο απόδοσης της ενέργειας τον αέρα. Στην πρώτη περίπτωση τον εξωτερικό αέρα και στη δεύτερη τον εσωτερικό ή και ένα μέρος εξωτερικού για ταυτόχρονο εξαερισμό του χώρου.
- **Αντλίες θερμότητας νερού – νερού (γεωθερμική αντλία):** στην κατηγορία αυτή η πηγή άντλησης της ενέργειας προέρχεται από το έδαφος με οριζόντιους ή κάθετους εναλλάκτες οι οποίοι μεταφέρουν την θερμική ενέργεια του υπεδάφους στην αντλία. Το θερμικό μέσο απόδοσης της ενέργειας είναι και εδώ το νερό όπως και παραπάνω.

Ανάλογα με την εφαρμογή επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος αντλίας θερμότητας (αέρος, νερού, εδάφους) έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία και ταυτόχρονα η απόδοση θέρμανσης – ψύξης να είναι η υψηλότερη δυνατή με το χαμηλότερο δυνατό κόστος λειτουργίας.



Εικόνα 3.1.6: Αντλία θερμότητας αέρα για θέρμανση νερού (εμπορική χρήση) στην Κίνα.



Εικόνα 3.1.7: Αντλία θερμότητας αέρα για θέρμανση νερού (οικιακή χρήση) στην Κίνα.

Πλεονεκτήματα Αντλιών Θερμότητας

- **Προστασία του περιβάλλοντος.** Η Αντλία Θερμότητας είναι η καθαρότερη μορφή ενέργειας με τη μικρότερη δυνατή επιβάρυνση στο περιβάλλον μας στην εποχή μας.
- **Εξοικονόμηση ενέργειας.** Οι Αντλίες Θερμότητας, έχουν την δυνατότητα, να είναι έως και 6 φορές πιο αποτελεσματικές από τα παραδοσιακά συστήματα θέρμανσης. Ο μέσος ετήσιος συντελεστής απόδοσης (COP) του συστήματος στην χώρα μας, κάτω από ιδανικές κλιματολογικές συνθήκες μπορεί να είναι πάνω από το 4 για αντλίες αέρος – νερού και πάνω από 5.5 για αντλίες με γεωθερμία. Εξασφαλίζοντας υψηλό συντελεστή απόδοσης υπάρχει ελάχιστο λειτουργικό κόστος χρήσης.
- **Τόπος εγκατάστασης.** Οι Αντλίες Θερμότητας μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα εξωτερικά ή εσωτερικά του σπιτιού. Μπορούν να θερμάνουν και να δροσίσουν ιδανικά ολόκληρο το σπίτι, χωρίς την ανάγκη λεβητοστάσιου, καμινάδων, εξαερισμών και δεξαμενών καυσίμων. Η εγκατάσταση γίνεται μετά από μία σχετική μελέτη για τον εξωτερικό ή των εσωτερικό χώρο που είναι διαθέσιμος ανάλογα με την περίπτωση.
- **Κόστος συντήρησης.** Οι Αντλίες θερμότητας δε χρειάζονται κάθε χρόνο συντήρηση όπως συμβαίνει με τους λέβητες πετρελαίου, αερίου και pellet (λέβητας βιομάζας). Η λειτουργία τους έχει μηδαμινά έξοδα συντήρησης.
- **Εφαρμογές.** Οι Αντλίες Θερμότητας μπορούν να εγκατασταθούν σε νέα ή παλιά κτήρια και μπορούν να συνδεθούν με τα υπάρχοντα θερμαντικά σώματα, με ενδοδαπέδια θέρμανση καθώς και με σώματα Fan Coils. Επίσης δεν χρειάζεται η αφαίρεση του καυστήρα πετρελαίου αφού μπορούν να συνδυαστούν. Επίσης μπορούν να συνδεθούν για μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενεργείας αλλά και κόστους, με ηλιακά panels αλλά και να χρησιμοποιούν το οικιακά παραγόμενο ρεύμα από τα φωτοβολταϊκά.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το μειονέκτημα των αντλιών θερμότητας είναι το αρκετά υψηλό κόστος προμήθειας του εξοπλισμού.

3.1.3 Ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας

Η ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας ή όπως ονομάζεται στα αγγλικά Solar Assisted Heat Pump (SAHP) είναι μια μηχανή που αντιπροσωπεύει την ενσωμάτωση μιας αντλίας θερμότητας και θερμικών ηλιακών συλλεκτών σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο σύστημα. Σε αυτό το σύστημα ο ηλιακός συλλέκτης εκτελεί τη λειτουργία της πηγής θερμότητας και η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του εξαμιστή της αντλίας θερμότητας [3.10]. Ο στόχος αυτού του συστήματος είναι να πάρει υψηλό COP και στη συνέχεια να παράγει ενέργεια με πιο αποδοτικό και λιγότερο δαπανηρό τρόπο. Είναι δυνατή η χρήση οποιουδήποτε τύπου ηλιακού συλλέκτη σε συνδυασμό με την αντλία θερμότητας. Έτσι έχουμε:

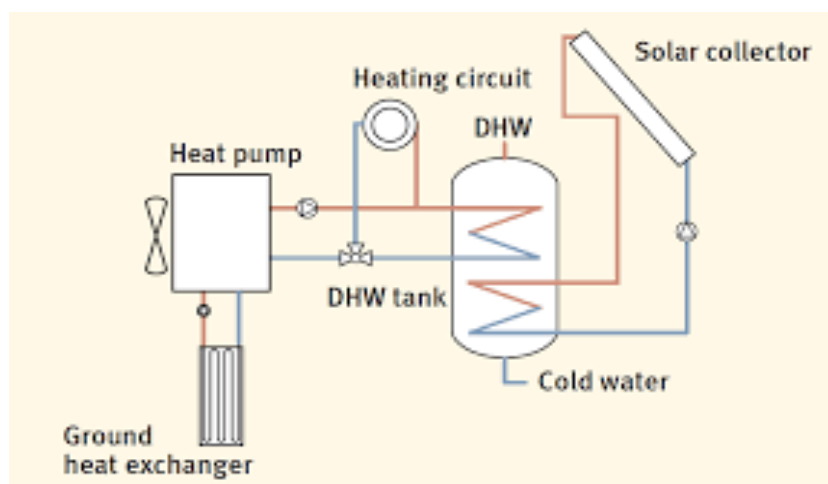
- ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας για ζέσταμα νερού
- ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας για θέρμανση χώρου

Τα κύρια μέρη που αποτελούν μια ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας, η οποία χρησιμοποιείται για θέρμανση ποσότητας νερού, είναι ο συμπιεστής, ο συμπυκνωτής, ο ηλιακός συλλέκτης που λειτουργεί ως ατμοποιητής, το ψυκτικό υγρό, η εκτονωτική διάταξη και ένας εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ του συμπυκνωτή και της δεξαμενής του νερού που θέλουμε να ζεστάνουμε.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες από διάφορους ερευνητές με θέμα το σχεδιασμό, και τη λειτουργία των ηλιακά υποβοηθούμενων αντλιών θερμότητας. Οι Jordan et al [3.11] ξεκίνησαν την έρευνα της ηλιακής αντλίας θερμότητας από τη δεκαετία του 1950. Οι Charters et al. [3.12] χρησιμοποίησαν έναν ηλιακό επίπεδο συλλέκτη ως εξαμιστή της αντλίας θερμότητας και μελέτησαν την απόδοσή του. Οι Chatuverdi et al [3.13] εξέτασαν ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας άμεσης εκτόνωσης, οι οποίες παρέχουν ζεστό νερό για οικιακή χρήση. Τα πειραματικά αποτελέσματα που βρήκε ο Chatuverdi δείχνουν ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά μειώνοντας την ταχύτητα συμπύκνωσης καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος ανεβαίνει τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι Huang et al. [3.14] μελέτησαν τα χαρακτηριστικά μιας εσωτερικού τύπου ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας. Το σύστημα αποτελούνταν από ένα ψυκτικό κύκλο Rankine και ένα βρόγχο με θερμοσίφωνο (thermosyphone loop) και το αποτέλεσμα ήταν ότι ο COP ήταν μεταξύ 2.5-3.7 ανάλογα με τη θερμοκρασία του νερού.

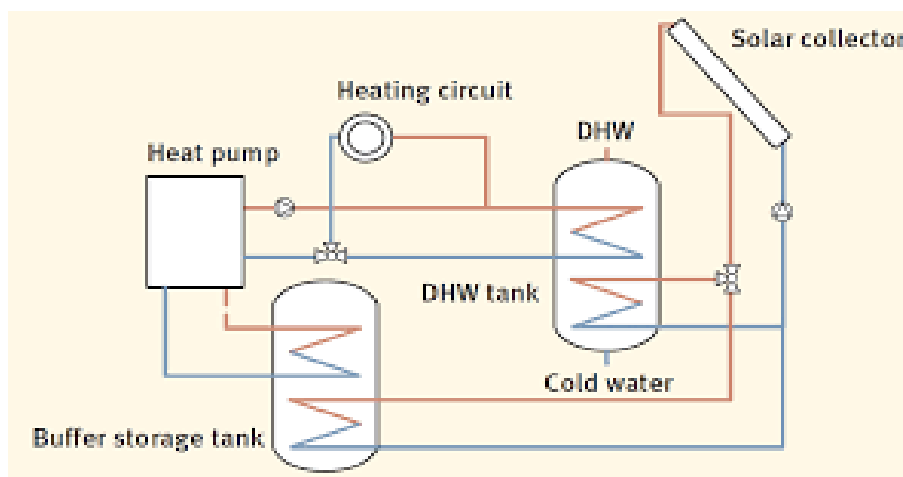
Οι Zhu et al. [3.14] ανέλυσαν την εφαρμογή της ηλιακής αντλίας θερμότητας σ' ένα κτήριο και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σε ψυχρή περιοχή ήταν καλή και το περιβαλλοντικό όφελος ήταν προφανές.

Στη συνέχεια ακολουθούν κάποια παραδείγματα συστημάτων με ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας. Η εικόνα 3.1.8 δείχνει μια διαμόρφωση συστήματος που συνδυάζει ένα ηλιακό θερμικό σύστημα με μια αντλία θερμότητας. Το ηλιακό θερμικό σύστημα φορτίζει μια δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού οικιακής χρήσης, η οποία, όποτε απαιτείται, θερμαίνεται επίσης από την αντλία θερμότητας. Σε αυτό το παράδειγμα η θέρμανση χώρου παρέχεται άμεσα και αποκλειστικά από την αντλία θερμότητας, δηλαδή χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας.



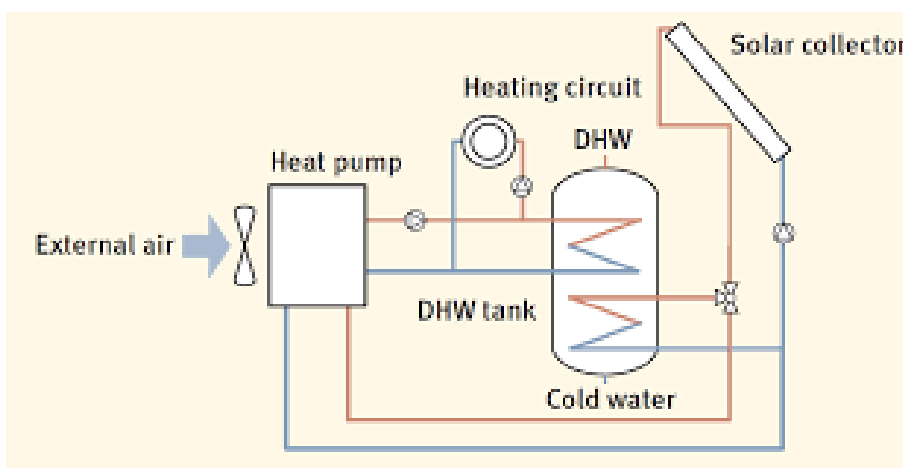
Εικόνα 3.1.8: Διάγραμμα συστήματος για σύστημα αντλίας θερμότητας με επίπεδο ηλιακό συλλέκτη που συνδέεται με το δοχείο αποθήκευσης ζεστού νερού οικιακής χρήσης [3.10].

Η εικόνα 3.1.9 δείχνει ένα σύστημα που χρησιμοποιεί αποκλειστικά ένα ηλιακό θερμικό σύστημα ως πηγή θερμότητας για την αντλία θερμότητας. Ο επίπεδος συλλέκτης δίνει προτεραιότητα στην άμεση θέρμανση της δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού οικιακής χρήσης. Εάν η παραγόμενη ηλιακή θερμική ενέργεια ξεπεράσει τις απαιτήσεις ή οι παραγόμενες θερμοκρασίες είναι πολύ χαμηλές, η ηλιακή θερμότητα τροφοδοτείται σε μια βοηθητική δεξαμενή αποθήκευσης που χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για την αντλία θερμότητας. Αυτή η δεξαμενή αποθήκευσης διασφαλίζει ότι η ηλιακή θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο στάδιο.



Εικόνα 3.1.9: Διάγραμμα συστήματος αντλίας θερμότητας με επίπεδους συλλέκτες για τη θέρμανση της δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού χρήσης και ως γενική πηγή θερμότητας για την αντλία θερμότητας [3.10].

Η εικόνα 3.1.10 απεικονίζει ένα σύστημα με μια αντλία θερμότητας αέρα και έναν επίπεδο συλλέκτη. Η ηλιακή θερμική ενέργεια θερμαίνει κυρίως μια δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού οικιακής χρήσης. Εάν η παραγόμενη θερμοκρασία δεν επαρκεί, η ηλιακή θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται απευθείας ως πρόσθετη πηγή θερμότητας για την αντλία θερμότητας κατά τη λειτουργία της. Αυτό αυξάνει τη θερμοκρασία πηγής της αντλίας θερμότητας, η οποία για τις αντλίες θερμότητας αέρα είναι πολύ χαμηλή στις κρύες ημέρες κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης.



Εικόνα 3.1.10: Διάγραμμα συστήματος αντλίας θερμότητας αέρα και ηλιακό συλλέκτη για άμεση θέρμανση οικιακού ζεστού νερού και ως δεύτερη πηγή θερμότητας [3.10].

3.2 Ηλιακά συστήματα για ψύξη στα κτήρια

Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται λόγω της εκτενούς χρήσης του κλιματισμού χώρων (Heating Ventilation & Air Conditioning, HVAC), αυξάνοντας το ηλεκτρικό φορτίο αιχμής με αποτέλεσμα να προκαλούνται σημαντικά προβλήματα στην ηλεκτροδότηση. Η "ενεργειακή έλλειψη" είναι πιο έντονη κατά τη διάρκεια των "ξηρών" ετών λόγω της ανεπάρκειας των υδροηλεκτρικών σταθμών, ώστε να καλυφθεί ποσοστό του φορτίου αιχμής. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας για τη λειτουργία συστημάτων κλιματισμού χώρων είναι ελκυστική, δεδομένου ότι το ψυκτικό φορτίο συμπίπτει γενικά με τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας και επομένως οι απαιτήσεις σε ψύξη ενός κτηρίου συμπίπτει με την υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Τα συστήματα ηλιακής ψύξης έχουν το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιούν απολύτως αβλαβή ρευστά όπως το νερό, ή διαλύματα αλάτων για τη λειτουργία τους. Είναι ενεργειακά αποδοτικά και περιβαλλοντικά φιλικά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως αυτόνομα συστήματα, είτε σε συνδυασμό με συμβατικό κλιματισμό, για να βελτιώσουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας του εσωτερικού όλων των τύπων κτηρίων. Ο κύριος στόχος είναι να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες "μηδενικών εκπομπών" με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂ [3.16].

Στα συστήματα ηλιακού κλιματισμού, η διαδικασία ψύξης τροφοδοτείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Τα συστήματα ηλιακού κλιματισμού που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα μπορούν να ταξινομηθούν σε:

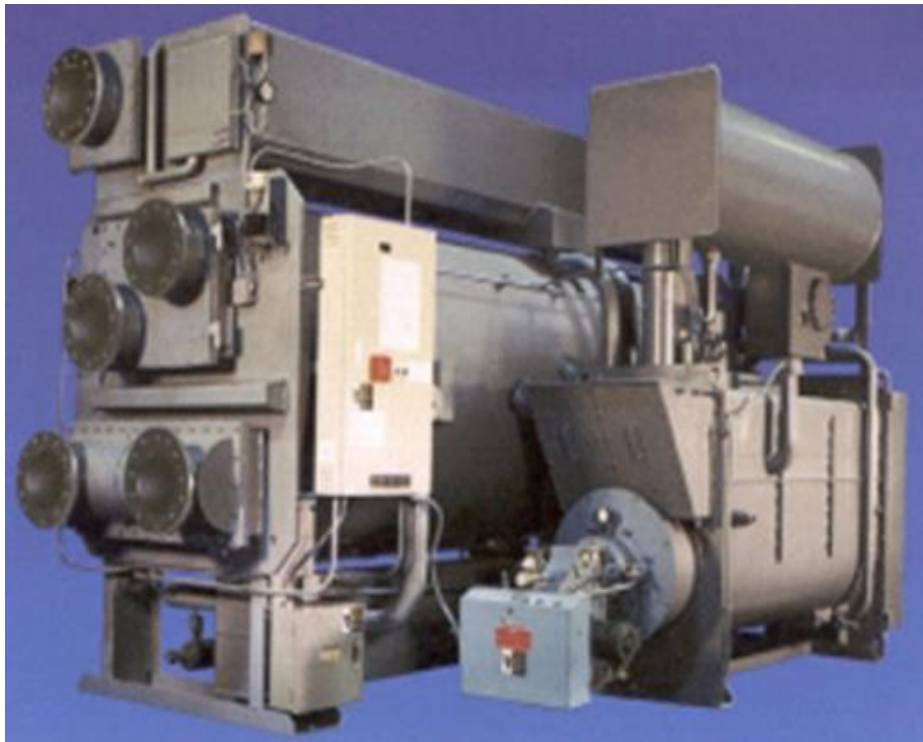
- ✓ **κλειστά συστήματα:** αυτά είναι θερμοκίνητοι ψύκτες που παρέχουν ψυχρό νερό, το οποίο είτε χρησιμοποιείται στις κεντρικές κλιματιστικές μονάδες για να παρέχει πλήρως κλιματισμένο αέρα (ψυχρό, ξηρό) είτε διανέμεται μέσω ενός δικτύου ψυχρού νερού σε καθορισμένους χώρους για να ενεργοποιήσει τις τοπικές μονάδες των δωματίων (π.χ. fan coils). Στην αγορά σήμερα υπάρχουν διαθέσιμοι οι ψύκτες απορρόφησης (πιο κοινοί) και ψύκτες προσρόφησης.
- ✓ **ανοικτά συστήματα:** που επιτρέπουν πλήρη κλιματισμό παρέχοντας ψυχρό και ξηρό αέρα σύμφωνα με τις απαιτούμενες συνθήκες άνεσης. Το ψυκτικό μέσο είναι πάντα νερό, δεδομένου ότι είναι σε άμεση επαφή με τον αέρα. Τα πιο κοινά συστήματα είναι συστήματα ψύξης ανοικτού κύκλου (desiccant-DEC), που

χρησιμοποιούν έναν περιστρεφόμενο τροχό αφύγρανσης με στερεό πορώδες ροφητικό υλικό.

Στα συστήματα ηλιακού κλιματισμού, η διαφορά στη λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών σε σχέση με τα ηλιακά συστήματα ζεστού νερού χρήσης είναι το υψηλό επίπεδο θερμοκρασίας, στο οποίο πρέπει να παρασχεθεί η χρήσιμη θερμότητα. Για τους θερμοκίνητους ψύκτες, η θερμοκρασία αναγέννησης είναι συνήθως άνω των 80°C, με ελάχιστη τιμή 60°C. Για τα συστήματα ψύξης DEC, η θερμοκρασία αναγέννησης είναι από 55°C ως και 90°C. Λόγω των υψηλών παροχών στο κύκλωμα θέρμανσης, η ιδανική στρωμάτωση στην αποθήκευση ζεστού νερού είναι δύσκολο να επιτευχθεί και έτσι η θερμοκρασία επιστροφής στον ηλιακό συλλέκτη είναι σχετικά υψηλή. Αυτό προκαλεί μερικούς περιορισμούς στην επιλογή του τύπου συλλεκτών. Συνεπώς, οι τυποποιημένοι επίπεδοι συλλέκτες και οι ηλιακοί συλλέκτες αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μέγιστο όφελος στα συστήματα DEC. Στις διατάξεις που χρησιμοποιούν ψύκτη προσρόφησης ή απορρόφησης μονής βαθμίδας, η χρήση επίπεδων συλλεκτών επιλεκτικής επιφάνειας περιορίζεται σε περιοχές με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Για τις άλλες περιοχές και για ψύκτες που απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες αναγέννησης, χρησιμοποιούνται συλλέκτες υψηλής απόδοσης, π.χ. συλλέκτες σωλήνων κενού. Από τα σταθερά συστήματα συλλεκτών, οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να επιτευχθούν με συλλέκτες σωλήνων κενού, χρησιμοποιώντας οπτική συγκέντρωση. Αυτή αποτελεί ενδιαφέρουσα επιλογή για τα συστήματα ηλιακού κλιματισμού που χρησιμοποιούν υψηλής απόδοσης ψύκτες απορρόφησης (διπλής βαθμίδας) [3.17].

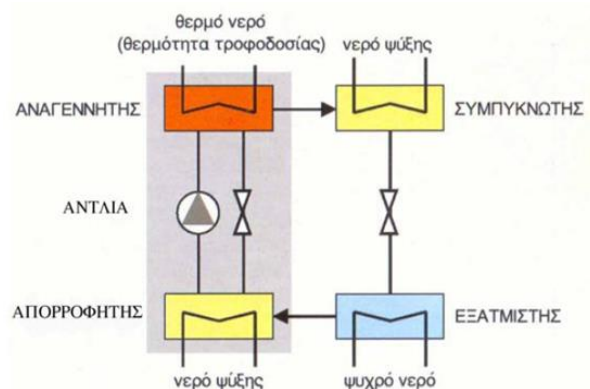
3.2.1 Ψύκτες απορρόφησης (absorption chiller)

Οι ψύκτες απορρόφησης (εικόνα 3.2.1) είναι οι πιο διαδεδομένοι ψύκτες παγκοσμίως. Η θερμική συμπίεση του ψυκτικού μέσου επιτυγχάνεται με τη χρήση υγρού διαλύματος ψυκτικού μέσου/ροφητικού υλικού και πηγή θερμότητας, αντικαθιστώντας με αυτόν τον τρόπο την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ενός μηχανικού συμπιεστή. Για ψυχρό νερό άνω των 0°C, όπως απαιτείται στον κλιματισμό, τυπικά χρησιμοποιείται ένα υγρό διάλυμα H₂O/LiBr, με το νερό ως ψυκτικό μέσο. Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν εσωτερική αντλία για το διάλυμα, καταναλώνοντας όμως μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης H₂O/LiBr, η κρυστάλλωση του διαλύματος πρέπει να αποφευχθεί με εσωτερικό έλεγχο της θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας στη μηχανή.



Εικόνα 3.2.1: Ψύκτης Απορρόφησης [3.18].

Τα κύρια σημεία ενός ψύκτη απορρόφησης παρουσιάζονται στην εικόνα 3.2.2. Η ψύξη βασίζεται στην εξάτμιση του ψυκτικού μέσου (νερό) στον εξατμιστή σε πολύ χαμηλές πιέσεις. Το ατμοποιημένο ψυκτικό μέσο απορροφάται στον απορροφητή, αραιώνοντας το διάλυμα $H_2O/LiBr$ (για να καταστεί η διαδικασία απορρόφησης αποδοτική, απαιτείται ψύξη σε αυτό το στάδιο της διεργασίας). Το διάλυμα αντλείται συνεχώς στον αναγεννητή (γεννήτρια ατμού), όπου επιτυγχάνεται η αναγέννηση του διαλύματος χρησιμοποιώντας θερμότητα (θερμότητα αναγέννησης/τροφοδοσίας) (π.χ. ζεστό νερό από ηλιακά). Το ψυκτικό μέσο στη συνέχεια, συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή και κυκλοφορεί με τη βοήθεια μιας στραγγαλιστικής/εκτονωτικής βαλβίδας πάλι στον εξατμιστή. Η ονομαστική ψυκτική ικανότητα των ψυκτών απορρόφησης είναι της τάξης αρκετών εκατοντάδων kW. Τροφοδοτούνται κυρίως μέσω κεντρικής θέρμανσης, απορριπτόμενης θερμότητας ή θερμότητας από συμπαραγωγή. Η απαιτούμενη θερμοκρασία της θερμικής πηγής είναι συνήθως πάνω από $80^{\circ}C$ για τις μηχανές μονής βαθμίδας ενώ ο COP είναι της τάξης του 0.6 έως 0.8. Μηχανές διπλής βαθμίδας, με δύο στάδια συμπίεσης, απαιτούν θερμοκρασία άνω των $140^{\circ}C$, αλλά ο COP μπορεί να επιτύχει τιμές μέχρι και 1.2 [3.18-3.19].



Εικόνα 3.2.2: Σχηματικό διάγραμμα ενός ψύκτη απορρόφησης [3.20].

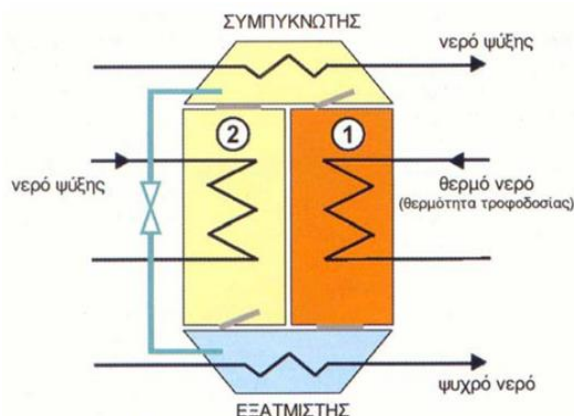
3.2.2 Ψύκτες προσρόφησης (adsorption chiller)

Στην περίπτωση των ψυκτών προσρόφησης (εικόνα 3.2.3.), αντί υγρού διαλύματος, χρησιμοποιούνται στερεά πορώδη ροφητικά υλικά. Τα διαθέσιμα στην αγορά συστήματα χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο και silica gel ως ροφητικό υλικό.



Εικόνα 3.2.3: Ψύκτης προσρόφησης [3.21].

Οι ψύκτες αποτελούνται από δύο χώρους ροφητικού υλικού (που αναφέρονται ως 1 και 2 στην εικόνα 3.2.4.), έναν εξατμιστή και ένα συμπυκνωτή. Ενώ το ροφητικό υλικό στο χώρο 1 αναγεννάται χρησιμοποιώντας ζεστό νερό από εξωτερική πηγή θερμότητας, π.χ. τον ηλιακό συλλέκτη, το προσροφητικό υλικό στο χώρο 2 (προσροφητικό υλικό) προσροφά τους υδρατμούς που εισάγονται από τον εξατμιστή. Αυτός ο χώρος πρέπει να ψυχθεί προκειμένου να επιτραπεί συνεχής προσρόφηση. Το νερό στον εξατμιστή περνά στην αέρια φάση, θερμαινόμενο από το εξωτερικό κύκλωμα νερού. Στην πραγματικότητα, εδώ παράγεται η χρήσιμη ψυκτική ισχύς. Εάν η ψυκτική ικανότητα μειωθεί σε μια ορισμένη τιμή λόγω της πλήρωσης του ροφητικού υλικού στον προσροφητή, οι θάλαμοι αντιστρέφουν τη λειτουργία τους.



Εικόνα 3.2.4: Σχηματικό διάγραμμα ενός ψυκτική προσρόφησης [3.20].

Υπό τυπικές συνθήκες λειτουργίας με θερμοκρασία αναγέννησης περίπου 80°C , τα συστήματα επιτυγχάνουν COP περίπου 0.6, αλλά είναι δυνατόν να λειτουργήσουν ακόμη και σε θερμοκρασίες αναγέννησης της τάξης των 60°C . Η ψυκτική τους ικανότητα κυμαίνεται από 50-500 kW. Η απλότητα κατασκευής των ψυκτών προσρόφησης και η αναμενόμενη μηχανική αντοχή τους είναι σημαντικά πλεονεκτήματα. Δεν υπάρχει περιορισμός στη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας, καθώς δεν υφίσταται κανένας κίνδυνος κρυστάλλωσης. Δεν υπάρχει εσωτερική αντλία διαλύματος και ως εκ τούτου η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται είναι ελάχιστη. Μειονεκτήματα αυτού του τύπου των ψυκτών είναι ο συγκριτικά μεγάλος όγκος και το βάρος τους. Επιπλέον, λόγω του μικρού αριθμού παραγόμενων μονάδων, η τιμή των ψυκτών προσρόφησης παραμένει υψηλή. Υπάρχει μεγάλη δυνατότητα, στις επόμενες γενεές των ψυκτών προσρόφησης, για βελτίωση των εναλλακτών θερμότητας στα διαμερίσματα προσροφητών και κατά συνέπεια αναμένεται αξιοσημείωτη μείωση του όγκου και του βάρους τους [3.18-3.19].

3.2.3 Ψυκτικά συστήματα ανοικτού εξατμιστικού κύκλου (desiccant-DEC)

Τα συστήματα ψύξης ανοικτού κύκλου (desiccant-DEC) χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο, σε άμεση επαφή με τον αέρα. Ο θερμοκίνητος ψυκτικός κύκλος είναι συνδυασμός εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση αέρα μέσω ξηραντικού/αφυγραντικού υλικού, δηλαδή υγροσκοπικού υλικού. Για το σκοπό αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υγρά ή στερεά υλικά. Ο όρος "ανοικτός" χρησιμοποιείται για να δείξει ότι το ψυκτικό μέσο απορρίπτεται από το σύστημα αφού παράσχει τη ψύξη και νέα ποσότητα ψυκτικού μέσου εισάγεται, μέσω ενός ανοιχτού βρόγχου. Επομένως, μόνο το

νερό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο, δεδομένου ότι υπάρχει άμεση επαφή με την ατμόσφαιρα. Η διαδεδομένη τεχνολογία που εφαρμόζεται σήμερα χρησιμοποιεί περιστρεφόμενους τροχούς αφυγραντικού υλικού, εφοδιασμένους είτε με silica gel, είτε με χλωριούχο λίθιο ως ροφητικό υλικό. Η εικόνα 3.2.5 παρουσιάζει ένα σύστημα ψύξης υγρού μέσου DEC.

Επίπεδοι θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να εφαρμοστούν ως πηγή θέρμανσης στα συστήματα ηλιακής ψύξης DEC. Το ηλιακό σύστημα μπορεί να αποτελείται από συλλέκτες υγρού και δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού, για καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Αυτή η διάταξη απαιτεί πρόσθετο εναλλάκτη θερμότητας νερού/αέρα, για να συνδεθεί το ηλιακό σύστημα με το σύστημα αέρα. Μια εναλλακτική λύση, που οδηγεί σε χαμηλότερο πάγιο κόστος, είναι η άμεση τροφοδότηση της θερμότητας αναγέννησης από ηλιακούς συλλέκτες αέρα.



Εικόνα 3.2.5: Σύστημα ψύξης υγρού μέσου DEC εγκατεστημένο στο νέο κτήριο του "Solar Building Innovation Center (SOBIC)" στο Freiburg, στην Γερμανία [3.19].

3.2.4 Ενδοδαπέδιο σύστημα δροσισμού

Απέναντι στα μειονεκτήματα των κλασικών κλιματιστικών μονάδων, με βασικότερο τα ανθυγιεινά ψυχρά ρεύματα αέρα, προτείνεται σήμερα ο ενδοδαπέδιος δροσισμός (εικόνα 3.2.6), που αποτελεί πλέον τον πιο σύγχρονο, υγιεινό και οικονομικό τρόπο κλιματισμού των χώρων. Η ενδοδαπέδια ψύξη λοιπόν αποτελεί την πλέον σύγχρονη μέθοδο ψύξης/δροσισμού ενός χώρου και είναι ιδιαίτερα οικονομική αν συνδυαστεί με προ υπάρχουσα ενδοδαπέδια θέρμανση. Αυτό που γίνεται ουσιαστικά είναι ότι διοχετεύεται πλέον κρύο νερό (αντί για ζεστό) στις σωληνώσεις της ενδοδαπέδιας, με αποτέλεσμα το κρύο νερό να δροσίζει όλο το χώρο αποτελεσματικά.



Εικόνα 3.2.6: Ενδοδαπέδιο σύστημα δροσισμού [3.1].

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός ενδοδαπέδιου συστήματος δροσισμού έγκειται στην ικανότητα που έχει το δάπεδο να απορροφά ενέργεια ομοιόμορφα από όλες τις κατευθύνσεις του χώρου. Εκμεταλλευόμενοι συνήθως το υπάρχον δίκτυο σωληνώσεων της ενδοδαπέδιας θέρμανσης, με την προσθήκη ενός μηχανισμού παραγωγής ψύξης (αντλία θερμότητας ή ψύκτης νερού (chiller)), κρύο νερό διοχετεύεται στο δάπεδο και το μετατρέπει σε μια τεράστια ψυχρή επιφάνεια. Αν για το σύστημα θέρμανσης υπάρχει αντλία θερμότητας, τότε ο ψύκτης δεν είναι απαραίτητος αφού απλά γίνεται αντιστροφή του κύκλου λειτουργίας της υφιστάμενης αντλίας.

Σε ένα χώρο, όπου όλα τα δομικά στοιχεία έχουν σταθερή θερμοκρασία 20°C – 25°C , δημιουργείται ένα ανοιξιότατο μικροκλίμα και ο ανθρώπινος οργανισμός αισθάνεται μια ευχάριστη δροσιά.

Στο σύστημα ενδοδαπέδιου δροσισμού η θερμοκρασία προσαγωγής νερού στις σωληνώσεις κυμαίνεται μεταξύ 16°C – 20°C , ενώ η θερμοκρασία του δαπέδου από 19°C – 22°C . Θερμοκρασίες δαπέδου μικρότερες από 19°C , σε συνδυασμό με αυξημένη σχετική υγρασία στο χώρο, θα δημιουργούσαν έντονα προβλήματα υγραποίησης στο δάπεδο, παράγοντας που αποτελεί και το βασικό περιορισμό στα συστήματα αυτά. Η υγραποίηση υδρατμών μπορεί να εμφανιστεί στο ψυχρό δάπεδο το καλοκαίρι, όταν η θερμοκρασία του θα είναι μικρότερη αυτής που αντιστοιχεί στο σημείο δρόσου του αέρα και έχουμε ταυτόχρονα αυξημένη σχετική υγρασία στην ατμόσφαιρα μέσα στο σπίτι. Τα τελικά ποσά της υγρασίας του αέρα επηρεάζονται από την ατμοσφαιρική εξωτερική υγρασία και την υγρασία που αποδίδει ο άνθρωπος. Για να αποφευχθεί λοιπόν το φαινόμενο της υγραποίησης υδρατμών τοποθετούνται ανιχνευτές για να ελέγχουν τη

θερμοκρασία και την υγρασία του χώρου. Επιπλέον, η ελάχιστη θερμοκρασία δαπέδου θα πρέπει να είναι τους 20°C. Έτσι καταφέρνουμε να έχουμε στην ατμόσφαιρα μια θερμοκρασία λίγο κάτω από τους 25°C (μια αρκετά άνετη τιμή για το καλοκαίρι), χωρίς όμως να υπάρχει ο κίνδυνος της υγραποίησης.

Το μέγιστο καλυπτόμενο ψυκτικό φορτίο ενός χώρου από δροσισμό δαπέδου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 50 W/m², γεγονός που μεταφράζεται σε μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας του χώρου κατά 4°C-7°C που στις ελληνικές κατοικίες αντιστοιχεί περίπου στο 50-60% των μέγιστων ψυκτικών τους φορτίων. Για παράδειγμα με μία εξωτερική θερμοκρασία 34°C, στο εσωτερικό του κλιματιζόμενου χώρου θα επικρατούσαν στην καλύτερη περίπτωση 27°C με το συγκεκριμένο σύστημα. Σε ακραίες περιπτώσεις αρκετά ενεργοβόρων χώρων, ενδέχεται το σύστημα ενδοδαπέδιου δροσισμού να χρειαστεί και μια μικρή υποβοήθηση για να είναι απολύτως αποτελεσματικό. Την υποβοήθηση αυτή δίνει το Fan Coil, δηλαδή ένα σύστημα με εξαναγκασμένη ανακυκλοφορία αέρα. Το Fan Coil εκτός από την επιπλέον ψύξη πετυχαίνει και την αφύγρανση του του χώρου, μηδενίζοντας πλέον τις πιθανότητες εμφάνισης του φαινομένου της υγραποίησης.

Συμπερασματικά, σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα κλιματισμού που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στις σύγχρονες κατοικίες, το σύστημα ενδοδαπέδιου δροσισμού έχει τα ακόλουθα βασικά πλεονεκτήματα:

- Κλιματισμός χώρου χωρίς δημιουργία ρευμάτων αέρα
- Εξοικονόμηση χώρου και αποφυγή τοποθέτησης μηχανημάτων σε τοίχους, οροφές, δάπεδα
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας
- Ευχάριστη αίσθηση στον ανθρώπινο οργανισμό, καθώς η ανταλλαγή θερμότητας γίνεται δια ακτινοβολίας
- Χρήση του ίδιου συστήματος σωληνώσεων με το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης, άρα δεν απαιτείται η εγκατάσταση επιπλέον δικτύων
- Αθόρυβη λειτουργία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [3.1] <http://www.endodapediathermans.gr> <accessed 2018>.
- [3.2] Ε.Α. Μπέλλος, Διδακτορική διατριβή: Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτίρια, Αθήνα, Οκτώβριος 2016.
- [3.3] Α. Πρασσάς, Διπλωματική εργασία: Προσομοίωση ενεργειακής συμπεριφοράς τυπικής κατοικίας με ηλιακή θέρμανση χαμηλών θερμοκρασιών (ενδοδαπέδια θέρμανση) με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου TRNSYS, Σεπτέμβριος 2014.
- [3.4] <http://www.multiclimate.gr> <accessed 2018>.
- [3.5] www.cres.gr <accessed 2018>.
- [3.6] <http://www.zeon.com> <accessed 2018>.
- [3.7] Μ. Χρηματοπούλου, Διπλωματική εργασία: Προσομοίωση ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας, Αθήνα 2009.
- [3.8] <http://www.technotec.gr> <accessed 2018>.
- [3.9] Κ. Μόσχος, Διπλωματική εργασία: Προσομοίωση υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από ηλιακά συστήματα για θέρμανση κτιρίου, Αθήνα, Φεβρουάριος 2016.
- [3.10] <https://www.ise.fraunhofer.de/> <accessed 2018>.
- [3.11] R.C. Jordan, J.L. Therkeld, Design and economies of solar energy heat Pump Systems, ASME Journal Section, Heating Piping, and Air Cond 1954;26:122-130.
- [3.12] W.W.S. Charters, L.E. Taylor, Design problems of air source solar boosted heat pumps, International Solar Energy Society Congress, New Delhi, India, 1978;3:1459-1465.
- [3.13] K.S. Chaturvedi, T.D. Chen, Kheireddine, Thermal Performance of Variable Capacity Expansion Solar-Assisted Heat Pump, Department of Mechanical Engineering, Old Dominion University, Norfolk, Virginia, U.S.A. and Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 1996.
- [3.14] J.B. Huang, P.J. Chyng, Performance Characteristics of integral type Solar-Assisted Heat Pump, Solar Energy 2001;71:403-414.

- [3.15] J. Zhu, D. Li, S. Zhao, Study on Application of Solar Water Heat Pump for Building in China, *Procedia Engineering* 2015;121:1200–1207.
- [3.16] Natural and Low Energy Cooling in Buildings, CRES, Thermie Programme for the European Commission, Directorate-General XVII for Energy, 1994.
- [3.17] F.A. Peuser, K-H. Remmers, M. Schmauss, *Solar Thermal Systems*, Solarpraxis Berlin 2002.
- [3.18] H.M. Henning, *Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings-A Handbook for Planners*, Springer Wien New York 2004.
- [3.19] H.M. Henning, Solar assisted air conditioning of buildings – an overview, *Applied Thermal Engineering* 2007;27:1734-1749.
- [3.20] www.cres.gr/climasol <accessed 2018>.
- [3.21] T. Tsoutsos, J. Anagnostou, C. Pritchard, M. Karagiorgas, D. Agoris, Solar Cooling Technologies in Greece, *Applied Thermal Engineering* 2003;23:1427-1439.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ***Θερμική Ενέργεια***

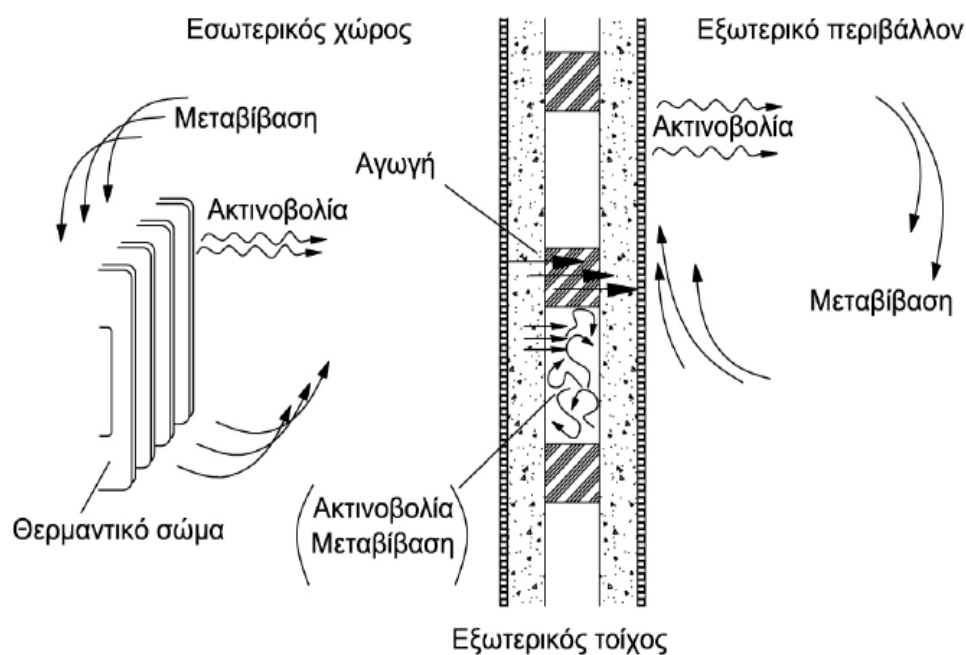
Θερμική ενέργεια ονομάζεται η κινητική ενέργεια των μορίων ενός σώματος που οφείλεται στις συνεχείς τυχαίες κινήσεις τους. Το σώμα γίνεται τόσο πιο θερμό όσο πιο έντονη είναι η κίνηση των μορίων του. Με άλλα λόγια, η θερμοκρασία του σώματος με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται. Για να αλλάξει η θερμική κατάσταση ενός σώματος, δηλαδή η κίνηση των μορίων του, απαιτείται η επίδραση κάποιας εξωτερικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια. Υπεισέρχεται εδώ δηλαδή ο όρος «θερμότητα» με τον οποίο εννοούμε την ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα άλλο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων του δεύτερου σώματος.

4.1 Μεταφορά θερμότητας

Γνωρίζουμε ότι μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντος του. Υπάρχουν τρεις τρόποι μεταφοράς θερμότητας:

- A) Αγωγή
- B) Συναγωγή
- Γ) Ακτινοβολία

Μετάδοση θερμότητας διαμέσου ενός υλικού γίνεται με τον συνδυασμό και των τριών μεθόδων. Ο βαθμός που συνεισφέρει η κάθε μέθοδος στην συνολική μετάδοση εξαρτάται, κυρίως από τη θερμοκρασία και το είδος του υλικού το οποίο εξετάζεται. Η αγωγή και η συναγωγή διαδραματίζουν σημαντικότερο ρόλο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους στα δομικά στοιχεία των κτηρίων. Την καλοκαιρινή περίοδο, η ακτινοβολία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο καθώς η προσπίπτουσα ακτινοβολία από τον ήλιο επηρεάζει τις εξωτερικές συνθήκες των δομικών υλικών.



Εικόνα 4.1.1: Τρόποι μεταφοράς θερμότητας στο χώρο [4.1].

A) Μετάδοση θερμότητας μέσω αγωγής

Η Θερμική Αγωγιμότητα (thermal conduction) μπορεί να οριστεί ως η μετάδοση της θερμότητας μέσω ενός στερεού ή υγρού σώματος σε κατάσταση ηρεμίας [4.2]. Η μεταφορά αυτή επιτυγχάνεται με:

- α) με μοριακή αλληλεπίδραση, δηλαδή μεταφορά ενέργειας από τα περισσότερο ενεργητικά μόρια στα γειτονικά τους που έχουν χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας,
- β) μέσω της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα στερεά. Η θερμική ενέργεια μεταφέρεται, μέσω των ταλαντώσεων των μορίων του πλέγματος και των κινουμένων ηλεκτρονίων, από περιοχές υψηλής, σε περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας,
- γ) μέσω ελαστικών κρούσεων ή μέσω διάχυσης των μορίων, κατά την τυχαία κίνησή τους στα ρευστά και στα αέρια.

Σύμφωνα με το Νόμο του Fourier, η μεταφορά θερμότητας με αγωγή εκφράζει τη ροή θερμότητας Q από ένα σώμα σε ένα άλλο μέσω επαφής και είναι ανάλογη με τη διαφορά θερμοκρασίας τους. Η σχέση Fourier δίνει την πυκνότητα παροχής θερμότητας q_x [W/m^2]:

$$q_x = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4.1.1)$$

όπου ο παράγων k [W/mK] είναι η ειδική θερμική αγωγιμότητα και εξαρτάται από τις ιδιότητες του σώματος [4.3].

B) Μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής

Η Θερμική Συναγωγιμότητα (thermal convection) είναι ένας μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας ο οποίος οφείλεται στον συνδυασμό της αγωγής και της κίνησης ενός ρευστού. Κατά την συναγωγή θερμότητας εκτός από τις τυχαίες κινήσεις των μορίων, τη διάχυση, μεταφέρεται ενέργεια και με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, κατά την οποία μετακινείται συλλογικά μεγάλος αριθμός μορίων. Η συναγωγή εμφανίζεται μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας ενός σώματος όταν έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες [4.3].

Η συναγωγή θερμότητας διακρίνεται στην εξαναγκασμένη και στην ελεύθερη ή φυσική. Η εξαναγκασμένη συναγωγή εμφανίζεται όταν η κίνηση του ρευστού προκαλείται από εξωτερικά αίτια, δηλαδή από έναν ανεμιστήρα ή μια αντλία ενώ την ελεύθερη συναγωγή προκαλούν δυνάμεις οι οποίες δημιουργούνται από την μεταβολή της πυκνότητας όταν φυσικά μέσα στο ρευστό υπάρχουν και διαφορές στην θερμοκρασία. Ένα παράδειγμα ελεύθερης συναγωγής είναι ένα θερμαντικό σώμα (καλοριφέρ) όταν λειτουργεί. Ο θερμαινόμενος αέρας είναι ελαφρύτερος και καταλαμβάνει τα ανώτερα στρώματα, ενώ ο ψυχρότερος αέρας παρασύρεται προς το θερμαντικό σώμα για να ακολουθήσει και αυτός στη συνέχεια την πορεία του θερμού αέρα [4.3]. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας παροχής θερμότητας q [W/m²] που είναι ανάλογη της υπάρχουσας θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ επιφάνειας T_s και ρευστού T_∞ , χρησιμοποιείται η σχέση Newton:

$$q = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4.1.2)$$

όπου h είναι η ειδική συναγωγιμότητα σε (W/m²K).

Με συναγωγή θερμότητας μεταφέρεται η αισθητή θερμότητα. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις συναγωγής με μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας, όταν εμφανίζεται αλλαγή της φάσης του υγρού σε ατμό κατά την ατμοποίηση, ή του ατμού σε υγρό κατά τη συμπύκνωση.

Γ) Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

Κατά τη θερμική ακτινοβολία η θερμότητα μεταφέρεται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα στερεά σώματα, τα περισσότερα υγρά και μερικά αέρια ακτινοβολούν θερμότητα συγχρόνως όμως μπορούν να απορροφήσουν μέρος της ακτινοβολίας την οποία εκπέμπουν άλλα σώματα. Στην ακτινοβολία εμφανίζεται διπλή μετατροπή ενέργειας, και ενώ στην αγωγή και στη συναγωγή απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου για την μεταφορά θερμότητας, στην ακτινοβολία δε συμβαίνει αυτό. Η ακτινοβολία εμφανίζεται στο κενό και μάλιστα με εντονότερο ρυθμό [4.3]. Στη φύση ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η θέρμανση της Γης από τον Ήλιο, όπου δεν υπάρχει μέσο μετάδοσης. Η ιδανική επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με το μέγιστο ρυθμό ονομάζεται μέλαν σώμα. Η ακτινοβολουμένη θερμότητα από ένα πραγματικό μη μέλαν σώμα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (4.1.3)$$

όπου T_s είναι η θερμοκρασία του σώματος σε Kelvin, σ είναι η σταθερά ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ή η σταθερά Stefan-Boltzmann και ισούται με $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ και ε είναι ο συντελεστής εκπομπής του πραγματικού σώματος με τιμές από 0 έως και 1 για το μέλαν σώμα. Είναι γνωστό ότι όταν η ηλιακή ακτινοβολία πέφτει σε μία στερεά επιφάνεια, ένα τμήμα αυτής απορροφάται από την εξωτερική επιφάνεια και μετατρέπεται σε θερμότητα, ένα άλλο τμήμα της επανεκπέμπεται προς τα έξω, ενώ το υπόλοιπο διαπερνά την στερεή επιφάνεια.

Η μεταφορά θερμότητας που παρατηρείται στα κτήρια έχει ως αποτέλεσμα τις κρύες ημέρες να υπάρχει ροή θερμότητας από το εσωτερικό χώρο του κτηρίου προς το περιβάλλον και τις θερμές ημέρες από το περιβάλλον προς τον εσωτερικό χώρο του κτηρίου. Οι απώλειες θερμότητας ενός κτηρίου εξαρτώνται από:

- Το κλίμα της περιοχής

Όσο μικρότερες είναι οι θερμοκρασίες μιας περιοχής, τόσο μεγαλύτερες απώλειες παρουσιάζονται σε κάθε θερμαινόμενο χώρο ενός κτηρίου.

- Τη θέση του κτηρίου
- Την αναλογία όγκου προς την εξωτερική επιφάνεια

Το κέλυφος του κτηρίου διαχωρίζει τον εσωτερικό θερμό χώρο του από το ψυχρότερο χειμερινό περιβάλλον. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του κελύφους (εξωτερικά τοιχώματα), τόσο μεγαλύτερες είναι οι θερμικές απώλειες.

- ο Την δημιουργία θερμογεφυρών

Θερμογέφυρες ονομάζονται τα τμήματα ενός κατασκευαστικού στοιχείου που παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερες θερμικές απώλειες από το σύνολο του στοιχείου. Οι θερμογέφυρες παρουσιάζονται συνήθως στις απολήξεις των πλακών, τις κολώνες, τα δοκάρια και τα πρέκια των παραθύρων. Τα τμήματα λοιπόν αυτά παρουσιάζουν μειωμένη αντίσταση θερμοδιαφυγής και κατά συνέπεια αυξημένο συντελεστή θερμοπερατότητας U . Επιβάλλεται λοιπόν η θερμομόνωση των θερμογεφυρών, η οποία γίνεται στην εξωτερική όψη του κελύφους ή ενδιάμεσα μεταξύ των στοιχείων πλήρωσης. Ειδικότερα, θερμομόνωση ενός δομικού στοιχείου ονομάζεται το σύνολο των μεθόδων και των υλικών που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό της ροής θερμότητας μεταξύ των χώρων εκατέρωθεν του στοιχείου. Η επιτυχής θερμομόνωση εξασφαλίζει τη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου, δηλαδή περιορίζει τη ροή θερμότητας διαμέσου αυτού. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας U για τα κύρια δομικά στοιχεία ενός κτηρίου στην Αττική (Κλιματική ζώνη Β) δίνονται στο πίνακα 4.1.1.

Πίνακας 4.1.1: Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας U για τα κύρια δομικά στοιχεία ενός κτηρίου στην Αττική [4.4].

<i>Δομικά στοιχεία</i>	<i>Συντελεστής θερμοπερατότητας U (W/m^2K)</i>
<i>Υαλοπίνακας</i>	3.00
<i>Εξωτερικοί τοίχοι</i>	0.50
<i>Οροφή</i> <i>(σε επαφή με εξωτερικό αέρα)</i>	0.45
<i>Δάπεδο</i> <i>(σε επαφή με έδαφος)</i>	0.90

Με βάση τα παραπάνω η ροή θερμότητας και ως εκ τούτου η θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό ενός κτηρίου επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμική μάζα ή τη θερμοχωρητικότητα του κελύφους του κτηρίου.

4.2 Θερμική Μάζα κτηρίου

Η θερμική μάζα είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό ενός κτηρίου, και εκφράζει την ικανότητα των δομικών του υλικών να αποθηκεύουν θερμότητα και να την εκπέμπουν με χρονική καθυστέρηση. Συνεπώς, η μεγάλη θερμική μάζα συμβάλλει στην μείωση της απαίτησης για κλιματισμό κατά τη θερινή περίοδο και στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου για θέρμανση κατά τη χειμερινή περίοδο. Η απουσία της απαραίτητης θερμικής μάζας, έχει σαν αποτέλεσμα την εξισορρόπηση των εσωτερικών και εξωτερικών θερμοκρασιών σε μικρό χρονικό διάστημα, επηρεάζοντας άμεσα το εσωτερικό περιβάλλον του κτηρίου και κατά συνέπεια οδηγεί στη συνεχή λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης και κατ' επέκταση στην αυξημένη κατανάλωση καυσίμων. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική μάζα μιας κατασκευής, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να επηρεαστούν οι εσωτερικές συνθήκες από τις εξωτερικές. Στο κλίμα της Ελλάδας, η ύπαρξη θερμικής μάζας είναι μία από τις βασικότερες προϋποθέσεις που δίνουν δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας [4.5].

Παρόλα αυτά, σε πολλά κτήρια, η θερμική μάζα στην σημερινή πρακτική της κατασκευής είναι παραμελημένη υπόθεση. Βαριές κατασκευές σπάνια κατασκευάζονται και η τάση είναι πως θα κατασκευαστεί με τα λιγότερα υλικά μια οικοδομή ελαφριά και αισθητικά ωριαία. Η προσθήκη θερμικής μάζας σε μια οικοδομή και ιδιαίτερα σε μικρή (μονοκατοικία ή διπλοκατοικία), ούτε δαπανηρή είναι, ούτε δύσκολη. Για παράδειγμα, κάπως παχύτερος τοίχος και χωρίσματα, παχύτερο δάπεδο και ένα βαρύ τζάκι αυξάνουν σημαντικά την θερμική μάζα. Η έννοια της θερμικής μάζας έχει σαν προϋπόθεση εξωτερική θερμική μόνωση των τοίχων της οροφής και του πατώματος. Όπως είναι γνωστό η κοινή πρακτική σήμερα είναι, η μόνωση να τοποθετείται στις νέες κατασκευές στο μέσον του πάχους των εξωτερικών τοίχων και στις υπάρχουσες κατασκευές στις εσωτερικές τους πλευρές [4.5].

4.3 Η θερμοχωρητικότητα των υλικών

Θερμοχωρητικότητα ενός σώματος ή στοιχείου κατασκευής ονομάζεται η ικανότητά του να αποθηκεύει κάποια ποσότητα θερμότητας, όταν θερμαίνεται. Όσο μεγαλύτερη

είναι η θερμική μάζα μιας κατασκευής (μεγάλη θερμοχωρητικότητα), τόσο βραδύτερα ανταποκρίνεται η εσωτερική θερμοκρασία στη διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας. Η θερμική μάζα επηρεάζεται από την ικανότητα των υλικών της κατασκευής να αποταμιεύσει θερμότητα δηλαδή από την ειδική θερμότητα (kJ/kgK) και την πυκνότητα (kg/m^3) των υλικών, επομένως από την θερμοχωρητικότητα τους (kJ/K) που είναι το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός κυβικού μέτρου του υλικού κατά 1°C [4.5]. Π.χ. αν και η ειδική θερμότητα του μπετόν είναι περίπου το $\frac{1}{4}$ της ειδικής θερμότητας του νερού η θερμοχωρητικότά του είναι σχεδόν η μισή. Δηλαδή η πυκνότητα του μπετόν αντισταθμίζει κατά κάποιο τρόπο την χαμηλή του ειδική θερμότητα και το μπετόν αποταμιεύει σχετικά μεγάλη ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Συνεπώς, για να αποταμιευθεί μεγάλη ποσότητα θερμότητας σ' ένα δεδομένο όγκο τοίχου και πατώματος, πρέπει να χρησιμοποιηθούν υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας [4.5].

Τα σύγχρονα δομικά υλικά, λόγω του μικρού τους βάρους χαρακτηρίζονται από μικρή θερμοχωρητικότητα. Συγκεκριμένα, αν το περίβλημα ενός κτηρίου δομείται από υλικά μικρής θερμοχωρητικότητας, οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος θα γίνονται άμεσα αισθητές στο εσωτερικό του. Αντίθετα, σε ένα κτήριο με δομικά υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας, ένα μέρος της θερμότητας κατά τη διάρκεια των υψηλών θερμοκρασιών της ημέρας αποθηκεύεται στα στοιχεία του κελύφους και αυξάνει τη θερμοκρασία τους. Κατά τη διάρκεια της νύχτας με τη θερμοκρασία να μειώνεται, η θερμότητα που είχε αποθηκευτεί στα υλικά αποδίδεται πλέον στο περιβάλλον. Έτσι, η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτηρίου μεταβάλλεται πιο ομαλά σε σχέση με την αντίστοιχη στο περιβάλλον. Επομένως, μεγάλη θερμοχωρητικότητα ενός υλικού, που είναι και ανάλογη με τον όγκο και την πυκνότητά του, συνεπάγεται μεγάλη θερμική μάζα στο κέλυφος του κτηρίου [4.6].

Οι φυσικοί λίθοι, το τούβλο και το σκυρόδεμα αποτελούν υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας με τον φυσικό λίθο να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πυκνότητα [4.6]. Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξάνεται, τα υλικά αυτά απορροφούν θερμότητα από τον αέρα και την απελευθερώνουν όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μειώνεται. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται καλύτερα όσο μεγαλύτερη επιφάνεια του υλικού εκτίθεται. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η εκτιθέμενη επιφάνεια στο εσωτερικό περιβάλλον ενός κτηρίου, τόσο μεγαλύτερα είναι τα οφέλη στη θερμική μάζα

αυτού [4.6]. Εκτός όμως, από τα παραπάνω συνηθισμένα δομικά υλικά, η θερμική μάζα ενός κτηρίου μπορεί να αυξηθεί και με άλλα λιγότερο εφαρμοσμένα υλικά και τεχνικές, μεταξύ των οποίων είναι και τα Υλικά Αλλαγής Φάσης που παρουσιάζουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα και θα αναλυθούν παρακάτω.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η θερμική μάζα λειτουργεί ως «ρυθμιστής» της θερμοκρασίας τόσο το καλοκαίρι όσο και το χειμώνα και βασικό ρόλο στη ρύθμιση αυτής παίζει η διαδικασία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και απόδοσής της στο εσωτερικό περιβάλλον μέσω των δομικών στοιχείων του κτηρίου [4.6].

4.4 Αποθήκευση θερμικής ενέργειας

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους όπως δείχνει και η εικόνα 4.4.1.:

- α) αποθήκευση αισθητής θερμότητας,
- β) αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και
- γ) αποθήκευση ενέργειας χημικών δεσμών μέσω θερμοχημικών αντιδράσεων.



Εικόνα 4.4.1: Τρόποι αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

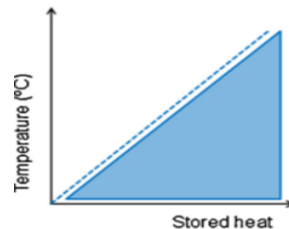
4.4.1 Αποθήκευση αισθητής θερμότητας [4.7]

Αισθητή θερμότητα καλείται το ποσό θερμότητας που απορροφάται ή απελευθερώνεται από ένα υλικό καθώς η θερμοκρασία του αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα και ως εκ τούτου δημιουργεί αλλαγή στην τυχαία κίνηση των μορίων του υλικού. Κατά την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία ενός στερεού ή υγρού υλικού. Καθοριστικός παράγοντας στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας υπό μορφή αισθητής θερμότητας, είναι η

θερμοχωρητικότητα του υλικού και η μεταβολή της θερμοκρασίας που υφίσταται αυτό κατά τη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης, δηλαδή κατά τη διαδικασία απορρόφησης και απόδοσης της θερμότητας. Το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση c_p σε [J/kgK] του μέσου, τη θερμοκρασιακή αλλαγή ($T_f - T_i$) σε [K] και την ποσότητα της μάζας m σε [kg] του υλικού και δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot c_p \cdot dT = m \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) \quad (4.4.1)$$

Στη παρακάτω εικόνα 4.4.2 φαίνεται η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού, καθώς αποθηκεύεται αισθητή θερμότητα. Η σχέση θερμοκρασίας και αποθηκευμένης θερμότητας είναι γραμμική.



Εικόνα 4.4.2: Αποθήκευση αισθητής θερμότητας συναρτήσει θερμοκρασίας [4.8].

Η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p εκφράζει το ποσό ενέργειας που απορροφάται ή αποδίδεται σε θερμοκρασιακή μεταβολή του υλικού κατά 1 Kelvin υπό σταθερή πίεση. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις για τη μεταξύ των υλικών σύγκριση προτιμάται το μέγεθος της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερό όγκο c_v [J/m³K], που εκφράζει το ποσό ενέργειας που απορροφάται ή αποδίδεται σε θερμοκρασιακή μεταβολή του υλικού κατά 1 Kelvin υπό σταθερό όγκο.

Συμπερασματικά, η ειδική θερμοχωρητικότητα αποτελεί το βασικό κριτήριο για την επιλογή του υλικού που είναι κατάλληλο για αποθήκευση θερμότητας. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή αυτής, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό θερμότητας που μπορεί να αποθηκεύσει το υλικό. Ειδικότερα:

- Ο αέρας έχει τη μικρότερη θερμοχωρητικότητα και το νερό τη μεγαλύτερη.
- Ο χάλυβας έχει μικρότερη θερμοχωρητικότητα από το νερό.
- Το σκυρόδεμα έχει περίπου 20% μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα από τη πέτρα και 50% από το τούβλο.

Τα δομικά υλικά εκτός από τη μεγάλη τιμή ειδικής θερμοχωρητικότητας θα πρέπει να πληρούν και άλλες προϋποθέσεις όπως:

- Να έχουν μεγάλη πυκνότητα
- Να έχουν μεγάλο ρυθμό απορρόφησης ή απελευθέρωσης θερμότητας
- Να διαθέτουν αντοχή
- Να μην είναι εύφλεκτα, διαβρωτικά και τοξικά
- Να έχουν σχετικά χαμηλό κόστος
- Να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν θερμικά και σαν ψυκτικά μέσα

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αισθητής θερμότητας είναι υγρά, μεταξύ των οποίων είναι το νερό και έλαια, και στερεά όπως πέτρα, τούβλο, σκυρόδεμα, σίδηρο κλπ. Τα αέρια αποφεύγονται λόγω χαμηλών τιμών ειδικής θερμοχωρητικότητας. Ο πίνακας 4.4.1 δείχνει κάποιες βασικές ιδιότητες υγρών και στερεών υλικών αποθήκευσης αισθητής θερμότητας.

Πίνακας 4.4.1.: Βασικές ιδιότητες υγρών και στερεών υλικών αποθήκευσης αισθητής θερμότητας [4.9].

Material	Type	Temperature range (°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/(kg K))	k (W/(mK)) (at 20 °C)	e (W s ^{1/2} /(m ² K))
Water	Liquid	0–100	1000	4.19	0.58	49.30
Caloria HT43	Liquid	12–260	867	2.2	–	–
Ethanol	Liquid	Up to 78	790	2.4	0.171	18.01
Propanol	Liquid	Up to 97	800	2.5	0.161	17.94
Butanol	Liquid	Up to 118	809	2.4	0.167	18.01
Isobutanol	Liquid	Up to 100	808	3	0.133	17.96
Isopentanol	Liquid	Up to 148	831	2.2	0.141	16.06
Octane	Liquid	Up to 126	704	2.4	0.134	15.05
Engine Oil	Liquid	Up to 160	888	1.88	–	–
Brick	Solid	20–70	1600	0.84	1.20	1270
Concrete	Solid	20–70	2240	1.13	0.9–1.3	47.73–57.36
Cement sheet	Solid	20–70	700	1.050	0.36	514
Gypsum plastering	Solid	–	1200	0.837	0.42	649
Granite	Solid	20–70	2650	0.900	2.90	2967
Marble	Solid	20–70	2500	0.880	2.00	2285
Sandstone	Solid	20–70	2200	0.712	1.83	1710
Clay sheet	Solid	–	1900	0.837	0.85	1163
Asphalt sheet	Solid	–	2300	1.700	1.20	2166
Steel slab	Solid	20–70	7800	0.502	50	13,992
Cork board	Solid	–	160	1.888	0.04	110
Wood	Solid	–	800	2.093	0.16	324
Plastic board	Solid	–	1050	0.837	0.50	663
Rubber board	Solid	–	1600	0.200	0.30	310
PVC board	Solid	–	1379	1.004	0.16	410
Asbestos sheet	Solid	–	2500	1.050	0.16	648
Formaldehyde board	Solid	–	30	1.674	0.03	39
Thermalite board	Solid	–	753	0.837	0.19	346
Fiber board	Solid	–	300	1	0.06	134
Siporex board	Solid	–	550	1.004	0.12	257
Polyurethane board	Solid	–	30	0.837	0.03	27
Light plaster	Solid	–	600	1	0.16	712
Dense plaster	Solid	–	1300	1	0.50	806
Aluminum	Solid	Up to 160	2707	0.896	204	703.42
Aluminum oxide	Solid	Up to 160	3900	0.84	30	313.50
Aluminumsulfate	Solid	Up to 160	2710	0.75	–	–
Cast iron	Solid	Up to 160	7900	0.837	29.3	440.16
Pure iron	Solid	Up to 160	7897	0.452	73	510.46
Calcium chloride	Solid	Up to 160	2510	0.67	–	–
Copper	Solid	Up to 160	8954	0.383	385	1149.05
Stone, granite	Solid	Up to 160	2640	0.82	1.7–3.98	61.20–92.82
Stone, sandstone	Solid	Up to 160	2200	0.71	1.83	53.46

4.4.2 Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας [4.10]

Λανθάνουσα θερμότητα είναι το ποσό θερμότητας που επιφέρει αλλαγή στην κατάσταση της ύλης (αλλαγή φάσης), χωρίς τη μεταβολή της θερμοκρασίας της (δηλαδή, η θερμότητα αυτή δεν είναι αντιληπτή με τις αισθήσεις) και αποδίδεται στη μεταβολή των δεσμών και της κινητικής ενέργειας των μορίων του υλικού.

Φαινόμενο αλλαγής φάσης [4.11-4.12]

Οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα υλικό είναι η στερεή, η υγρή και η αέρια ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που του επιβάλλονται. Το φαινόμενο της αλλαγής φάσης εκδηλώνεται συνήθως μεταξύ της στερεάς, υγρής και αέριας φάσης και κατά τη διάρκεια αυτού, η πίεση και η θερμοκρασία παραμένουν σχεδόν σταθερές, με τη σχεδόν σταθερή αυτή θερμοκρασία να ονομάζεται θερμοκρασία αλλαγής φάσης. Χαρακτηριστικό αυτού του φαινομένου είναι η αλλαγή μιας ή περισσότερων φυσικών ιδιοτήτων του υλικού όπως η θερμοχωρητικότητα, ο όγκος κ.α.

Πιο συγκεκριμένα, ως προς την αλλαγή φάσης οι πιθανές μετατροπές είναι εξής:

- Τήξη: μετατροπή από στερεή σε υγρή φάση
- Πήξη: αντίστροφη διαδικασία της τήξης, δηλαδή από υγρή σε στερεά φάση
- Ατμοποίηση ή βρασμός: μετατροπή από υγρή σε αέρια φάση
- Υγροποίηση ή συμπύκνωση: αντίστροφη διαδικασία της ατμοποίησης, δηλαδή από αέρια σε υγρή φάση
- Εξάχνωση: μετατροπή από στερεή σε αέρια φάση
- Εναπόθεση: αντίστροφη διαδικασία της εξάχνωσης, δηλαδή από αέρια σε στερεή φάση
- Η μετατροπή από στερεό σε στερεό, όπου γίνεται μετάβαση από μία κρυσταλλική δομή σε μία άλλη ή μετάβαση από μία άμορφη δομή σε μία κρυσταλλική.

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας βασίζεται στην ιδιότητα των υλικών να απορροφούν θερμότητα καθώς αλλάζουν φάση. Η μετατροπή από στερεό σε στερεό, λόγω της μικρής ποσότητας λανθάνουσας θερμότητας που εμφανίζει, δεν είναι σύνηθες να εφαρμόζεται στα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Από την άλλη μεριά, οι μετατροπές από στερεό σε αέριο καθώς και από υγρό σε αέριο, αν και παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσά λανθάνουσας θερμότητας

απ' ότι η τήξη, που περιγράφεται παρακάτω, δεν είναι κατάλληλες για κτηριακές εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, αφού συνδέονται με μεγάλες μεταβολές όγκου (λόγω σχηματισμού αερίου) και επομένως με πιο αυστηρές απαιτήσεις περιορισμού, κάτι που καθιστά το σύστημα σύνθετο και μη πρακτικό (δοχεία υπό πίεση κλπ.). Έτσι, η πιο συνηθισμένη διεργασία για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας είναι η τήξη, καθώς με αυτήν μπορούν να αποθηκεύονται σχετικά μεγάλα ποσά λανθάνουσας θερμότητας μέσα σε μικρό θερμοκρασιακό εύρος και με μικρές μεταβολές όγκου (<10%).

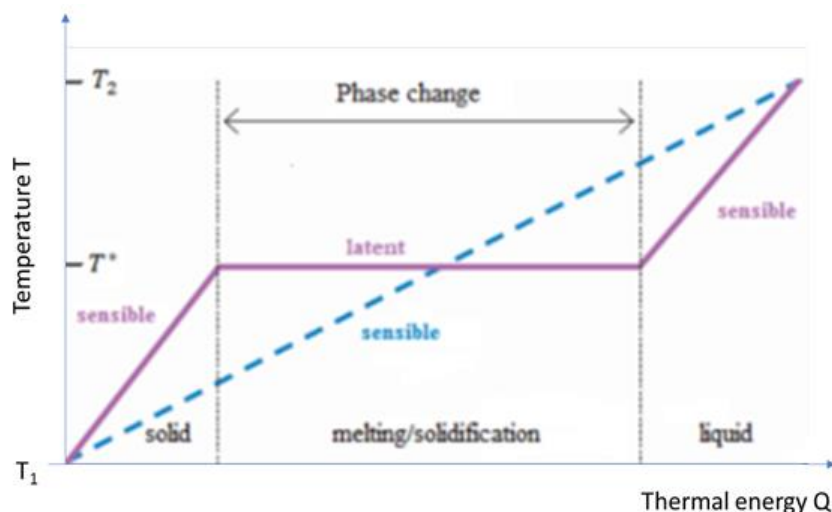
Κατά τη διάρκεια της τήξης, όπου το υλικό αποθήκευσης μεταβαίνει από τη στερεή κρυσταλλική δομή στην υγρή φάση, απορροφάται θερμότητα για τη διάσπαση των διαμοριακών δεσμών του και η θερμοκρασία του διατηρείται περίπου σταθερή. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται θερμοκρασία τήξης και η θερμότητα που παρέχεται λανθάνουσα θερμότητα τήξης. Κατά την αντίστροφη διαδικασία (πήξη), απελευθερώνεται θερμότητα, προκειμένου τα μόρια του υλικού να αποκτήσουν αυστηρή διάταξη.

Η συνολική θερμότητα που αποθηκεύεται σε ένα υλικό, μεταβαίνοντας από μία θερμοκρασία σε μια θερμοκρασία $T_2 > T_1$ και αλλάζοντας φάση έστω από στερεό σε υγρό σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία T^* , είναι:

$$Q_S = m \cdot [C_s \cdot (T^* - T_1) + \lambda + C_l \cdot (T_2 - T^*)] \quad (4.4.2)$$

όπου m είναι η μάζα του υλικού, C_s , C_l είναι οι ειδικές θερμοχωρητικότητες της στερεής και υγρής φάσης του υλικού αντίστοιχα και λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα τήξης.

Δηλαδή, η συνολική αυτή θερμότητα, είναι το άθροισμα της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση όντας στερεό από τη θερμοκρασία T_1 στη θερμοκρασία τήξης T^* , της λανθάνουσας θερμότητας στη θερμοκρασία T^* και της αισθητής θερμότητας για τη μετάβαση όντας πλέον υγρό από τη θερμοκρασία T^* στην τελική θερμοκρασία T_2 . Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η μετάβαση από στερεό σε υγρό που περιγράψαμε.



Διάγραμμα 4.4.3: Θερμική ενέργεια συναρτήσει της θερμοκρασίας και μετάβαση από τη στερεή στην υγρή φάση.

Κάθε σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας θα πρέπει να διαθέτει τις ακόλουθες τρεις ιδιότητες: ένα υλικό αλλαγής φάσης (PCM) κατάλληλο για το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής που μας ενδιαφέρει, ένα χώρο κατάλληλο για την τοποθέτηση του υλικού αλλαγής φάσης και ο οποίος θα πρέπει να είναι συμβατός με αυτό και έναν κατάλληλο εναλλάκτη θερμότητας για τη μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας.

Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας πλεονεκτούν έναντι των συστημάτων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας όπως έχει προαναφερθεί. Ο λόγος είναι ότι τα πρώτα έχουν υψηλότερη πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας και δυνατότητα απορρόφησης/απελευθέρωσης θερμότητας σε σχεδόν σταθερή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια αλλαγής φάσης του υλικού.

4.4.3 Αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας [4.13-4.14]

Τα συστήματα αποθήκευσης που χρησιμοποιούν κάποια χημική αντίδραση ονομάζονται θερμοχημικά συστήματα και αποθηκεύουν την ηλιακή θερμική ενέργεια ως θερμότητα χημικής αντίδρασης (αντιστρεπτής), δηλαδή ως ενέργεια χημικών δεσμών. Σ' αυτή την περίπτωση, το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται δίνεται από τη σχέση:

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta h_r \quad (4.4.3)$$

Το κυριότερο κριτήριο για την επιλογή μιας αμφίδρομης χημικής αντίδρασης είναι οι τιμές της σταθεράς ισορροπίας και των σταθερών ταχύτητας στη θερμοκρασία αποθήκευσης, οι οποίες θα πρέπει να είναι μεγάλες προς την κατεύθυνση της ενδόθερμης αντίδρασης, ώστε να εξασφαλίζεται γρήγορη και πλήρης απορρόφηση της ηλιακής θερμότητας. Επίσης, η αντίστροφη αντίδραση, που οδηγεί στην παραλαβή της θερμότητας, πρέπει να έχει ικανοποιητική απόδοση σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Τα θερμοχημικά συστήματα παρουσιάζουν μερικά ειδικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα συστήματα των προηγούμενων μεθόδων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, τα οποία είναι τα εξής:

- Μεγάλη πυκνότητα ενέργειας (2 έως 10 φορές μεγαλύτερη από αυτές των προηγούμενων μεθόδων)
- Δυνατότητα αποθήκευσης σε θερμοκρασία δωματίου
- Εξαιρετικά μεγάλους χρόνους αποθήκευσης
- Δυνατότητα μεταφοράς της ενέργειας
- Δυνατότητα λειτουργίας ως αντλιών θερμότητας
- Χαμηλό ενεργειακό κόστος

Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, παρατηρούμε ότι τα θερμοχημικά συστήματα συγκεντρώνουν πολλά πλεονεκτήματα. Παρά ταύτα, το επίπεδο ανάπτυξής τους βρίσκεται σε πολύ αρχικό στάδιο.

Από τις τρεις μεθόδους αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που αναλύθηκαν παραπάνω, πιο συχνά συναντάμε σε εφαρμογές τις μεθόδους αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Η αποθήκευση αισθητής θερμότητας χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες από τους κατασκευαστές για αποθήκευση/απελευθέρωση θερμικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή μειονεκτεί σε σχέση με τη μέθοδο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, λόγω του πολύ μεγαλύτερου όγκου υλικών που απαιτεί για την αποθήκευση του ίδιου ποσού θερμότητας [4.15]. Για την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας χρησιμοποιούνται Υλικά Αλλαγής Φάσης ή PCM τα οποία θα αναλυθούν πλήρως στη συνέχεια. Τα συστήματα αποθήκευσης χημικής ενέργειας προτείνονται ιδιαίτερος για μελλοντική χρήση σε εφαρμογές μεσαίων και υψηλών θερμοκρασιών.

Υλικά αλλαγής φάσης

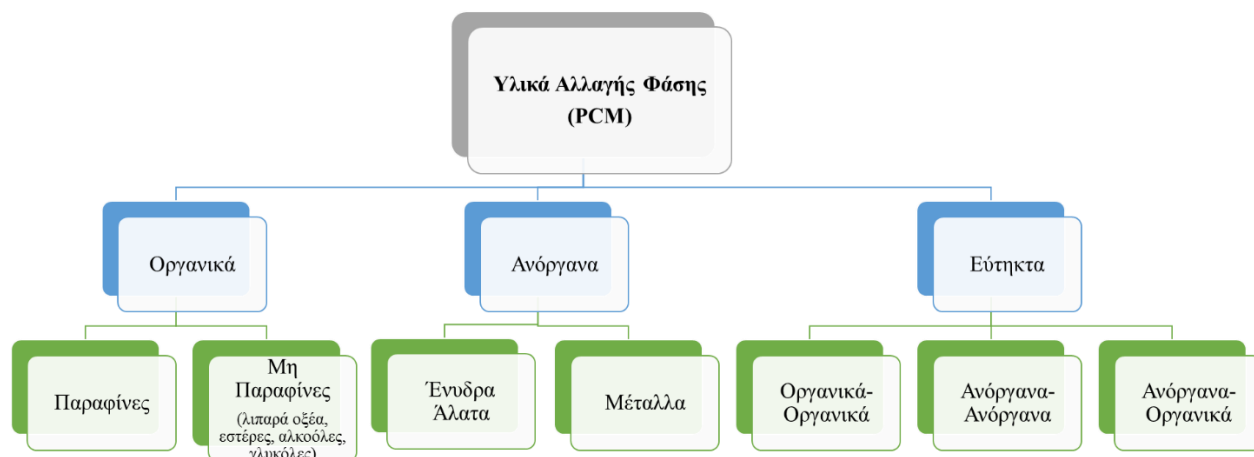
4.5 Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)

Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης ή Phase Change Materials (PCM) είναι ουσίες ή μίγματα ιδιαίτερης φυσικής και χημικής σύστασης, που ενόσω υφίστανται αλλαγή φάσης, έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν/απελευθερώνουν θερμική ενέργεια με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας διατηρώντας σταθερή θερμοκρασία (σημείο αλλαγής φάσης) ή σχεδόν σταθερή θερμοκρασία (ονομαστική θερμοκρασία αλλαγής φάσης) για την περίπτωση μιγμάτων πολλών συστατικών.

Τα PCM εφαρμόζονται ειδικά ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας τα οποία έχουν ερευνηθεί ως επί το πλείστον τα τελευταία 20 χρόνια. Τα PCM έχουν τρεις μοναδικές καταστάσεις, δηλαδή, μπορεί να είναι στερεά, υγρά και αέρια με τα δύο πρώτα να είναι πιο συχνά. Κατά τη διάρκεια αυτών των διαδικασιών, τα υλικά έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτά τα χαρακτηριστικά, τα PCM χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε πολλές εφαρμογές. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαδικασίες που έχουν ακολουθηθεί για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς αυτών των υλικών όταν στερεοποιούνται και όταν λιώνουν [4.16-4.17].

4.5.1 Κατηγοριοποίηση των PCM

Τα PCM μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε με βάση τη χημική τους σύσταση, είτε με βάση το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο γίνεται η αλλαγή φάσης τους, είτε ακόμα με κριτήριο τις εφαρμογές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η κατηγοριοποίηση όμως, που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι αυτή ως προς τη σύσταση. Έτσι τα PCM κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες: οργανικά, ανόργανα και εύτηκτα υλικά (εικόνα 4.5.1). Κάθε μία από αυτές τις ομάδες υλικών αλλαγής φάσης μπορεί να διαιρεθεί σε υποκατηγορίες. Έτσι, τα οργανικά PCM διακρίνονται σε παραφίνες και μη παραφίνες. Τα ανόργανα PCM διακρίνονται σε ένυδρα άλατα και μέταλλα ενώ τα εύτηκτα PCM είναι μίγματα οργανικών ή/και ανόργανων υλικών αλλαγής φάσης.



Εικόνα 4.5.1.: Κατηγοριοποίηση των PCM.

4.5.1.1 Οργανικά

Το ουσιαστικό νόημα των οργανικών υλικών είναι οποιοδήποτε υλικό υπάρχει στη φύση. Το μεγαλύτερο μέρος των οργανικών υλικών περιέχει μείγματα άνθρακα-υδρογόνου που συνδέεται με τις μορφές ζωής. Τα οργανικά PCM διακρίνονται στις παραφίνες και μη παραφίνες. Τα οργανικά υλικά ενσωματώνουν μια σταθερή ιδιότητα τήξης η οποία σημαίνει ότι μπορούν να υγροποιηθούν και να παγώσουν επανειλημμένα χωρίς διαχωρισμό φάσης και την μείωση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης τους. Επιπλέον δεν είναι διαβρωτικά και δεν εμφανίζουν έντονα το φαινόμενο της υπέρψυξης (supercooling) που θα αναλυθεί παρακάτω. Παρ'όλα αυτά, οι δυσμενείς ιδιότητες των οργανικών PCM είναι οι χαμηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας όταν είναι σε στερεή κατάσταση και η υψηλή μεταφορά θερμότητας που απαιτείται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησής τους.

Τα πλεονεκτήματά τους είναι [4.18-4.19]:

- Υπάρχει δυνατότητα παραγωγής τους σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος.
- Διαθέτουν υψηλή τιμή λανθάνουσας θερμότητας.
- Χαρακτηρίζονται από χημική σταθερότητα και οι ιδιότητές τους συνήθως δεν υποβαθμίζονται.
- Η εμφάνιση των φαινομένων της υπέρψυξης και του διαχωρισμού των φάσεων συντελείται σε αμελητέα συχνότητα.
- Παρουσιάζουν άριστη συμπεριφορά στην κυκλική καταπόνηση.

- Συνήθως εμφανίζουν συμβατότητα με τα συμβατικά δομικά υλικά.
- Είναι ανακυκλώσιμα.

Τα μειονεκτήματα τους είναι [4.18-4.19]:

- Χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, έχει μελετηθεί η χρήση μεταλλικών παραγόντων (μικρών μεταλλικών αντικειμένων, δοχείων, αγωγών και πτερυγίων), για την ενίσχυση του ρεύματος θερμότητας εντός του υλικού.
- Η ογκομετρική χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης είναι αρκετά χαμηλή.
- Έχουν εύφλεκτο χαρακτήρα το οποίο μετριάζεται με τη χρήση ενός κατάλληλα κατασκευασμένου μέσου συγκράτησης.
- Εξαιτίας του υψηλού κόστους των οργανικών ουσιών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο μίγματα παραφινών.

Παραφίνες

Η παραφίνη ξεχωρίζει μεταξύ των πιο σημαντικών οργανικών PCM τα οποία επιπλέον ονομάζονται κεριά παραφίνης. Οι παραφίνες ανήκουν στην κατηγορία των αλκανίων, τα οποία είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες με γενικό μοριακό τύπο. Οι καθαρές παραφίνες είναι ιδιαίτερος ακριβές, για το λόγο αυτό στις εφαρμογές επιλέγονται τεχνητές παραφίνες, οι οποίες αποτελούνται από μίγματα κυρίως αλυσίδων n-αλκανίων $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$, με αποτέλεσμα η τήξη/πύξη τους να πραγματοποιείται σε ένα εύρος θερμοκρασιών και όχι σε ένα συγκεκριμένο σημείο αλλαγής φάσης. Ο Parks [4.20] με την έρευνά του έδωσε πληροφορίες σχετικά με τις θερμικές ιδιότητες των η-αλκανίων. Ο Finke [4.20] έδωσε ένα εκτεταμένο αριθμό πληροφοριών για τη θερμική χωρητικότητα σχετικά με τη διάταξη αλκανίων ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) από $n = 8$ έως $n = 16$ σε σχέση με το εύρος θερμοκρασίας μεταξύ -261.0 και 26.8°C [4.21]. Το μειονέκτημα των παραφινών είναι η χαμηλή θερμική τους αγωγιμότητα (k) περίπου $0.2 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, η οποία πρέπει να αλλάζει για να αναπτυχθεί η ικανότητά τους σε θερμικές εφαρμογές [4.22-4.24].

Μη παραφίνες

Οι μη παραφίνες είναι η μεγαλύτερη κατηγορία υποψήφιων υλικών για αποθήκευση θερμότητας μέσω αλλαγής φάσης. Κάθε ένα από αυτά τα υλικά έχουν τις δικές τους ιδιότητες οι οποίες είναι τελείως διαφορετικές από τις παραφίνες που έχουν ουσιαστικά

τις ίδιες ιδιότητες. Οι Abhat [4.25] και Buddhi [4.26] έχουν κάνει μια ευρεία επισκόπηση των οργανικών υλικών και έχουν διακρίνει διάφορους εστέρες, λιπαρά οξέα, υγρά και γλυκόλες κατάλληλες για σκοπούς αποθήκευσης ενέργειας. Αυτά τα οργανικά υλικά έχουν περαιτέρω υποομάδες ως ακόρεστα λίπη και άλλα. Η ομάδα των μη παραφινών χαρακτηρίζεται κυρίως από υψηλή θερμότητα τήξης, ευφλεκτότητα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλό σημείο ανάφλεξης, πήξη χωρίς εμφάνιση του φαινομένου της υπέρψυξης, ποικίλα επίπεδα τοξικότητας και αστάθεια σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω της ευφλεκτότητάς τους, τα οργανικά αυτά υλικά δεν πρέπει να εκτίθενται σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες, φλόγες και οξειδωτικά μέσα, γεγονός που περιορίζει σε κάποιο βαθμό τη χρήση τους ως υλικά αποθήκευσης θερμότητας σε κτήρια.

4.5.1.2 Ανόργανα

Τα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης περιλαμβάνουν τα ένυδρα άλατα και τα μέταλλα (τα μέταλλα έχουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες τήξης για παθητικές εφαρμογές κτηρίων).

Τα πλεονεκτήματά τους είναι [4.18-4.19]:

- Η υψηλή ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης.
- Η ευρεία διαθεσιμότητά τους.
- Η υψηλή θερμική τους αγωγιμότητα και λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης.
- Οι μικρές μεταβολές του όγκου τους κατά την μεταβολή της φάσης τους.
- Ο μη εύφλεκτος χαρακτήρας τους.

Τα μειονεκτήματά τους είναι [4.18-4.19]:

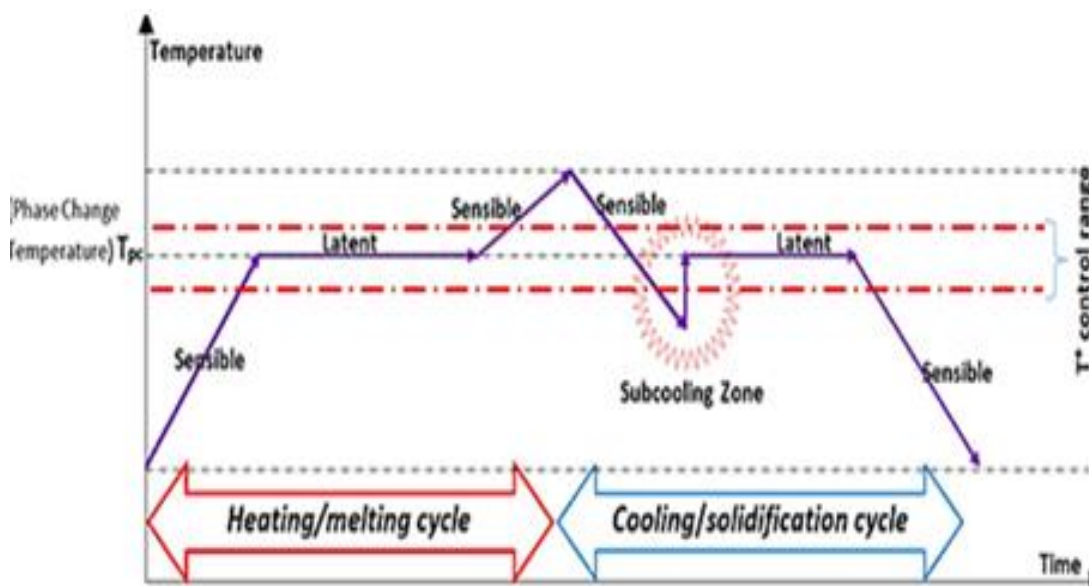
- Το πρόβλημα της υπόψυξης και του διαχωρισμού των φάσεων κατά τον μετασχηματισμό του υλικού, καθώς και ο σχηματισμός ιζήματος, περιορίζουν το εύρος των εφαρμογών των συγκεκριμένων υλικών.
- Παρατηρείται χημική αστάθεια.
- Κίνδυνος διάβρωσης του υλικού συσκευασίας.
- Κρίνεται απαραίτητη η χρήση προσθέτων πυρήνωσης.

Ένυδρα άλατα

Τα ένυδρα άλατα είναι τα πιο συνηθισμένα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης. Αυτά θεωρούνται ως κράματα ανόργανων αλάτων (AB) και νερού (H₂O) και αποτελούν ένα τυπικό κρυσταλλικό στερεό με γενικό μοριακό τύπο (AB.xH₂O). Η αλλαγή φάσης τους

από στερεό σε υγρό είναι ουσιαστικά μία αφυδάτωση της υγρασίας του άλατος, παρόλο που αυτή η διαδικασία μοιάζει θερμοδυναμικά με τήξη.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζουν τα ανόργανα PCM και συγκεκριμένα τα ένυδρα άλατα είναι ότι η διαδικασία στερεοποίησης πραγματοποιείται σε μια θερμοκρασία σημαντικά χαμηλότερη της θερμοκρασίας τήξης. Το φαινόμενο αυτό καλείται υπέρψυξη ή υπόψυξη (supercooling/subcooling) [4.29]. Συγκεκριμένα, κατά τη ψύξη ενός δείγματος PCM με υπέρψυξη, παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας του υγρού PCM κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης του, πριν ξεκινήσει η αλλαγή φάσης. Το φαινόμενο γίνεται πιο κατανοητό, αν παρατηρηθεί η καμπύλη θερμοκρασίας-χρόνου που δείχνει η εικόνα 4.5.2.



Εικόνα 4.5.2: Διάγραμμα αλλαγής θερμοκρασίας μέσω θέρμανσης και ψύξης ενός PCM [4.40].

Το πρόβλημα της υπέρψυξης μπορεί να περιοριστεί μέσω της χρήσης ενός μέσου πυρήνωσης (nucleator) στο PCM, το οποίο εξασφαλίζει το σχηματισμό της στερεής φάσης με ελάχιστη υπέρψυξη.

Δεύτερο πρόβλημα των ένυδρων αλάτων είναι το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσεων το οποίο ευθύνεται κατά ένα μεγάλο μέρος για την υποβάθμιση των θερμικών ιδιοτήτων τους και ειδικότερα της υψηλής πυκνότητας αποθήκευσης ενέργειας που τα χαρακτηρίζει [4.29]. Το φαινόμενο του διαχωρισμού φάσεων εμφανίζεται λόγω του ότι τα ένυδρα άλατα τήκονται σύμφωνα με το κατώτερο συστατικό του μίγματος

(ανομοιόμορφη τήξη), καθιστώντας κατ' αυτόν τον τρόπο μη αναστρέψιμη τη διαδικασία αλλαγής φάσης και οδηγώντας σε εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους.

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να περιοριστεί αλλάζοντας τις ιδιότητες του ένυδρου άλατος μέσω της προσθήκης άλλου υλικού (με πηκτικό υλικό είτε με υλικό που προκαλεί πύκνωση), το οποίο εμποδίζει τη βύθιση της στερεής φάσης στον πυθμένα. Μια άλλη λύση είναι η προσθήκη επιπλέον ποσότητας νερού, ώστε όλο το άνυδρο άλας να μπορεί να διαλυθεί στο νερό στο σημείο τήξης και να μη δημιουργείται υπερκορεσμός. Τέλος, η ανάδευση αποτελεί έναν ακόμη τρόπο για τον περιορισμό του διαχωρισμού των φάσεων [4.29].

Μέταλλα

Η ομάδα των μετάλλων αποτελείται από μέταλλα χαμηλής τήξης και εύτηκτα μέταλλα. Τα μέταλλα δεν έχουν μελετηθεί σοβαρά ως PCM, λόγω του βάρους τους. Επιπλέον, η χαμηλή διαθεσιμότητά τους και το μεγάλο τους κόστος, αποτελούν μειονεκτήματα για την εφαρμογή τους ως μέσα αποθήκευσης θερμότητας. Όμως, σε περιπτώσεις όπου ο όγκος είναι σημαντικός παράγοντας, η κατηγορία αυτή μπορεί να είναι υποψήφια για χρήση, χάρη στην υψηλή θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου που χαρακτηρίζει τα υλικά της. Ακόμα, σημαντικό πλεονέκτημα αυτών έναντι όλων των υπολοίπων κατηγοριών PCM, είναι η μεγάλη θερμική αγωγιμότητά τους [4.27].

4.5.1.3 Εύτηκτα

Τα εύτηκτα υλικά αλλαγής φάσης είναι μίγματα ανόργανων PCM (κυρίως ένυδρων αλάτων) και/ ή οργανικών PCM. Χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες: οργανικά-οργανικά, ανόργανα-ανόργανα και οργανικά-ανόργανα εύτηκτα υλικά [4.28]. Κάθε ένα από τα συστατικά ενός εύτηκτου μίγματος, υγροποιείται και στερεοποιείται χωρίς προβλήματα, σχηματίζοντας έτσι όλα μαζί ένα μίγμα κρυστάλλων των συστατικών κατά τη διαδικασία της κρυστάλλωσης. Η θερμοκρασία τήξης/πήξης τους είναι συνήθως χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης/πήξης των συστατικών τους [4.27].

Τα πλεονεκτήματά τους είναι [4.18-4.19]:

- ο Σχεδόν πάντα τήκονται και στερεοποιούνται χωρίς διαχωρισμό. Όταν στερεοποιούνται σχηματίζουν ένα μίγμα κρυστάλλων και ως εκ τούτου δε δίνουν την ευκαιρία στα συστατικά να διαχωριστούν.

- Έχουν ικανοποιητική ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας η οποία είναι ελάχιστα χαμηλότερη από την αντίστοιχη των οργανικών υλικών.

Τα μειονεκτήματα τους είναι [4.18-4.19]:

- Περιορισμένη διαθεσιμότητα, καθώς η χρήση τους αποτελεί νέα τεχνική για την αποθήκευση ενέργειας.

4.5.2 Μέθοδοι μέτρησης ιδιοτήτων των PCM

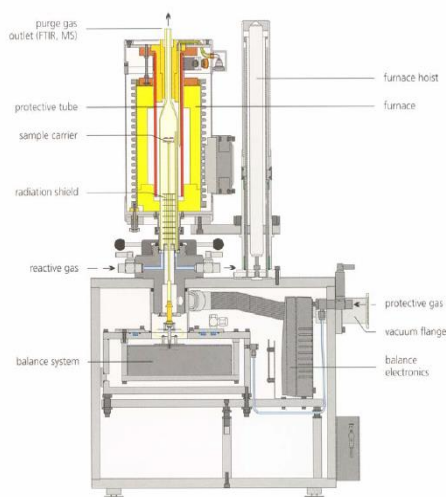
Οι μέθοδοι μέτρησης των θερμικών ιδιοτήτων των PCM παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία επιλογής του κατάλληλου PCM για τις εκάστοτε εφαρμογές. Έχουν αναπτυχθεί ποικίλες αναλυτικές μέθοδοι που χαρακτηρίζουν τις θερμικές ιδιότητες των καθαρών PCM και των ενσωματωμένων σε δομικά υλικά. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι είναι οι εξής:

- Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης – ΔΘΣ (ή ο αγγλικός όρος: Differential Scanning Calorimetry-DSC)
- Διαφορική Θερμική Ανάλυση- ΔΘΑ (ή ο αγγλικός όρος: Differential Thermal Analysis-DTA)
- Μέθοδος T-History (ή ο αγγλικός όρος: T-History Method)

4.5.2.1 Διαφορική Θερμιδομετρία Σάρωσης -DSC [4.29]

Η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC) μετρά την ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για τη διατήρηση της ουσίας σε δεδομένη θερμοκρασία [4.30]. Οι δοκιμές μεταβάλλουν τη θερμοκρασία γραμμικά με το χρόνο [4.31]. Τα δείγματα PCM δοκιμάζονται έναντι ενός δείγματος αναφοράς με γνωστές θερμικές ιδιότητες. Το προϊόν μιας δοκιμής DSC είναι μια καμπύλη που εμφανίζει τη ροή θερμότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία ή το χρόνο. Η καμπύλη DSC που παράγεται δείχνει τις θερμοκρασίες στερεοποίησης και τήξης ανάλογα με το μέγεθος της λανθάνουσας θερμότητας.

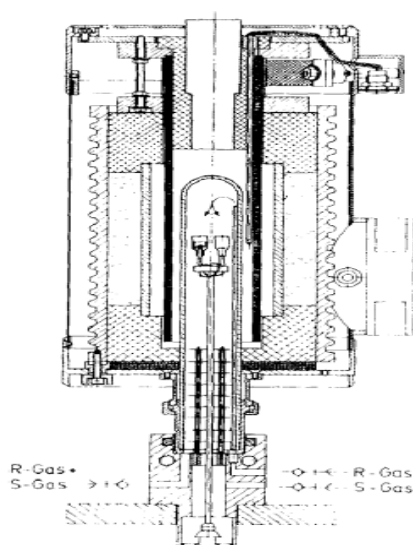
Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι τα έντονα φαινόμενα υπέρψυξης εξαιτίας των μικρών μεγεθών των δειγμάτων [4.32].



Εικόνα 4.5.3: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης DSC [4.33].

4.5.2.2 Διαφορική Θερμική Ανάλυση-DTA

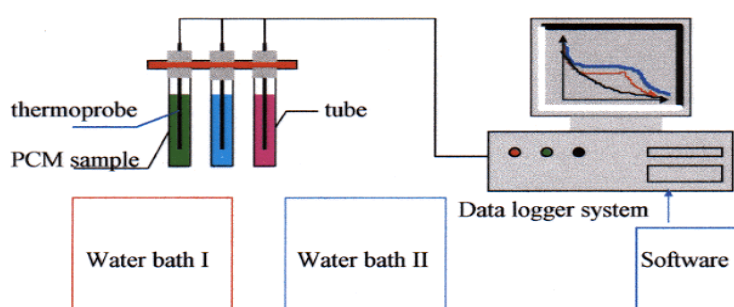
Παρόμοια με τη μέθοδο DSC, η διαφορική θερμική ανάλυση (DTA) διατηρεί τη ροή θερμότητας σταθερή και παρακολουθεί τη διαφορά στην αλλαγή θερμοκρασίας μεταξύ των δειγμάτων αναφοράς και δοκιμής. Οι θερμικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της θερμικής αγωγιμότητας, υπολογίζονται από τις διαφορές θερμοκρασίας [4.30]. Ο Buddhi [4.32] δημιούργησε μια απλή παραλλαγή της DTA όπου εξέτασε δείγματα με ακρίβεια 5% σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της DSC. Η μέθοδος DTA παράγει διαγράμματα χρόνου έναντι θερμοκρασίας, παρουσιάζοντας γραφικά την ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας σε διάφορες θερμοκρασίες [4.34].



Εικόνα 4.5.4: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης DTA [4.35].

4.5.2.3 Μέθοδος T-history

Μια απλοποιημένη μέθοδος, η T-history, έχει αναπτυχθεί με αποτελέσματα συγκρίσιμα με αυτά από τις μεθόδους DSC και DTA [4.30]. Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά από τους Zhang και Jiang [4.36], όπου τα δείγματα δοκιμής τοποθετούνται σε δοκιμαστικούς σωλήνες εφοδιασμένους με θερμοστοιχεία συνδεδεμένα σε καταγραφικό δεδομένων. Τα δείγματα θερμαίνονται και ψύχονται σε υδατόλουτρα για ορισμένο χρονικό διάστημα. Από τις καμπύλες θερμοκρασίας ως προς το χρόνο, μπορούν να ληφθούν οι θερμικές ιδιότητες του δείγματος. Οι Zhang και Jiang [4.36] ανέφεραν μια ακρίβεια ~10% με τα στοιχεία της βιβλιογραφίας για τα εξεταζόμενα δείγματα.



Εικόνα 4.5.5: Η πειραματική διάταξη των Zhang και Jiang [4.36].

Οι Hong [4.37] και Peck [4.38] τροποποίησαν τη μέθοδο βελτιώνοντας ορισμένες παραδοχές οι οποίες είχαν υιοθετηθεί από τους Zhang και Jiang. Επιπλέον σημειώνεται ότι ο Κραββαρίτης [4.39] έχει παρουσιάσει τη Μέθοδο της Θερμικής Καθυστέρησης (ή ο αγγλικός όρος: *Thermal Delay Method*), η οποία είναι μια βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου T-history. Η διαφορά μεταξύ της μεθόδου θερμικής καθυστέρησης και της T-history είναι ότι η πρώτη βασίζεται στη χρήση της θερμικής καθυστέρησης, δηλαδή τη διαφορά θερμοκρασίας που παρατηρείται μεταξύ του PCM και ενός υγρού αναφοράς σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ενώ η δεύτερη κάνει χρήση της χρονικής καθυστέρησης σε μια καθορισμένη θερμοκρασία. Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος T-history είναι μια απλή μέθοδος πολλοί εξακολουθούν να βασίζονται στις μεθόδους DSC και DTA για τη μέτρηση των ιδιοτήτων των PCM.

4.5.3 Μέθοδοι μοντελοποίησης της αλλαγής φάσης υλικών

Η διαδικασία αλλαγής φάσης των υλικών είναι ιδιαίτερα δύσκολη να αναλυθεί λόγω της περιορισμένης γνώσης της διεργασίας μεταφοράς θερμότητας στη διεπιφάνεια στερεού και υγρού, λόγω των διαφορετικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων του PCM στις δύο φάσεις,

λόγω της μεταβολής του όγκου του PCM κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης και λόγω της μη γραμμικότητας του προβλήματος, που οφείλεται στην κίνηση της διεπιφάνειας στερεής και υγρής φάσης κατά την αλλαγή φάσης [4.18,4.41]. Μεταξύ των δύο μετασχηματισμών της φάσης στερεού-υγρού υπάρχει μια συνεχώς μετακινούμενη επιφάνεια διαφορετικών φάσεων, γνωστό και ως πρόβλημα μετακινούμενου ορίου (moving boundary problem) ή πρόβλημα Stefan [4.18]. Αρχικά, το πρόβλημα Stefan προσεγγίστηκε θεωρώντας τη μεταφορά θερμότητας μόνο μέσω αγωγής σε ένα ημι-άπειρο υλικό και αργότερα θεωρώντας τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή κατά τη διάρκεια τήξης και στερεοποίησης του υλικού αλλαγής φάσης [4.18].

Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν διάφορες αριθμητικές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος Stefan. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι που λύνουν τα πολυδιάστατα προβλήματα της αλλαγής φάσης είναι οι μέθοδοι της ενθαλπίας (enthalpy method), της φαινόμενης ειδικής θερμοχωρητικότητας (effective specific heat method) και της πηγής θερμότητας (heat source method).

4.5.3.1 Μέθοδος Ενθαλπίας

Η μέθοδος της ενθαλπίας έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Η εξίσωση που διέπει το πρόβλημα είναι παρόμοια με την εξίσωση της κάθε φάσης.
- Δεν υπάρχει καμία προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται στη διεπιφάνεια στερεού και υγρού.
- Επιτρέπει τη δημιουργία μιας πολτώδους ζώνης μεταξύ των δύο φάσεων, η οποία είναι γνωστή ως mushy zone και χάρη σ' αυτή αποφεύγονται ασυνέχειες που μπορεί να δημιουργούν αριθμητικές αστάθειες [4.18].
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε υλικό, ακόμα και αν δεν πρόκειται για PCM. Για την περίπτωση PCM, είναι δυνατός ο καθορισμός της συνάρτησης ενθαλπίας, εξετάζοντας τα αποτελέσματα των DSC-μετρήσεων [4.18].

Η μέθοδος της ενθαλπίας προτάθηκε από τον Eyres [4.42] με την εξίσωση:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla[k(\nabla T)] \quad (4.5.1)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία, k είναι η θερμική αγωγιμότητα, το t είναι ο χρόνος, και ρ η πυκνότητα.

Η γενικευμένη μορφή της αναδιατυπωμένης μορφής της συνθήκης Stefan, η οποία πρωτοαναφέρθηκε από τον Voller [4.43], εκλαμβάνει το μέγεθος της ενθαλπίας ως πρωτεύουσα μεταβλητή με την συνάρτηση της θερμοκρασίας να παίρνει τις τιμές:

$$T = \begin{cases} \frac{H}{c}, H \leq CT_m \\ T, CT_m \leq H \leq CT_m + L \\ \frac{H-L}{c}, H \geq CT_m + L \end{cases} \quad (4.5.2)$$

και να επιλύεται συγχρόνως με την εξίσωση της ενθαλπίας του Voller and Cross [4.44] και Huang [4.45] όπου C είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και L η λανθάνουσα θερμότητα στερεοποίησης (kJ/kg).

Η μέθοδος αυτή, όπως φαίνεται από την εξίσωση, εκφράζει τη διατήρηση ενέργειας κατά την αλλαγή φάσης με όρους της ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας H και θερμοκρασίας T για σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες.

Το μέγεθος της ολικής ογκομετρικής ενθαλπίας H αποτελεί το άθροισμα της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας [4.46]:

$$H(T) = h(T) + \rho \cdot f(T) \cdot L \quad (4.5.3)$$

και:

$$h = \int_{T_m}^T \rho \cdot C \cdot dT \quad (4.5.4)$$

Σε περιπτώσεις όπου η αλλαγή φάσης δε συμβαίνει μόνο σε μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας, η σχέση ενθαλπίας-θερμοκρασίας δίνεται με τη σχέση:

$$H(T) = \begin{cases} CT, T < T_m \\ CT + L, T > T_m \end{cases} \quad (4.5.5)$$

ενώ σε ένα θερμοκρασιακό εύρος όπου η ενθαλπία εκφράζεται αλγεβρικά ως ομαλή συνεχής συνάρτηση της θερμοκρασίας, η εξίσωση αναδιατυπώνεται ως εξής:

$$H(T) = \begin{cases} CT, T \leq T_m - \varepsilon \\ H(T_m - \varepsilon) + \frac{L \cdot (T - T_m + \varepsilon)}{2 \cdot \varepsilon}, T_m - \varepsilon < T < T_m + \varepsilon \\ H(T_m + \varepsilon) + C \cdot (T - T_m - \varepsilon), T_m + \varepsilon \leq T \end{cases} \quad (4.5.6)$$

Όταν η ενθαλπία ορίζεται από την παραπάνω ομαλή συνάρτηση (χωρίς ταλαντώσεις), τότε αποδεικνύεται ότι οι επικείμενες θερμοκρασίες θα μπορέσουν να προβλεφθούν

μόνο όταν τουλάχιστον δύο κομβικές θερμοκρασίες βρίσκονται στην περιοχή αλλαγής φάσης σε όλα τα χρονικά βήματα. Επομένως, το μέγεθος ε αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για την αποδοτικότητα του συστήματος [4.44].

Η μέθοδος ενθαλπίας έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλές περιπτώσεις, ενώ ο Hunter [4.47] το 1989 και ο Amdjadi [4.48] το 1990 επιβεβαίωσαν πως είναι η καταλληλότερη για τυπικές εφαρμογές, με τον περιορισμό ότι δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο αριθμητικό μοντέλο στη διεπιφάνεια. Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα τα οποία είναι ότι η λανθάνουσα θερμότητα, η οποία απορροφάται και απορρίπτεται από το υλικό κατά την αλλαγή φάσης του, δεν αντιπροσωπεύεται πλήρως απ' τη μέθοδο και ότι παρατηρούνται θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κοντά στις οριακές συνθήκες. Η προσομοίωση του φαινομένου απαιτεί αρκετή ώρα απ' τον υπολογιστή εξαιτίας των μικρών χωρικών και χρονικών απαιτήσεων.

4.5.3.2 Μέθοδος Ενεργού Θερμοχωρητικότητας [4.49]

Η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας είναι μία ακόμη μέθοδος που δίνει τη δυνατότητα περιγραφής της μη-ισοθερμοκρασιακής αλλαγής φάσης ενός PCM και είναι η πιο εύχρηστη καθώς χρησιμοποιεί τη διαδικασία της συνηθισμένης αριθμητικής λύσης της εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι η θερμοχωρητικότητα περιγράφει την αποθήκευση αισθητής όσο και λανθάνουσας θερμότητας.

Κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, το μέγεθος της ενεργού θερμοχωρητικότητας $C_{p,eff}(T)$ είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και είναι ανάλογο τόσο του ποσού ενέργειας που αποθηκεύεται ή απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της αλλαγής φάσης, όσο και της ειδικής θερμότητας. Ωστόσο, είναι αντιστρόφως ανάλογο με το θερμοκρασιακό εύρος τήξης ή στερεοποίησης. Για τη δημιουργία της συνάρτησης ενεργού θερμοχωρητικότητας χρειάζονται κάποια χαρακτηριστικά του υλικού αλλαγής φάσης. Πρόκειται για τη θερμοκρασία τήξης T_l και στερεοποίησης T_s του υλικού αλλαγής φάσης, τις αντίστοιχες θερμοχωρητικότητές C_{pl} και C_{ps} του και τη θερμότητα αλλαγής φάσης. Μελετώντας την εξέλιξη των φάσεων ενός PCM (όταν ο μετασχηματισμός φάσης συμβαίνει σε ένα θερμοκρασιακό εύρος), η τιμή της ενεργούς θερμοχωρητικότητας κινείται, με βάση συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, στα παρακάτω πλαίσια:

$$C_{p,eff} = \begin{cases} \rho \cdot C_{ps}, T < T_s \\ \rho \cdot C_f + \frac{L}{T_l - T_s}, T_s \leq T \leq T_l \\ \rho \cdot C_{pl}, T > T_l \end{cases} \quad (4.5.7)$$

Η μέθοδος αυτή λοιπόν αντιμετωπίζει τη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης ως ειδική θερμότητα σε αισθητή μορφή σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος μεταβολής της φάσης. Επιπλέον καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της διεπιφάνειας στερεού-υγρού με την επίτευξη θερμοκρασιακής κατανομής. Η μέθοδος αυτή είναι εύκολη στην κατανόηση, επειδή αφορά μία εξαρτημένη μεταβλητή την "θερμοκρασία" και αυτό την καθιστά εύκολη και για προγραμματισμό. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι έχει δύσκολη εφαρμογή στις περιπτώσεις όπου το θερμοκρασιακό εύρος μεταβολής φάσης είναι μικρό και δεν ισχύει για τις περιπτώσεις όπου η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος της ενεργού θερμοχωρητικότητας χρησιμοποιείται, όταν υφίσταται ενδιαφέρον για μακροσκοπική μελέτη του φαινομένου της αλλαγής φάσης ενώ η μέθοδος ενθαλπίας χρησιμοποιείται όταν υφίσταται ενδιαφέρον για μικροσκοπική μελέτη.

4.5.3.3 Μέθοδος της θερμικής πηγής

Η μέθοδος της θερμικής πηγής είναι παρόμοια μέθοδος με αυτήν της ενθαλπίας. Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι η λανθάνουσα θερμότητα αντιμετωπίζεται ως μια εσωτερική πηγή θερμότητας. Δηλαδή, χρησιμοποιώντας την βασική εξίσωση της μεθόδου της ενθαλπίας, στη μέθοδο της θερμικής πηγής η συνολική ενθαλπία χωρίζεται στην ενθαλπία της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας αντίστοιχα, όπου η λανθάνουσα θερμότητα που απορροφά ή εκλύει το υλικό, λαμβάνεται ως όρος εσωτερικής πηγής θερμότητας. Η Εξίσωση 4.5.1 τότε γίνεται:

$$\rho \cdot C_{avg} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[k(\nabla T)] - \rho \cdot L \cdot \frac{\partial f_i}{\partial t} \quad (4.5.8)$$

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον Eyres [4.42] στα μέσα της δεκαετίας του 1940. Με την προσέγγιση αυτή, το ποσοστό του μίγματος στην υδαρή περιοχή (ποσοστού υγρού-στερεού) γραμμικοποιείται και η εξίσωση μπορεί να λυθεί επαναληπτικά βάσει της θερμοκρασίας. Το κλάσμα του μίγματος μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη βοηθητική εξίσωση [4.50]:

$$f_l = \begin{cases} 0, & T \leq T_m - \varepsilon \\ \frac{(T-T_s)}{(T_l-T_s)}, & T_m - \varepsilon < T < T_m + \varepsilon \\ 1, & T_m + \varepsilon \leq T \end{cases} \quad (4.5.9)$$

Η μέθοδος της θερμικής πηγής είναι πιο σύνθετη από τη μέθοδο της ενθαλπίας [4.45] αλλά δεν παρουσιάζει τα μειονεκτήματα της δεύτερης. Ο Heim [4.51] υιοθέτησε αυτή τη μέθοδο ως μια δεύτερη προσέγγιση στη μοντελοποίηση των θερμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή της αλλαγής φάσης, ειδικά για PCM που έχουν ενσωματωθεί σε ένα κτήριο.

Η μέθοδος θερμικής πηγής είναι εύκολη στην κατανόηση, επειδή διαχωρίζει και εξετάζει ξεχωριστά την λανθάνουσα από την αισθητή θερμότητα αλλά και γιατί αντιμετωπίζει τόσο την απότομη όσο και σταδιακή αλλαγή φάσης. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η έλλειψη ομαλότητας του θερμοκρασιακού προφίλ σε περιπτώσεις που υπάρχουν χονδροειδή πλέγματα και μεγάλα χρονικά βήματα πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχουν προβλήματα σύγκλισης και σφαλμάτων, όταν η τήξη συμβαίνει σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης.

4.5.4 Μορφές συσκευασίας των PCM

Η αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό και αντίστροφα, που υφίστανται τα PCM και κατ' επέκταση η ύπαρξη πιθανότητας διαρροής του τήγματος, καθιστά αναγκαία τη συσκευασία του PCM. Έτσι, η συσκευασία ενός PCM θα πρέπει να ανταποκρίνεται και να πληροί μία σειρά προϋποθέσεων. Οι πιο σημαντικές είναι οι εξής [4.52]:

- Να λειτουργεί ως εμπόδιο μεταξύ υλικού και περιβάλλοντος, ώστε να αποφεύγονται διάφορες επιπτώσεις από τυχόν αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών.
- Κάλυψη απαιτήσεων μηχανικής αντοχής, αντίστασης στη διάβρωση, θερμικής σταθερότητας και ελαστικότητας.
- Να παρέχει δομική σταθερότητα και ευκολία στο χειρισμό.
- Να χαρακτηρίζεται από μεγάλη θερμική αγωγιμότητα.
- Να έχει κατάλληλο μέγεθος, προκειμένου να μην παρουσιάζεται πρόβλημα κατά την μεταβολή όγκου του PCM.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι τοποθέτησης των PCM στις διάφορες εφαρμογές χρήσης τους. Οι πιο γνωστές είναι η ενσωμάτωση σε κάψουλες και τα σύνθετα υλικά. Τα PCM μπορούν να ενσωματωθούν σε δομικά υλικά και χωρίς να έχει προηγηθεί η συσκευασία-

τοποθέτησή τους σε κάψουλες. Έτσι υπάρχει και η μέθοδος της άμεσης ενσωμάτωσης και της ενσωμάτωσης με απορρόφηση [4.53].

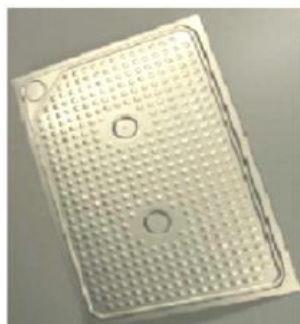
4.5.4.1. Ενσωμάτωση σε κάψουλες

Πολλοί μελετητές έχουν δείξει ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση των PCM σε κάψουλες και συγκεκριμένα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των πιθανών μορφών αυτών και την συμβατότητα των υλικών κατασκευής τους με τα περιεχόμενα PCM. Η ενσωμάτωση των PCM σε κάψουλες διακρίνεται στη μακροενσωμάτωση και στη μικροενσωμάτωση [4.54].

α) Μακροενσωμάτωση (macro-encapsulation)

Η μακροενσωμάτωση είναι η πιο συνηθισμένη μορφή συσκευασίας των PCM. Μία σημαντική ποσότητα PCM τοποθετείται εντός μιας διακριτής με γυμνό μάτι κάψουλας, με την ποσότητα του PCM ανά κάψουλα να κυμαίνεται από μερικά γραμμάρια έως και ένα κιλό και το σχήμα του δοχείου-κάψουλας να ποικίλλει. Έτσι, το δοχείο-κάψουλα μπορεί να είναι σε μορφή σωλήνα, σακούλας, ορθογώνιου πάνελ, πλάκας, σφαιρικό, ή κυλινδρικό. Τα πιο συνηθισμένα υλικά κατασκευής της κάψουλας είναι μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και ο ανοξείδωτος χάλυβας και τα πλαστικά, όπως το πολυπροπυλένιο και η πολυολεφίνη. Σε κάθε περίπτωση όμως, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή συνδυασμού κάψουλας-PCM, ώστε να αποφευχθούν τυχόν διαβρώσεις σε μεταλλικές κάψουλες ή αλλοιώσεις σε πλαστικές κάψουλες από την επαφή PCM και δοχείου [4.52].

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μακροενσωμάτωσης είναι η δυνατότητα ενθυλάκωσης του PCM τόσο σε υγρή όσο και σε αέρια φάση. Ακόμα, η μέθοδος αυτή μπορεί να συμβάλλει στην αποφυγή του φαινομένου διαχωρισμού φάσεων, στην αύξηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας και στην ενίσχυση της δομής του PCM [4.52]. Ωστόσο υπάρχουν και μειονεκτήματα όπως είναι η δυσκολία προστασίας τους από τυχόν καταστροφές από τρύπες με τρυπάνια στους τοίχους και καρφιά, το υψηλό κόστος τους, που οφείλεται στη δυσκολία ενσωμάτωσής τους στην κτηριακή δομή και η μειωμένη θερμική αγωγιμότητα που μπορεί να προκαλέσουν [4.54-4.55].

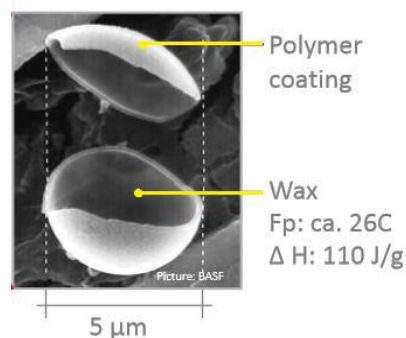


Εικόνα 4.5.6: Παράδειγμα μακροενσωμάτωσης.

β) Μικροενσωμάτωση (micro-encapsulation)

Κατά τη μικροενσωμάτωση, σωματίδια του PCM εσωκλείονται σε μία λεπτή και υψηλού μοριακού βάρους μεμβράνη από πολυμερές υλικό, σχηματίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο μία μικροκάψουλα διαμέτρου από μερικά μm έως κάποια mm . [4.55]. Η παραγωγή των PCM σε μικροκάψουλες μπορεί να γίνει είτε με φυσικές διεργασίες, όπως είναι η ξήρανση με ψεκασμό, είτε με χημικές διεργασίες. Οι μικροκάψουλες αυτές στη συνέχεια μπορούν να ενσωματωθούν σε οποιαδήποτε μήτρα, υπό την προϋπόθεση ότι τα υλικά τους είναι συμβατά μεταξύ τους. Οι παραφίνες είναι μια κατηγορία των PCM που μπορούν να εσωκλειστούν σε μικροκάψουλες των οποίων το κέλυφος μπορεί να αποτελείται από φορμαλδεΰδες ή πολυακρυλεστέρες [4.53].

Ανάλογα με την εφαρμογή οι μικροκάψουλες PCM μπορεί να είναι σε υγρή μορφή, αλλά και σε μορφή σκόνης. Τα πλεονεκτήματα της μικροενσωμάτωσης είναι ότι λόγω της μεγάλης αναλογίας επιφάνειας προς όγκο κάψουλας, ενισχύεται η μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον και ότι λόγω του περιορισμού του διαχωρισμού φάσεων, εξασφαλίζεται σταθερή καταπόνηση κατά την κυκλική φόρτιση. Επιπλέον, λόγω του μικρού μεγέθους της κάψουλας, αποφεύγεται πρακτικά η φθορά της κατά τη διάρκεια εργασιών που απαιτούν σφυρηλάτηση ή χρήση τρυπανιού σε διάφορα δομικά στοιχεία [4.54]. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα ενσωμάτωσης σε μικροκάψουλες πάσχει από χαμηλό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Η ακαμψία της μήτρας εμποδίζει τη μεταφορά μέσω συναγωγής και εξαναγκάζει τη μεταφορά αποκλειστικά με αγωγή. Τέλος, η μικροενσωμάτωση χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος σε σχέση με άλλες μορφές συσκευασίας και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μόνο σε εφαρμογές θερμικού ελέγχου [4.52].



Εικόνα 4.5.7: Ανοιγμένη μικροκάψουλα μέσα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

4.5.4.2 Σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από ένα PCM, όπως παραφίνη και τουλάχιστον ένα ακόμα υλικό υψηλής πυκνότητας, όπως το πολυαιθυλένιο-HDPE, το οποίο συμβάλλει στη βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων του PCM. Η δημιουργία των σύνθετων υλικών προκύπτει είτε με τη μέθοδο της άμεσης ενσωμάτωσης, είτε με τη μέθοδο απορρόφησης. Τα σύνθετα υλικά προσελκύουν ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον των ερευνητών, λόγω της μεγάλης ειδικής θερμότητας, της κατάλληλης θερμικής αγωγιμότητας, της ικανότητάς τους να διατηρούν το σχήμα του PCM σταθερό κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης του, καθώς και της καλής τους επίδοσης σε πολλαπλούς θερμικούς κύκλους [4.55].

4.5.4.3 Άμεση ενσωμάτωση

Κατά την άμεση ενσωμάτωση, που είναι η απλούστερη μέθοδος, το PCM προστίθεται σε υγρή μορφή ή με τη μορφή σκόνης σε δομικά υλικά, όπως ο γύψος και το σκυρόδεμα και αναμιγνύεται με αυτά κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους [4.55]. Η μέθοδος αυτή πλεονεκτεί ως προς το κόστος, δεδομένου ότι δεν απαιτεί τη χρήση κάποιου επιπρόσθετου εξοπλισμού. Ταυτόχρονα όμως, συγκεντρώνει δύο σοβαρά μειονεκτήματα, την αυξημένη πιθανότητα διαρροής της υγρής φάσης του PCM και τη μη συμβατότητα με κάποια υλικά κατασκευής, με τα οποία έρχεται σε επαφή [4.55].

4.5.4.4 Ενσωμάτωση με απορρόφηση

Στην τεχνολογία ενσωμάτωσης PCM με απορρόφηση, τα δομικά υλικά όπως ο γύψος, το τούβλο ή το σκυρόδεμα βυθίζονται σε τηγμένο PCM και μέσω των πόρων που φέρουν, το απορροφούν. Το μειονέκτημα της ενσωμάτωσης με απορρόφηση είναι και πάλι η πιθανότητα διαρροής του PCM από τους πόρους του δομικού υλικού [4.54].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [4.1] Α. Γ. Κορωναίος και Γ. Ι. Πουλάκος, Τεχνικά υλικά, τόμος 2, 2005.
- [4.2] Y.A. Çengel, A.J. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. McGraw Hill Higher Education 2011.
- [4.3] Ξ. Κακάτσιος, Μετάδοση Θερμότητας, Εκδόσεις Κλειδάριθμος 2002.
- [4.4] Τεχνική οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε .20701-1/2010, Β' έκδοση, Αθήνα 2012.
- [4.5] Μ.Θ. Πλυταριά, Διπλωματική εργασία: Παθητικά Συστήματα θέρμανσης και δροσισμού στα κτίρια, Αθήνα 2006.
- [4.6] http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria < accessed 2018>.
- [4.7] S. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part 1: Heat storage materials and techniques, 1996.
- [4.8] A. De Gracia, L.F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings, Energy and Buildings 2015;103:414-419.
- [4.9] G. Alva, L. Liu, X. Huang, G. Fang, Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;68:693-706.
- [4.10] S. Vyazovkin, N. Koga, C. Schick, Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry, Recent advances, techniques and applications, second edition, Elsevier 2018.
- [4.11] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, Introduction to heat transfer, New York: John Wiley and Sons Publishing Co., 1990.
- [4.12] S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran, Thermal energy storage technologies for sustainability, Systems Design, Assessment and Applications, Academic Press of Elsevier 2014.
- [4.13] H. O. Paksoy, Thermal energy storage for sustainable energy consumption-Fundamentals, case studies and design, Springer 2007.

- [4.14] I. Visa, Sustainable energy in the built environment-Steps towards Nzeb, Proceedings of the Conference for Sustainable energy (CSE), Springer 2014.
- [4.15] D. David, F. Kuznik και J.J. Roux, Numerical study of the influence of the convective heat transfer on the dynamical behavior of a phase change material wall, Applied Thermal Engineering 2011;31:3117-3124.
- [4.16] G.A. Lane, Macro-encapsulation of PCM [Report no. ORO/5117-8]. Midland. Michigan: Dow Chemical Company, 1978.
- [4.17] G.A. Lane, Solar Heat Storage: latent Heat Material. Technology. Florida: 1986 CRC Press.
- [4.18] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009;13:318–345.
- [4.19] V. Venkateswara Rao, R. Parameshwaran, V. Vinayaka Ram, PCM-mortar based construction materials for energy efficient buildings: A review on research trends, Energy and Buildings 2018;158:95–122.
- [4.20] D. Mackay, W.Y. Shiu, K.C. Ma, S.C. Lee, Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals, Volume I: Introduction and Hydrocarbons 2006 CRC Press.
- [4.21] A. Aoulmi, M. Bouroukba, R. Solimando, M. Rogalski, Thermodynamics of mixtures formed by polycyclic aromatic hydrocarbons with long chain alkanes, Fluid Phase Equilibria 1995;110:283-297.
- [4.22] V. Alexiades, A.D. Solomon, Mathematical modeling of melting and freezing process. Washington. DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
- [4.23] B. Charlsson, H. Stymme, G. Wattermark, An incongruent heat of fusion system $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ made congruent through modification of chemical composition of the system. Solar Energy 1979;23:333–50.
- [4.24] S. Furbo, Heat storage units using a salt hydrate as storage medium based on the extra water principle [Report no. 116]. Technical University of Denmark, 1982.

- [4.25] A. Abhat, D. Heine, M. Heinisch, NA. Malatidis, G. Neuer, Development of a modular heat exchanger with an integrated latent heat storage. Ger Minist Sci Technol Bonn 1981.
- [4.26] D. Buddhi, R. Sawhney, Proceedings on thermal energy storage and energy conversion; 1994.
- [4.27] P. Tatsidjodoung, N.L. Pierres, L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, Renew Sustain Energy 2013;18:327-349.
- [4.28] T.R. Whiffen, S.B. Riffat, A review of PCM technology for thermal energy storage in the built environment: Part I, International Journal of Low-Carbon Technologies 2013;8:147-158.
- [4.29] H. Mehling, LF. Cabeza, D. Mewes, F. Mayinger, Heat and Cold Storage with PCM: An Up-to-date Introduction into Basics and Applications, Springer 2008.
- [4.30] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, Applied Energy 2012;92:593-605.
- [4.31] J.A. Dean, The Analytical Chemistry Handbook, McGraw Hill, Inc. 1995.
- [4.32] D. Buddhi, R.L. Sawhney, P.N. Sehgal, A simplification of the differential thermal analysis method to determine the latent heat of fusion of phase change materials, J Phys D Appl Phys 1987;20:1601-1605.
- [4.33] H. Utschick, Anwendungen der thermischen Analyse: anorganische Chemie – organische Chemie – Polymerchemie – Anwendungstechniken. Landsberg: Ecomed Verlagsgesellschaft AG&Co 1996.
- [4.34] Z. Zhang, N. Zhang, J. Peng, Preparation and thermal energy storage properties of paraffin/expanded graphite composite phase change material, Applied Energy 2012;91:426-431.
- [4.35] W.F. Hemminger, H.K. Cammenga: Methoden der Thermischen Analyse (Anleitung für die chemische Laboratoriumspraxis), Springer-Verlag Berlin 1989.
- [4.36] Y. Zhang, Y. Jiang, A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials, Measur Sci Technol 1999;10:201-205.

- [4.37] H. Hong, S.K. Kim, Y.S. Kim, Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials, *Int J Refrig* 2004;27:360-366.
- [4.38] J.H. Peck, J-J. Kim, C. Kang, A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method, *Int J Refrig* 2006;29:1225-1232.
- [4.39] E.D. Kravvaritis, K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method, *Applied Energy* 2011;88:4459–4469.
- [4.40] A. Madad, T. Mouhib, A. Mouhsen, Phase Change Materials for Building Applications: A Thorough Review and New Perspectives, *Buildings* 2018;8:63.
- [4.41] A.F. Regin, S.C. Solanki και J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:2438–2458.
- [4.42] N. Eyres, D. Hartree, J. Ingham, R. Jackson, R. Sarjant, J. Wagstaff, The calculation of variable heat flow in solids *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences* 1946;240:1–57.
- [4.43] W.J. Minkowycz, E.M. Sparrow, J.Y. Murthy, *Handbook of Numerical Heat Transfer*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [4.44] V.R. Voller, M. Cross, Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1981;24:545–556.
- [4.45] H.C. Huang, A.S. Usmani, H-C. Huang, *Finite Element Analysis for Heat Transfer: Theory and Software*. Springer 1994.
- [4.46] Y. Dutil, D.R. Rousse, N.B. Salah, S. Lassue, L. Zalewski, A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15:112–130.
- [4.47] L.W. Hunter, J.R. Kuttler, The Enthalpy Method for Heat Conduction Problems with Moving Boundaries. *Journal of Heat Transfer (Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Series C); (United States)* 1989;111:2.

- [4.48] M. Amdjadi, B. Fabre, C. Meynadier, Résolution unidimensionnelle d'un problème de Stefan par une méthode à pas de temps variable. Application à une bille de chliarolithe, *Revue Générale de thermique France* 1990;339:129–134.
- [4.49] P. Lamberg, R. Lehtiniemi, A.M. Henell, Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage, *International Journal of Thermal Sciences* 2004;43:277-287.
- [4.50] C.R. Swaminathan, V.R. Voller, Towards a general numerical scheme for solidification systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1997;40: 2859–2868.
- [4.51] D. Heim, Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation, in: 9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada 2005.
- [4.52] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini, Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:2438-2458.
- [4.53] E. Rodriguez-Ubinas, L. Ruiz-Valero, S. Vega και J. Neila, Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses, *Energy and Buildings* 2012;50:49-62.
- [4.54] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, H. Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, *Building and Environment* 2007;42:2197-2209.
- [4.55] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy* 2012;92:593-605.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM) ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

5.1 Εισαγωγή

Ανάλογα τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών αλλαγής φάσης (PCM), υπάρχουν ευρείες εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς, όπως στο κέλυφος των κτηρίων, στην αποθήκευση θερμικής ενέργειας στις βιομηχανίες (TES), στη θερμική διαχείριση μπαταριών και στη ρύθμιση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση των PCM σε κατασκευές κτηρίων για τη βελτίωση της θερμικής άνεσης, εξισορροπώντας τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, έχει δημιουργήσει μεγάλο ενδιαφέρον. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, το υλικό αλλάζει τη φάση από στερεή σε υγρή. Όταν η αντίδραση είναι ενδοθερμική, το PCM απορροφά θερμότητα. Ομοίως, όταν μειώνεται η θερμοκρασία, το υλικό αλλάζει τη φάση του από υγρή σε στερεή. Όταν η αντίδραση είναι εξωθερμική, το PCM διοχετεύει θερμότητα.

Η ενσωμάτωση του PCM στο εξωτερικό περίβλημα των κτηρίων και στον εξοπλισμό των κτηριακών εγκαταστάσεων, είναι τρόποι για να βελτιωθεί η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας και στη συνέχεια να εξορθολογιστεί η χρήση ανανεώσιμων και μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

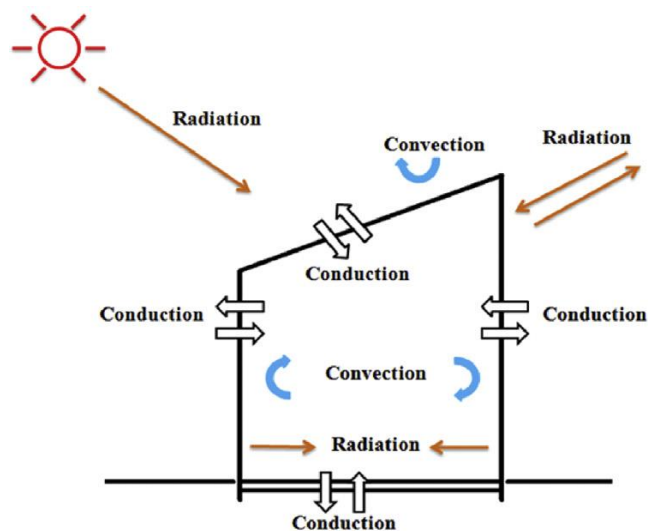
5.2 Χρήση των PCM στο κέλυφος των κτηρίων

Θερμικό κέρδος χώρου είναι ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα εισέρχεται ή παράγεται μέσα στο χώρο μια ορισμένη χρονική στιγμή. Το θερμικό κέρδος προέρχεται από [5.1]:

- Ηλιακή ακτινοβολία μέσω διαφανών επιφανειών
- Αγωγή θερμότητας δια των εξωτερικών τοίχων και ορόφων
- Αγωγή θερμότητας δια των εσωτερικών χωρισμάτων (τοίχοι, δάπεδα, οροφές)
- Παραγωγή θερμότητας μέσα στο χώρο (άνθρωποι, φωτισμός, συσκευές)

Έτσι λοιπόν, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.1, η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας σε ένα κτήριο είναι αρκετά πολύπλοκη γιατί υφίσταται σε πολλές εσωτερικές και εξωτερικές διακυμάνσεις. Οι εξωτερικές διακυμάνσεις οφείλονται στον τοπικό καιρό. Οι εσωτερικές διακυμάνσεις προέρχονται από την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο κτήριο και τα εσωτερικά φορτία. Ένα κτήριο με υψηλή ενεργειακή απόδοση πρέπει να εξασφαλίσει τη θερμική άνεση των ενοίκων με ελάχιστη χρήση ενεργειακού

εξοπλισμού. [5.2]. Έτσι λοιπόν, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας στα κτήρια είναι ο παράγοντας κλειδί [5.3-5.4], που προάγει τις εφαρμογές των PCM.



Εικόνα 5.2.1: Μεταφορά θερμότητας γύρω από το κτήριο [5.5].

Στα παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας δε χρησιμοποιούνται μηχανικά μέσα για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας. Σ' αυτά, τα PCM χρησιμοποιούνται στο κτηριακό κέλυφος όπως σε τοίχους, οροφές και δάπεδα, αυξάνοντας τη θερμική μάζα του κτηρίου, η οποία όχι μόνο μπορεί να μειώσει την ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής, αλλά μπορεί επίσης να μειώσει τις σχετικά μεγάλες εσωτερικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

5.2.1 PCM σε τοίχους

Η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτηρίου επιτυγχάνεται με τη χρήση γυψοσανίδων και PCM. Οι γυψοσανίδες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σε κτήρια ελαφριάς κατασκευής τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμική μάζα και ως εκ τούτου στο εσωτερικό τους υφίστανται πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις απ' ότι στο εσωτερικό κτηρίων βαριάς κατασκευής. Η ενίσχυση του κτηριακού κελύφους με γυψοσανίδες που περιέχουν υλικά αλλαγής φάσης βοηθά στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτηρίου. Πρώτα, ο Schossig [5.6] διερεύνησε την απόδοση δύο δοκιμαστικών χώρων με ελαφριά κατασκευή που αποτελούνταν ο πρώτος από γυψοσανίδα τοποθετημένη σε ξύλινες σχάρες και μόνωση για πρόσοψη, και ο δεύτερος από τοίχο με PCM και επίχρισμα για πρόσοψη. Παρόλο που τα δεδομένα που αφορούν τη θερμότητα δείχνουν τη δυνατότητα των PCM να

μειώσουν τη ζήτηση ψύξης και να αυξήσουν την άνεση στα ελαφριά κτήρια, είναι επίσης απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι η αποθηκευμένη θερμότητα μπορεί να αποφορτιστεί με επαρκή εξαερισμό έτσι ώστε η εσωτερική θερμική άνεση να μπορεί να βελτιωθεί αποτελεσματικά. Στη συνέχεια, παρόμοια πειραματική μελέτη για την επίδραση των PCM στη μείωση της θερμοκρασίας χώρου πραγματοποιήθηκε από τον Voelker [5.7]. Επίσης οι Behzadi και Farid [5.8] εξέτασαν δύο δωμάτια. Το δωμάτιο αναφοράς είχε εσωτερικούς τοίχους και οροφή που καλύπτονταν από γυψοσανίδες, ενώ το δεύτερο όμοιο δωμάτιο είχε γυψοσανίδες εμποτισμένες με PCM στους εσωτερικούς τοίχους και στην οροφή. Αποδείχθηκε ότι, με τη χρήση των γυψοσανίδων PCM, η καθημερινή διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας μειώθηκε κατά περίπου 4°C σε μια τυπική καλοκαιρινή μέρα, η εξοικονόμηση ενέργειας που απαιτείται για τον κλιματισμό (A/C) έως και 34.5%, ενώ η εξοικονόμηση ενέργειας το χειμώνα για θέρμανση ήταν 21% σε εσωτερική θερμοκρασία 20°C.

Η ενεργειακή απόδοση ενός κτηρίου βελτιστοποιείται επίσης με τη χρήση PCM-πάνελ. Τα PCM-πάνελ είναι θερμικά αγωγικά δοχεία εντός των οποίων υπάρχει PCM και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παρόμοιες εφαρμογές με τις γυψοσανίδες PCM. Οι Kuznik et al [5.9] διερεύνησαν ένα πάνελ PCM. Οι επιδράσεις του PCM διερευνήθηκαν για τρεις περιπτώσεις: καλοκαιρινή μέρα, χειμερινή μέρα και ανοιξιιάτικη μέρα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία του αέρα στην αίθουσα με τα PCM μειώθηκε μέχρι και 4.2°C και έτσι η βελτίωση της θερμικής άνεσης ήταν πιο σημαντική. Στη συνέχεια, ένα δώροφο τυπικό οικογενειακό σπίτι εξοπλισμένο με τοίχους PCM χτίστηκε από τους Mandilaras et al. [5.10] και το αποτέλεσμα ήταν ότι η χρήση των PCM κατάφερε επιτυχώς να μειώσει τα ψυκτικά φορτία της οικίας κατά ένα μέσο όρο 22%.

Υλικά κατασκευής με ενσωματωμένα PCM προορίζονται να αυξήσουν την ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας, να επιτρέψουν τη σταθεροποίηση της εσωτερικής θερμοκρασίας της επιφάνειας των κτηρίων, επηρεάζοντας την αίσθηση της θερμικής άνεσης και τη σταθεροποίηση των εσωτερικών θερμοκρασιών περιβάλλοντος. Οι Hawes et al. [5.11], μελετώντας τη θερμική απόδοση των PCM σε διαφορετικούς τύπους σκυροδέματος, ανέφεραν ότι η τροποποίηση του σκυροδέματος μέσω διαφόρων τεχνικών ενσωμάτωσης PCM σε αυτό, συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στη θερμοχωρητικότητα. Επιπλέον, ένα νέο καινοτόμο σκυρόδεμα με PCM διερευνήθηκε

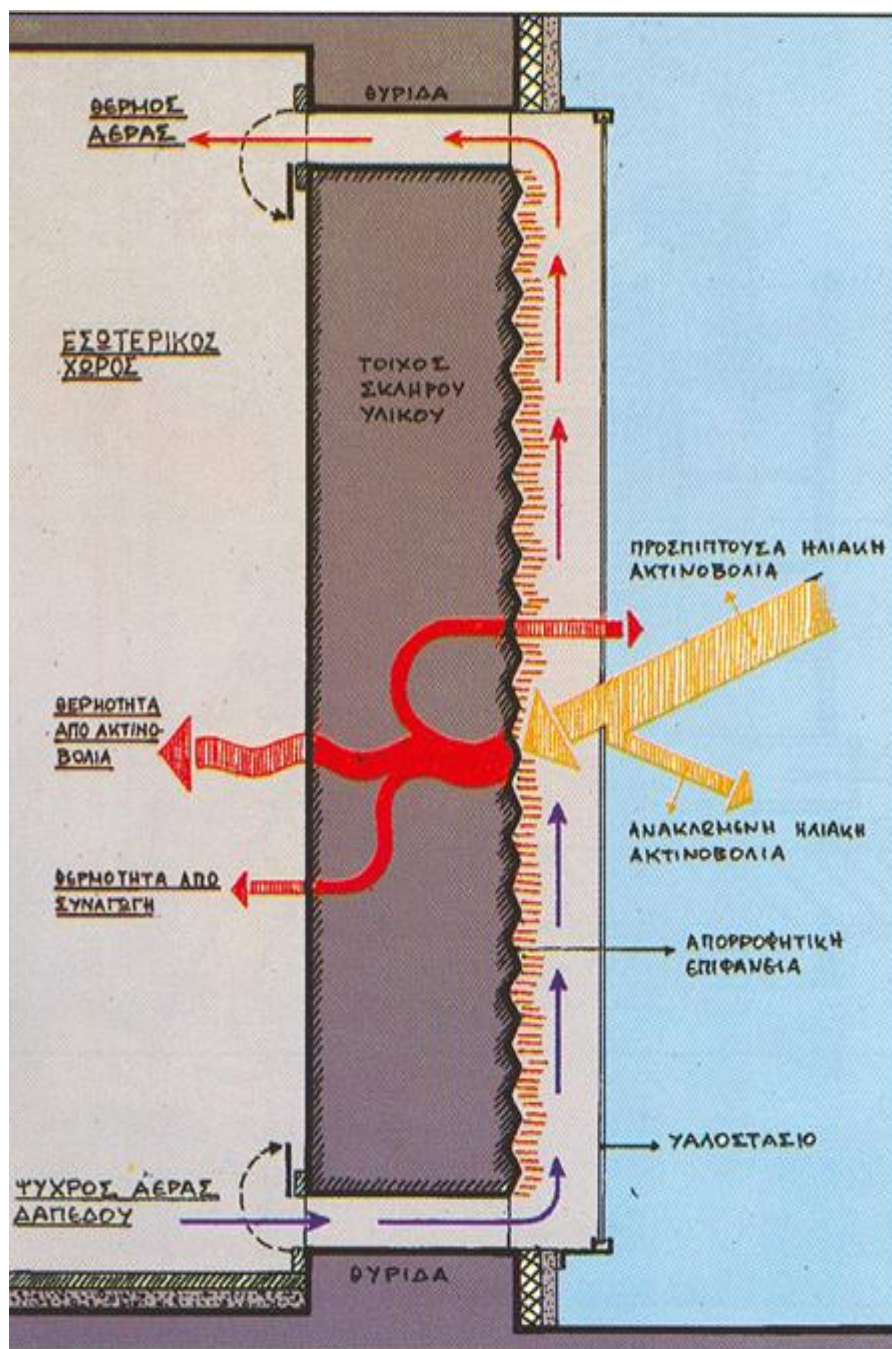
από τον Cabeza [5.12]. Η σύγκρισή του με συμβατικό σκυρόδεμα χωρίς PCM έδειξε ότι το PCM οδήγησε σε βελτιωμένη θερμική αδράνεια καθώς και χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες.

Στη συνέχεια, η ενσωμάτωση των PCM σε τούβλα γίνεται είτε υπό μορφή σφαιρικής κάψουλας, είτε υπό μορφή κυλινδρικών σωλήνων. Οι Zhang et al. [5.13] χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο θερμικής αγωγιμότητας, αξιολόγησαν τη θερμική απόκριση ενός τοίχου από τούβλα με PCM κάτω από συνθήκες κυμαινόμενων εξωτερικών θερμοκρασιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η θερμοχωρητικότητα του τοίχου από τούβλα με PCM ήταν υψηλότερη σε σχέση με έναν τοίχο από συμβατικά τούβλα. Οι Lai και Chiang [5.13] ασχολήθηκαν με την ενσωμάτωση PCM σε κούφια θερμομονωτικά τούβλα και ανακάλυψαν ότι τα τούβλα με PCM προσέφεραν καλύτερο αποτέλεσμα μόνωσης κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν εξετίθεντο σε ηλιακή ακτινοβολία.

Ένα άλλο παθητικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας με PCM είναι οι ηλιακοί τοίχοι. Ουσιαστικά πρόκειται για τοίχους Trombe, των οποίων η λιθοδομή έχει αντικατασταθεί από PCM. Το σύστημα του κλασικού τοίχου Trombe (εικόνα 5.2.2) αποτελείται από ένα τοίχο από μπετόν, πάχους 30-40 cm, βαμμένο σε σκούρο χρώμα στην εξωτερική του πλευρά, που συνδυάζεται με μια γυάλινη επιφάνεια σε απόσταση 3 cm περίπου. Στο επάνω και κάτω μέρος του τοίχου υπάρχουν θυρίδες, σ' όλο το μήκος, που διευκολύνουν την κίνηση του αέρα. Η λειτουργία του συστήματος βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοσιφωνισμού και πραγματοποιείται με την κυκλοφορία του αέρα στο χώρο ανάμεσα στο γυαλί και τον τοίχο και μέσα από τις θυρίδες, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας [5.14]. Πιο συγκεκριμένα:

- στη διάρκεια της ημέρας, όταν ο ήλιος προσπίπτει στο γυαλί, θερμαίνει τον αέρα που βρίσκεται στο χώρο ανάμεσα στο τζάμι και στον τοίχο. Ο θερμός αέρας κινείται προς τα πάνω και μέσα από την θυρίδα μπαίνει στον εσωτερικό χώρο. Ταυτόχρονα ψυχρότερος αέρας από τον εσωτερικό χώρο, μπαίνει από την κάτω θυρίδα και αντικαθιστά το κενό που δημιουργήθηκε.
- στη διάρκεια της νύχτας η λειτουργία προφανώς αντιστρέφεται. Οι δύο θυρίδες κλείνουν, πάνω και κάτω, και η θέρμανση του χώρου επιτυγχάνεται με την ακτινοβολία της αποθηκευμένης θερμότητας στον τοίχο.

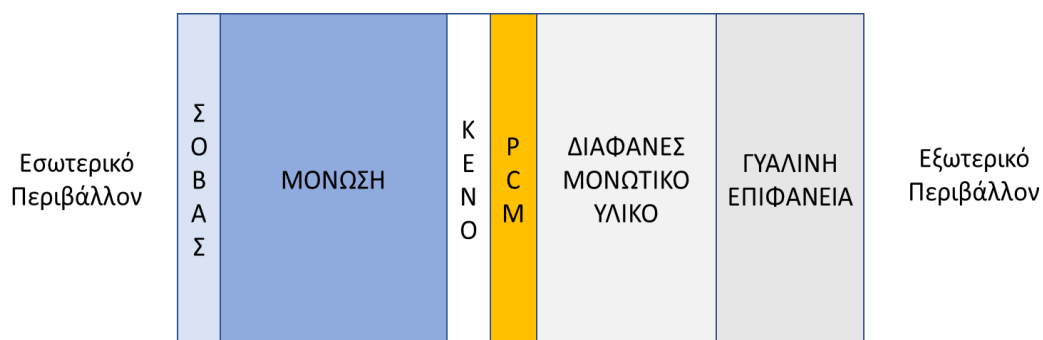
Το καλοκαίρι η λειτουργία του τοίχου αντιστρέφεται. Η επάνω θυρίδα κλείνει, ενώ ταυτόχρονα ανοίγει ένα τμήμα του υαλοστασίου στο επάνω μέρος (φεγγίτης), έτσι ώστε με το φαινόμενο της «καμινάδας» να απομακρύνεται ο ζεστός αέρας προς τα έξω.



Εικόνα 5.2.2: Σχηματική παράσταση τοίχου Trombe [5.15].

Η λειτουργία του τοίχου Trombe βασίζεται στην αξιοποίηση της αισθητής θερμότητας. Πολλοί μελετητές πρότειναν την τροποποίηση των τοίχων Trombe μέσω της ενσωμάτωσης υλικών αλλαγής φάσης, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη

ενεργειακή αποθήκευση ανά μονάδα μάζας, δεδομένου ότι μέσω των PCM αξιοποιείται και η λανθάνουσα θερμότητα. Έτσι, προέκυψαν οι ηλιακοί τοίχοι που αποτελούνται από έξι στρώματα. Ξεκινώντας από την εξωτερική του πλευρά, ο ηλιακός τοίχος φέρει μία γυάλινη επιφάνεια, η οποία ακολουθείται από διαφανές μονωτικό υλικό. Τα δύο αυτά στρώματα επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος να διέλθει, αποτρέποντας συγχρόνως τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Το τρίτο στρώμα είναι το υλικό αλλαγής φάσης, το οποίο βρίσκεται εντός ενός διαφανούς πλαστικού δοχείου από πολυεστέρα και απορροφά κυρίως λανθάνουσα θερμότητα. Ακολουθεί ένα διάκενο από το οποίο διέρχεται και θερμαίνεται ο αέρας για τον αερισμό και οδηγείται στο χώρο. Τέλος, στην εσωτερική πλέον πλευρά του τοίχου συναντάται η μόνωση και κατόπιν ο σοβάς. Τα PCM που ενσωματώνονται συνήθως στους τοίχους Trombe είναι τα ένυδρα άλατα, ενώ πολλές φορές χρησιμοποιούνται ειδικά μεταλλικά πρόσθετα που ενισχύουν τη συνολική αγωγιμότητα και απόδοση [5.14].



Εικόνα 5.2.3: Εσωτερική δομή ηλιακού τοίχου.

Οι Ghoneim et al. [5.16] χρησιμοποίησαν, ως PCM, δεκαένυδρο θειικό νάτριο (σημείο τήξης 32°C) σε ένα τοίχο Trombe νοτίου προσανατολισμού, ενώ διαπίστωσαν επίσης, πως ο τοίχος Trombe με PCM μικρότερου πάχους παρέχει πιο αποτελεσματική αποθήκευση θερμικής ενέργειας συγκριτικά με έναν κοινό πλίνθινο τοίχο.

Σε προηγούμενες μελέτες, τα PCM τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές θέσεις προς το εσωτερικό περιβάλλον, όπως δίπλα στην εσωτερική όψη της γυψοσανίδας [5.6,5.8], κοντά στην εσωτερική επιφάνεια του τοιχώματος [5.9-5.10] ή μέσα στην κοιλότητα μόνωσης του εξωτερικού τοιχώματος [5.12,5.17]. Αυτό συμβαίνει επειδή, τα PCM έχουν τη δική τους κλίμακα θερμοκρασίας τήξης, τα προφίλ θερμοκρασίας διαμέσου των τοίχων διαφέρουν και τα PCM επιδεικνύουν διαφορετικούς θερμικούς κύκλους όταν τοποθετούνται σε διαφορετικές θέσεις εντός των τοιχωμάτων. Ωστόσο, καμία από

τις μελέτες δεν εξέτασε τις οικονομικές αποδόσεις διερευνώντας πειραματικά και αριθμητικά το εσωτερικό θερμικό περιβάλλον. Μόνο οι Castell et al. [5.17], έδωσαν προσοχή στις οικονομικές και περιβαλλοντικές επιδράσεις μετά τη χρήση των PCM στο περιβάλλον.

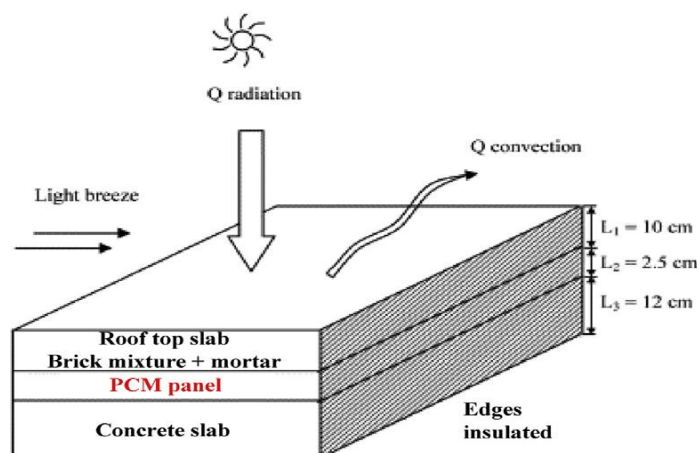
5.2.2 PCM σε οροφές

Οι οροφές λαμβάνουν την πιο έντονη ηλιακή ακτινοβολία μεταξύ όλων των επιφανειών ενός κτηρίου. Το ηλιακό θερμικό κέρδος μέσω της οροφής συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στο θερμικό φορτίο του κτηρίου [5.18]. Στις τροπικές και μισοτροπικές περιοχές, όπου απαιτείται ψύξη των κτηρίων σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, οι παθητικές μέθοδοι για τη μείωση του θερμικού κέρδους μέσω της οροφής μπορούν να παράσχουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας [5.19]. Η ικανότητα των PCM, όταν περιλαμβάνονται στην οροφή ενός κτηρίου, να βελτιώνουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης σε εσωτερικούς χώρους και να μειώνουν τη ζήτηση των ψυκτικών φορτίων είναι ευρέως γνωστή [5.20]. Ο στόχος της ενσωμάτωσης των PCM στη δομή της οροφής είναι η αξιοποίηση της υψηλής λανθάνουσας θερμότητας για τη μείωση του θερμικού κέρδους κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής που απαιτούν υψηλή κατανάλωση ενέργειας, απορροφώντας την εισερχόμενη ενέργεια μέσω της διαδικασίας τήξης στην οροφή πριν φτάσει στον εσωτερικό χώρο.

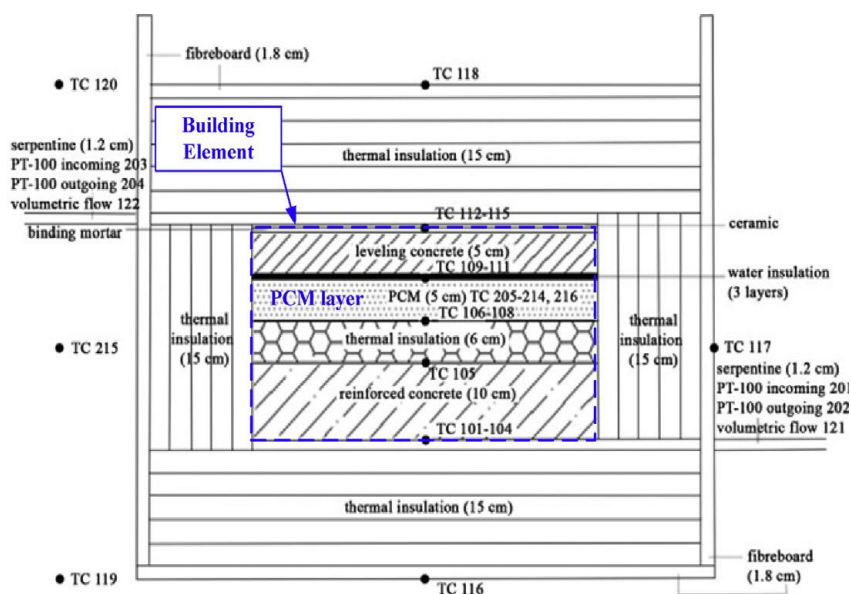
Η αποτελεσματικότητα του PCM ενσωματωμένου με γυψοσανίδα ως πάνελ οροφής σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας ενός κτηρίου διερευνήθηκε από τους Yahay et al. [5.21]. Αποδείχθηκε ότι η εφαρμογή ενσωματωμένου PCM στην οροφή θα μπορούσε να μειώσει αποτελεσματικά την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, η θερμική αποτελεσματικότητα της οροφής ενός κτηρίου με PCM μελετήθηκε αριθμητικά από τους Alawadhi et al. [5.22].

Τα πάνελ οροφής με PCM έχει προσελκύσει επίσης την προσοχή των ερευνητών [5.23]. Οι Pasupathy et al. [5.24] μελέτησαν τη θερμική απόδοση ενός ανόργανου εύτηκτου PCM στην οροφή μιας κατοικίας όπως στην εικόνα 5.2.4. Δύο όμοιες αίθουσες δοκιμών κατασκευάστηκαν για να μελετήσουν την επίδραση του PCM στην οροφή του κτηρίου. Οι Tokuc et al. [5.25] ανέλυσαν πειραματικά και αριθμητικά ένα στρώμα PCM σε οροφή όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.5. Διαπιστώθηκε ότι ένα PCM πάχους 2 cm ήταν κατάλληλο για χρήση σε επίπεδες οροφές στην Κωνσταντινούπολη. Ωστόσο, οι

πειραματικές μελέτες των Pasupathy και Tokuc έγιναν σε εργαστήριο και όχι σε πραγματικό κτήριο γιατί είναι δύσκολο να ελεγχθούν τα αποτελέσματα της πολλαπλής στρώσης PCM στην απόδοση εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα πραγματικό κτήριο, λόγω των δυσκολιών σχεδιασμού, εγκατάστασης και λειτουργίας. Στη συνέχεια, οι μελετητές αρχίζουν να το ερευνούν αριθμητικά.

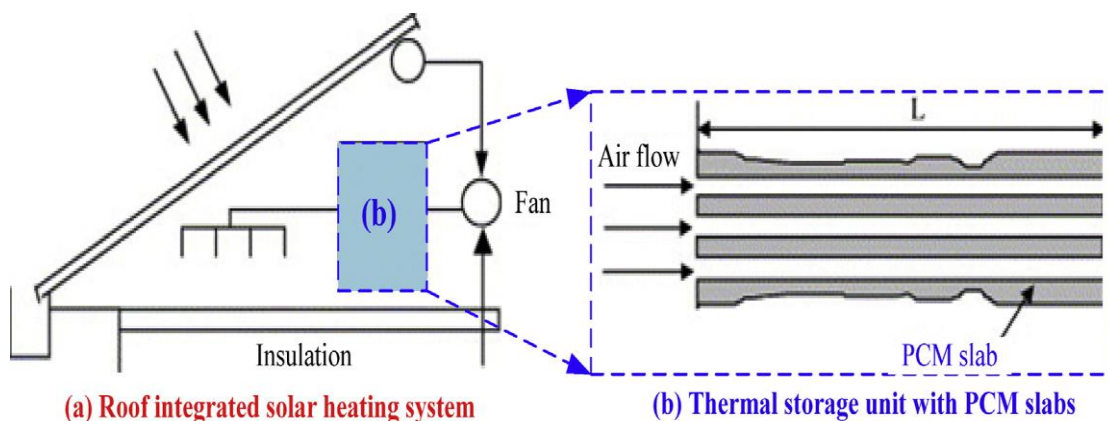


Εικόνα 5.2.4: Τοποθέτηση ενός πάνελ PCM σε πολυστρωματική οροφή [5.24].



Εικόνα 5.2.5: Πειραματικό κουτί με PCM των Tokuc et al [5.25].

Γνωρίζουμε ότι η ηλιακή ενέργεια δε δημιουργεί ρύπους, είναι ανανεώσιμη και δεν περιορίζεται οπότε έχει γίνει πολύ δημοφιλής και εφαρμόζεται στον τομέα των κτηρίων για εξοικονόμηση ενέργειας. Ο Saman [5.26] σχεδίασε ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης στην οροφή ενός κτηρίου με πλάκες PCM όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2.6.



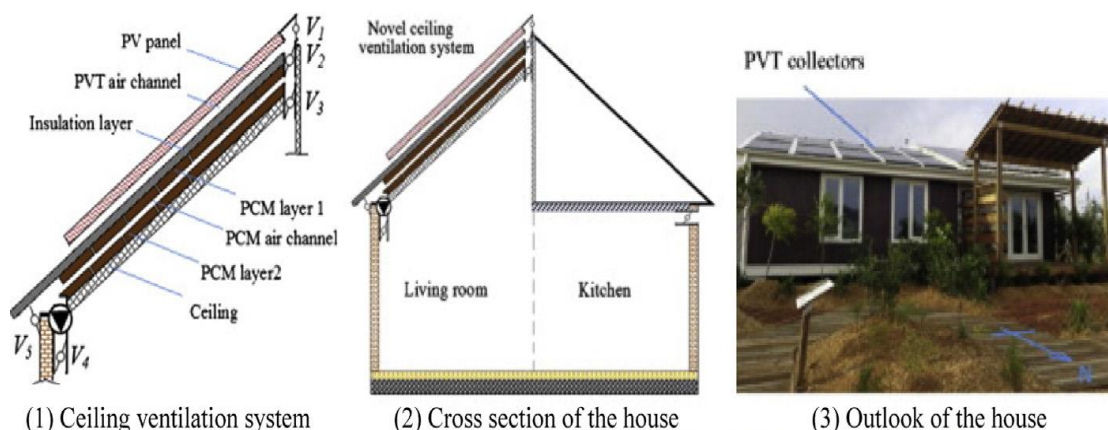
Εικόνα 5.2.6: Ενσωματωμένο ηλιακό σύστημα σε οροφή με μονάδα αποθήκευσης ενέργειας (PCM) [5.26].

Μια άλλη τεχνολογία ηλιακής ενέργειας, σε συνδυασμό με τα PCM που χρησιμοποιείται σε οροφές είναι η φωτοβολταϊκή (PV) τεχνολογία. Όπως αναφέρθηκε από τους Κοσόνυ et al. [5.27], αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί άμορφα στρώματα πυριτίου PV όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.7. Το αποτέλεσμα ήταν 30% μείωση των θερμικών φορτίων και 50% μείωση των ψυκτικών φορτίων. Επίσης, ένα σύστημα εξαερισμού οροφής με θερμοφωτοβολταϊκούς συλλέκτες (PVT) και PCM έχει σχεδιαστεί όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.8 [5.28]. Σε χειμερινές συνθήκες, το προτεινόμενο σύστημα θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την εσωτερική θερμική άνεση παθητικών κτηρίων χωρίς τη χρήση συστημάτων κλιματισμού με μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας αέρα 23°C.

Συμπερασματικά, η οροφή με PCM και τα συστήματα οροφής PV-PCM και συστήματα εξαερισμού οροφής PVT-PCM θα μπορούσαν να βελτιώσουν αποτελεσματικά την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου. Ωστόσο, είναι δύσκολο να ελεγχθούν με ακρίβεια αυτά τα περίπλοκα συστήματα. Επίσης, το αυξανόμενο αρχικό κόστος περιορίζει τις ευρείες εφαρμογές τους.



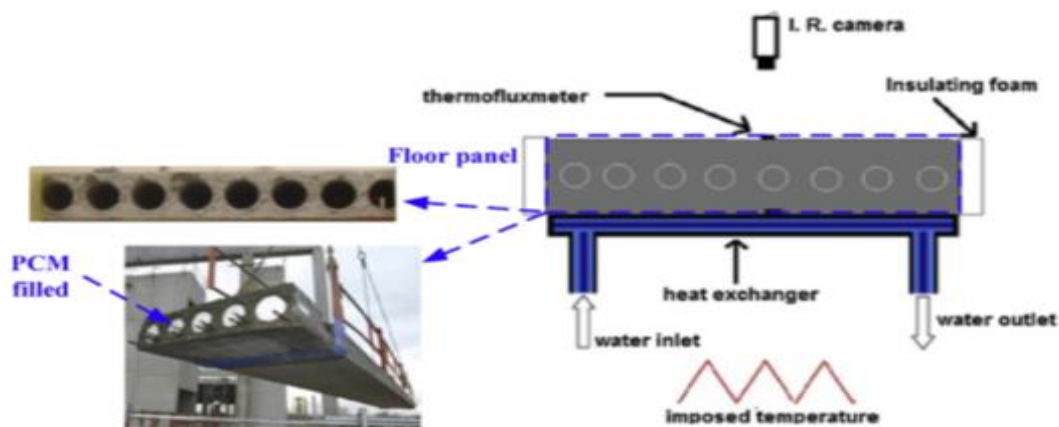
Εικόνα 5.2.7: Σύστημα PV-PCM οροφής [5.27].



Εικόνα 5.2.8: Σύστημα εξαερισμού οροφής PVT-PCM [5.28].

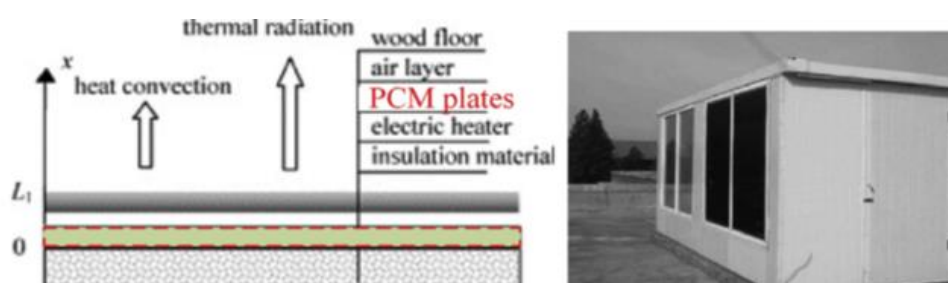
5.2.3 PCM σε δάπεδο

Η εφαρμογή των PCM σε δομικά στοιχεία επιτρέπει τη βελτίωση της θερμικής τους απόδοσης, τη μείωση των εσωτερικών θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και τη βελτίωση της εσωτερικής θερμικής άνεσης. Όσον αφορά τις εφαρμογές σε δάπεδο, έχει κατασκευαστεί και χρησιμοποιηθεί για πρώτη φορά PCM σε σκυρόδεμα [5.29] που αποθήκευε θερμότητα και απελευθεωνόταν σε μέτρια θαλάσσια κλίματα το βράδυ και νωρίς το πρωί με σκοπό να μειώσει την ανάγκη για θέρμανση στα σπίτια. Η εφαρμογή του PCM στο σκυρόδεμα οδήγησε σε μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών δαπέδου έως $16 \pm 2\%$ και αύξηση των ελάχιστων θερμοκρασιών έως $7 \pm 3\%$. Στη συνέχεια, οι Royon et al. [5.30-5.31] ενσωμάτωσαν ένα πάνελ από σκυρόδεμα με PCM όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.9. Έτσι, παρατηρήθηκε αύξηση της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύτηκε για αυτό το νέο πάτωμα.



Εικόνα 5.2.9: Κατασκευή ενός τσιμεντένιου δαπέδου με PCM [5.30].

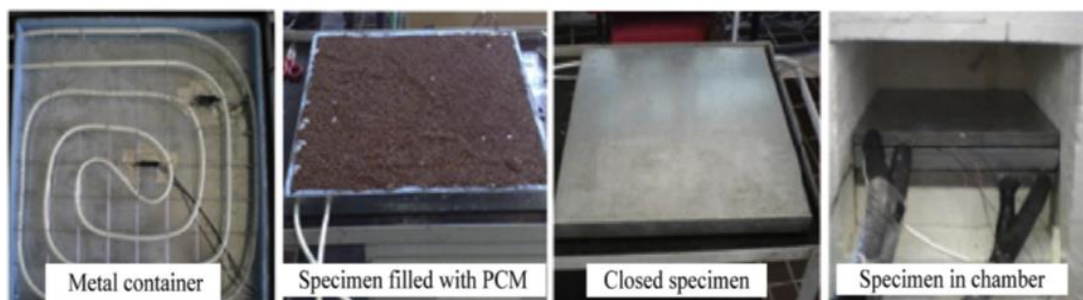
Το τιμειντένιο δάπεδο με PCM έχει τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους, της εύκολης εγκατάστασης, τη λίγη επίδραση στη δομή, και τον εύκολο έλεγχο στην παραγωγή. Ωστόσο, η πηγή ενέργειας για αυτό είναι ακόμα περιορισμένη, χάρη στη λήψη ενέργειας από την υψηλή θερμοκρασία αέρα του εσωτερικού χώρου. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και διερευνήθηκε ένα δάπεδο με PCM σε συνδυασμό με σύστημα θέρμανσης όπου οι πηγές θέρμανσης είναι το ηλεκτρικό ρεύμα ή/και το ζεστό νερό. Για παράδειγμα, οι Xu et al. [5.32] διερεύνησαν τη θερμική απόδοση ενός ενδοδαπέδιου ηλεκτρικού συστήματος θέρμανσης με πλάκες PCM σε μια πειραματική κατοικία, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.10. Διαπίστωσαν ότι η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα ήταν σταθερή και η ενέργεια από το ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης εξοικονομείτο με την αποθήκευση του στις πλάκες του PCM.



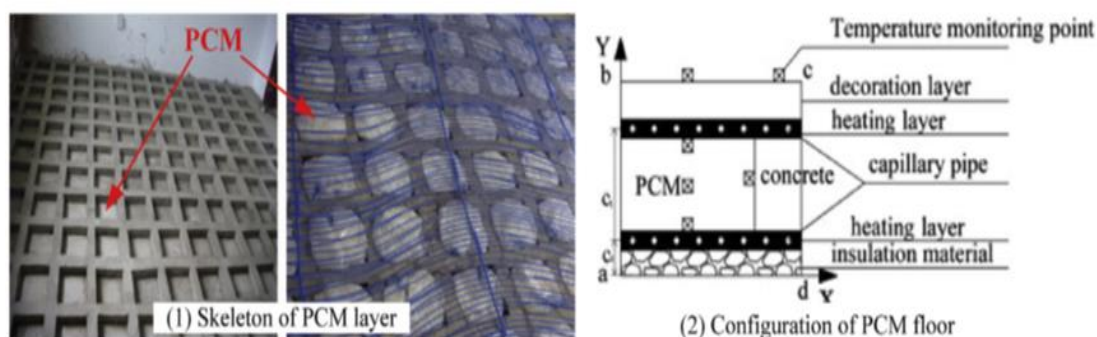
Εικόνα 5.2.10: Ενδοδαπέδιο ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης με πλάκες PCM και το πειραματικό σπίτι [5.36].

Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν οι Ansuini et al. [5.37] που χρησιμοποίησαν ένα πρωτότυπο ελαφρύ ακτινοβόλο δάπεδο με σωλήνες και ένα ενσωματωμένο στρώμα PCM. Η εικόνα 5.2.11 δείχνει το δείγμα δαπέδου τους. Ένα νέο δάπεδο PCM διερευνήθηκε επίσης από τους Huang et al. [5.38], όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2.12, αποκαλύπτοντας ότι το νέο υπόστρωμα PCM ήταν σε θέση να απελευθερώσει θερμότητα 37.677 kJ για 16 ώρες στην περίοδο που δε λειτουργούσε η αντλία σε χώρο 11.02 m². Επίσης, ένα νέο σύστημα διπλού στρώματος ακτινοβόλου δαπέδου με οργανικά PCM προτάθηκε και δοκιμάστηκε από τους Xia et al. [5.39]. Τα πειράματα έδειξαν ότι το σύστημα ακτινοβόλου δαπέδου διπλής στρώσης με PCM θα μπορούσε να ικανοποιήσει την ανάγκη για θέρμανση των χρηστών. Οι Mazo et al. [5.40] ερευνήσαν ένα μοντέλο που προσομοίαζε ένα σύστημα θέρμανσης στο δάπεδο με PCM το οποίο τροφοδοτούνταν από αντλία θερμότητας μειώνοντας έτσι το κόστος ηλεκτρικής

κατανάλωσης. Τέλος οι Mays et al. [5.41] μελέτησαν την επίδραση που είχε ένα ενσωματωμένο PCM σε ηλεκτρικό ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης.



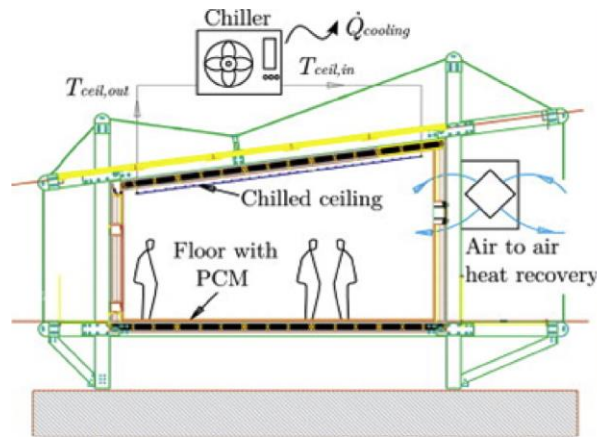
Εικόνα 5.2.11: Δείγμα δαπέδου με PCM [5.37].



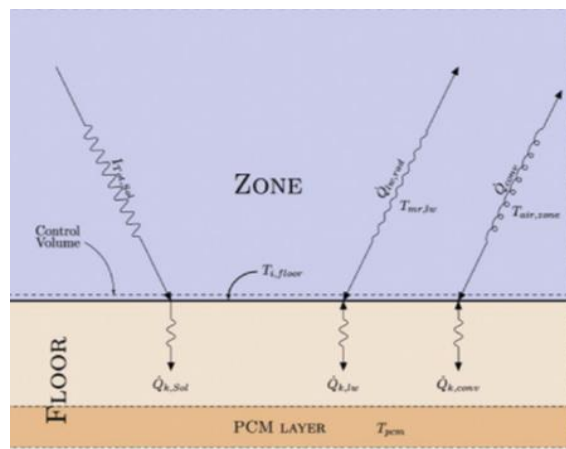
Εικόνα 5.2.12: Διαμόρφωση του νέου δαπέδου με PCM [5.38].

Μια άλλη εφαρμογή που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον των ερευνητών είναι ο συνδυασμός ενός PCM ενσωματωμένου σε δάπεδο με μια ψυχόμενη οροφή. Οι Belmonte et al. [5.42] ανέφεραν μια αριθμητική μελέτη σχετικά με το PCM που ενσωματώθηκε στο πάτωμα και με ένα ακτινοβολούμενο σύστημα οροφής για την απελευθέρωση ενέργειας. Η εικόνα 5.2.13 δείχνει τη δομή του συστήματος και η εικόνα 5.2.14 την ισορροπία θερμότητας στην επιφάνεια του δαπέδου. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι όταν συνοδεύεται από σύστημα ανάκτησης θερμότητας αέρα-αέρα, αυτή η διαμόρφωση θα μπορούσε να μειώσει τη ζήτηση για ψύξη και την κατανάλωση ενέργειας περισσότερο από 50%. Σύμφωνα με τη μελέτη θερμικής άνεσης, το σύστημα αυτό θα πρέπει να υποστεί περαιτέρω διερεύνηση. Συνοπτικά, οι μελέτες για το δάπεδο με PCM επικεντρώνονται σε δύο περιπτώσεις:

- ενσωμάτωση των PCM σε υλικά δαπέδου ή πλάκες PCM ως στρώμα στην κατασκευή δαπέδου και
- συνδυασμός PCM με σύστημα θέρμανσης δαπέδου.



Εικόνα 5.2.13: Δομή συστήματος [5.42].



Εικόνα 5.2.14: Ισορροπία θερμότητας στην επιφάνεια του εδάφους [5.42].

5.3 Χρήση των PCM σε ενεργητικά συστήματα των κτηρίων

Εκτός από την ενσωμάτωση των PCM στο κέλυφος του κτηρίου, που βελτιώνει το επίπεδο θερμικής άνεσης σε εσωτερικούς χώρους και εξοικονομεί ενέργεια, τα PCM μπορούν επίσης να τοποθετηθούν σε συστήματα ψύξης, θέρμανσης και αερισμού για να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια από τον εξατμιστή ή τον συμπυκνωτή, βελτιώνοντας έτσι τη θερμική άνεση του εσωτερικού χώρου και βελτιστοποιώντας την απόδοση του κτηρίου. Για παράδειγμα, για να βελτιωθεί η εσωτερική θερμική άνεση, οι ερευνητές διερεύνησαν μια σειρά PCM με διαφορετικά συστήματα ψύξης αέρα, όπως σε σύστημα κλιματισμού A/C [5.43-5.44], σε ηλιακά συστήματα ψύξης [5.45-5.46] και σε μονάδες αντλιών θερμότητας [5.47-5.48] κ.λ.π.

Η λειτουργική απόδοση ενός συστήματος κλιματισμού (A/C) σε συνδυασμό με το PCM βελτιώνεται. Αυτό το συμπέρασμα βγήκε από τους Parameshwaran et al. [5.44], με

μελέτη για τη βελτίωση της θερμικής και της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος ψύξης με βάση το μεταβαλλόμενο σύστημα κλιματισμού αέρα με ενσωματωμένο PCM. Σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα A/C, το προτεινόμενο σύστημα A/C επέτυχε μέσο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας κατά μέσο όρο και ανά ημέρα κατά 36% ~ 58% και 24% ~ 51%, αντίστοιχα, για ετήσια χρήση. Ο Belmonte [5.45] διερεύνησε την ενσωμάτωση των PCM στους βρόχους απόρριψης θερμότητας σε συστήματα ηλιακής ψύξης απορρόφησης για οικιακές εφαρμογές, βελτιώνοντας τον μέσο συνολικό συντελεστή απόδοσης του συστήματος σε εύκρατο και υγρό περιβάλλον σχεδόν κατά μία μονάδα. Όπως με τη μελέτη του Belmonte, έτσι και οι Cheng et al. [5.46] σχεδίασαν μια μονάδα ψυκτικής αποθήκευσης για ηλιακή ψύξη. Οι αντλίες θερμότητας χρησιμοποιούν ανανεώσιμη ενέργεια από το περιβάλλον τους (ατμοσφαιρικός αέρας, νερό ή έδαφος) και ενέργεια "υψηλής ποιότητας", π.χ. ηλεκτρική ενέργεια, για την αύξηση της θερμοκρασίας για θέρμανση ή για την μείωση της θερμοκρασίας για ψύξη [5.49]. Ο συνδυασμός του PCM με τις αντλίες θερμότητας είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που μπορεί να οδηγήσει στην αξιοποίηση των δύο τεχνολογιών για εξοικονόμηση ενέργειας και περιβαλλοντικά οφέλη [5.50]. Η πρώτη αντλία θερμότητας αέρα (ASHP) συζευγμένη με δοχεία PCM δοκιμάστηκε πειραματικά υπό προσομοίωση θερινών συνθηκών από τους Moreno et al. [5.47]. Τα πειραματικά αποτελέσματά τους έδειξαν ότι το δοχείο με PCM ήταν ικανό να παρέχει 14.5% περισσότερο κρύο και να διατηρεί την εσωτερική θερμοκρασία μέσα στα πλαίσια της θερμικής άνεσης κατά 20.65% περισσότερο από ένα δοχείο νερού. Στη συνέχεια, οι Zhu et al. [5.48] μελέτησαν ένα σύστημα αντλίας θερμότητας εδάφους (GSHP), με ενσωματωμένο PCM σε ένα κτήριο γραφείων. Λαμβάνοντας υπόψιν την αρχική επένδυση και το κόστος λειτουργίας, η βέλτιστη αναλογία ψύξης ήταν 40%. Παρόλα αυτά, οι περισσότεροι ερευνητές δεν έχουν αναφέρει μια θερμική αξιολόγηση άνεσης όταν μόνο το σύστημα ψύξης αέρα βελτιστοποιηθεί αποτελεσματικά. Επίσης, είναι ανάγκη να εξετασθούν αυτά τα συζευγμένα συστήματα από οικονομικής και περιβαλλοντικής πλευράς.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με PCM δίνουν την ευκαιρία να μετατοπιστεί η ζήτηση φορτίου από την ενεργειακή περίοδο υψηλού κόστους σε περίοδο εκτός αιχμής, με την κάλυψη των θερμικών φορτίων που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της υψηλής ζήτησης. Έτσι, η αγορά πρόσθετου εξοπλισμού θέρμανσης αέρα ή νερού μπορεί επίσης να αναβληθεί. Οι Morrison et al. [5.51] μελέτησαν την επίδοση ηλιακών συστημάτων θέρμανσης αέρα, χρησιμοποιώντας μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας που

εκμεταλλεύεται την αλλαγή φάσης. Κατέληξαν ότι η επιλογή του PCM πρέπει να γίνεται με βάση το σημείο τήξης και τη λανθάνουσα θερμότητα και πως ένα τέτοιο σύστημα θέρμανσης απαιτεί περίπου το 1/4 του όγκου αποθήκευσης ενός πέτρινου τοίχου και το 1/2 του όγκου αποθήκευσης μιας δεξαμενής νερού. Ο Fatah [5.52] ανέπτυξε έναν απλό ηλιακό θερμαντήρα αέρα με ενσωμάτωση συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι όταν ο θερμαντήρας πληρωθεί με PCM θερμοκρασιών τήξης 51°C και 43°C, τότε επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση του συστήματος. Το 2006, οι Cabeza et al. [5.53] μελέτησαν ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού, στο οποίο κύλινδροι γεμάτοι με υλικό αλλαγής φάσης ήταν τοποθετημένοι στην κορυφή της δεξαμενής νερού. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, οι ερευνητές κατέληξαν ότι ο καταναλωτής θα έχει ζεστό νερό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην περίπτωση προσθήκης PCM στη δεξαμενή από ότι στην περίπτωση χωρίς PCM.

Για την ενεργό βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας, οι δεξαμενές αποθήκευσης με PCM, ειδικοί σχεδιαστικά εναλλάκτες θερμότητας και δίκτυα εξαερισμού που ενσωματώνουν PCM [5.54-5.55] είναι μερικές από τις εφαρμογές που υπάρχουν για τα κτήρια. Επιπλέον, οι εναλλάκτες θερμότητας αέρα με PCM μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας στο σύστημα εξαερισμού του κτηρίου για θέρμανση [5.55-5.56]. Οι Bigaila et al. [5.57] προσομοίωσαν ένα PVT συλλέκτη που βοηθά μια μικρής κλίμακας αντλία θερμότητας με ένα ακτινοβόλο πάνελ με PCM. Τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου έδειξαν ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί μείωση κατά 14.5% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και μείωση κατά 11.3% της ζήτησης θερμικής ισχύος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [5.1] Κ.Α. Αντωνόπουλος, Κλιματισμός, Αθήνα 2004.
- [5.2] N. Mao, D.M. Pani, M.J. Song, Z. Li, S.M. Deng, Operating optimization for improved energy consumption of a TAC system affected by nighttime thermal loads of building envelopes, *Energy* 2017;133:491–501.
- [5.3] N. Mao, M.J. Song, D.M. Pan, Z. Li, S.M. Deng, Numerical investigation on the effects of envelope thermal loads on the energy utilization potential and thermal non-uniformity in sleeping environment, *Build. Environ.* 2017;124:232–244.

[5.4] N. Mao, D.M. Pan, Z. Li, Y.J. Xu, M.J. Song, S.M. Deng, A numerical study on influences of building envelope heat gain on operating performances of abed-based task/ambient air conditioning (TAC) system in energy saving and thermal comfort, *Applied Energy* 2017;192:213–221.

[5.5] R.L. Zeng, X. Wang, H.F. Di, F. Jiang, Y.P. Zhang, New concepts and approach for developing energy efficient buildings: ideal specific heat for building internal thermal mass, *Energy and Buildings* 2011;43:1081–1090.

[5.6] P. Schossig, H. Henning, S. Gschwander, T. Haussmann, Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials, *Solar Energy Mater. Sol. Cells* 2005;89:297–306.

[5.7] C. Voelker, O. Kornadt, M. Ostry, Temperature reduction due to the application of phase change materials, *Energy and Buildings* 2008;40:937–944.

[5.8] S. Behzadi, M.M. Farid, Energy storage for efficient energy utilization in buildings, *International High Performance Buildings Conference* 2010.

[5.9] F. Kuznik, J. Virgone, Experimental assessment of a phase change material for wall building use, *Appl. Energy* 2009;86:2038–2046.

[5.10] I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis, M. Founti, Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls, *Build. Environ.* 2013;61:93–103.

[5.11] D.W. Hawes, D. Banu, D. Feldman, The stability of phase change materials in concrete, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 1992;27:103-118.

[5.12] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings* 2007;39:113–119.

[5.13] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, P. Santos, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy and Buildings* 2013;59:82-103.

[5.14] Μ.Θ. Πλυταριά, Διπλωματική εργασία: Παθητικά Συστήματα θέρμανσης και δροσισμού στα κτήρια, Αθήνα 2006.

- [5.15] Ε. Γεωργιάδου, Ε. Ανδρεαδάκη-Χρονάκη, Ξ. Ζήσης, Βιοκλιματικός Σχεδιασμός και Καθαρές Τεχνολογίες Δόμησης, Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη 1996.
- [5.16] A.A. Ghoneim, S. A. Klein, J.A. Duffie, Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials, *Solar Energy* 1991;47:237-242.
- [5.17] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy and Buildings* 2010;42:534–540.
- [5.18] K.T. Zingre, E.H. Yang, M.P. Wan, Dynamic thermal performance of inclined double-skin roof: modeling and experimental investigation, *Energy* 2017;133: 900–912.
- [5.19] K.T. Zingre, M.P. Wan, X.G. Yang, A new RTTV (roof thermal transfer value) calculation method for cool roofs, *Energy* 2015;81:222–232.
- [5.20] J.W. Lei, K. Kumarasamy, K.T. Zingre, J.L. Yang, M.P. Wan, E.H. Yang, Cool colored coating and phase change materials as complementary cooling strategies for building cooling load reduction in tropics, *Applied Energy* 2017;190:57–63.
- [5.21] N.A. Yahay, H. Ahmad, Numerical investigation of indoor air temperature with the application of PCM gypsum board as ceiling panels in buildings, *Procedia Eng.* 2011;20:238–248.
- [5.22] E.M. Alawadhi, H.J. Alqallaf, Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: numerical study, *Energy Conversion and Management* 2011;52: 2958–2964.
- [5.23] K.T. Zingre, M.P. Wan, S.K. Wong, W.B.T. Toh, I.Y.L. Lee, Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate, *Energy* 2015;82:813–826.
- [5.24] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, R.V. Seeniraj, Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management, *Appl. Therm. Eng.* 2008;28:556–565.
- [5.25] A. Tokuc, T. Başaran, S.C. Yesügey, An experimental and numerical investigation on the use of phase change materials in building elements: the case of a flat roof in Istanbul, *Energy Build.* 2015;102:91–104.

- [5.26] W. Saman, F. Bruno, E. Halawa, Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system, *Sol. Energy* 2005;78:341–349.
- [5.27] J. Kosny, K. Biswas, W. Miller, S. Kriner, Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink, *Solar Energy* 2012;86:2504–2514.
- [5.28] W.Y. Lin, Z.J. Ma, M.I. Sohel, P. Cooper, Development and evaluation of a ceiling ventilation system enhanced by solar photovoltaic thermal collectors and phase change materials, *Energy Conversion and Management* 2014;88:218–230.
- [5.29] A.G. Entrop, H.J.H. Brouwers, A.H.M.E. Reinders, Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses, *Solar Energy* 2011;85:1007–1020.
- [5.30] L. Royon, L. Karim, A. Bontemps, Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings, *Energy and Buildings* 2013;63:29–35.
- [5.31] L. Royon, L. Karim, A. Bontemps, Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of buildings, *Energy and Buildings* 2014;82:385–390.
- [5.32] X. Xu, Y.P. Zhang, K.P. Lin, H.F. Di, R. Yang, Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings, *Energy and Buildings* 2005;37:1084–1091.
- [5.36] Y.P. Zhang, K.P. Lin, R. Yang, H.F. Di, Y. Jiang, Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings, *Energy and Buildings* 2006;38:1262–1269.
- [5.37] R. Ansuini, R. Larghetti, A. Giretti, M. Lemma, Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control, *Energy and Buildings* 2011;43:3019–3026.
- [5.38] K.L. Huang, G.H. Feng, J.S. Zhang, Experimental and numerical study on phase change material floor in solar water heating system with a new design, *Solar Energy* 2014;105:126–138.
- [5.39] Y. Xia, X.S. Zhang, Experimental research on a double-layer radiant floor system with phase change material under heating mode, *Appl. Therm. Eng.* 2016;96: 600–606.

- [5.40] J. Mazo, M. Delgado, J.M. Marin, B. Zalba, Modeling a radiant floor system with phase change material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump. *Energy and Buildings* 2012;47:458–66.
- [5.41] A.E. Mays, R. Ammar, M. Hawa, M.A. Akroush, F. Hachem, M. Khaled et al. Using phase change material in under floor heating. *Energy Procedia* 2017;119:806–11.
- [5.42] J.F. Belmonte, P. Eguía, A.E. Molina, J.A. Almendros-Ibáñez, Thermal simulation and system optimization of a chilled ceiling coupled with a floor containing a phase change material (PCM), *Sustain. Cities Soc.* 2015;14:154–170.
- [5.43] G.Y. Fang, X. Liu, S.M. Wu, Experimental investigation on performance of ice storage air-conditioning system with separate heat pipe, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2009;33:1149–1155.
- [5.44] R. Parameshwaran, S. Kalaiselvam, Energy conservative air conditioning system using silver nano-based PCM thermal storage for modern buildings, *Energy and Buildings* 2014;59:202–212.
- [5.45] J.F. Belmonte, M.A. Izquierdo-Barrientos, P. Eguía, A.E. Molina, J.A. Ibáñez, PCM in the heat rejection loops of absorption chillers. A feasibility study for the residential sector in Spain, *Energy and Buildings* 2014;80:331–351.
- [5.46] X.W. Cheng, X.Q. Zhai, R.Z. Wang, Thermal performance analysis of a packed bed cold storage unit using composite PCM capsules for high temperature solar cooling application, *Applied Thermal Engineering* 2016;100:247–255.
- [5.47] P. Moreno, A. Castell, C. Solé, G. Zsembinszki, L.F. Cabeza, PCM thermal energy storage tanks in heat pump system for space cooling, *Energy and Buildings* 2014;82:399–405.
- [5.48] N. Zhu, P.F. Hu, Y. Lei, Z.N. Jiang, F. Lei, Numerical study on ground source heat pump integrated with phase change material cooling storage system in office building, *Applied Thermal Engineering* 2015;87:615–623.

- [5.49] Z.L. Sun, S.C. Liu, Y.C. Linag, M.J. Song, J.H. Guo, Experimental study on the optimal charge of carbon dioxide in water–water heat pump system, *HKIE Trans.* 2017;24(2):99–106.
- [5.50] P. Moreno, C. Solé, A. Castell, L.F. Cabeza, The use of phase change materials in domestic heat pump and air-conditioning systems for short term storage: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014;39:1–13.
- [5.51] D. J. Morrison, S. I. Abdel-Khalik, Effects of phase-change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems, *Solar Energy* 1978;20:57-67.
- [5.52] M.M. Alkilani, K. Sopian, M.A. Alghoul, M. Sohif και M.H. Ruslan, Review of solar air collectors with thermal storage units, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15:1476-1490.
- [5.53] L.F. Cabeza, M. Ibáñez, C. Solé, J. Roca, M. Nogués, Experimentation with a water tank including a PCM module, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2006;90:1273-1282.
- [5.54] M.A. Sharif, A.A Al-Abidi, S. Mat, K. Sopian, M.H. Ruslan, M.Y. Sulaiman, Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;42:557–568.
- [5.55] N. Stathopoulos, M. El Mankibi, R. Issoglio, P. Michel, F. Haghigat, Air-PCM heat exchanger for peak load management: Experimental and simulation, *Solar Energy* 2016;132:453-466.
- [5.56] V.V. Tyagi, D. Buddhi, Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2008; 92(8):891-899.
- [5.57] E. Bigaila, A.K. Athienitis, Modeling and simulation of a photovoltaic/thermal air collector assisting a façade integrated small scale heat pump with radiant PCM panel, *Energy and Buildings* 2017;149:298–309.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσονται οι προσομοιώσεις, για θέρμανση και κλιματισμό κτηρίων με υλικά αλλαγής φάσης (PCM), με το λογισμικό TRNSYS. Επιπλέον, γίνεται η επικύρωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με σύγκριση πειραματικών δεδομένων. Στην αρχή, γίνεται αναλυτική αναφορά για το χρησιμοποιούμενο λογισμικό TRNSYS και των βασικών υπολογιστικών μοντέλων του κτηρίου και του υλικού αλλαγής φάσης (PCM).

6.1 Λογισμικό TRNSYS [6.1-6.2]

Το TRNSYS (TRaNsient System Simulation) είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιείται κυρίως στους τομείς της ανανεώσιμης ενέργειας και της προσομοίωσης κτηρίων για παθητικό και ενεργό ηλιακό σχεδιασμό. Το TRNSYS είναι ένα εμπορικό πακέτο λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Wisconsin και το οποίο έχει διατεθεί στο εμπόριο από το 1975. Μία από τις πρωτότυπες εφαρμογές ήταν η πραγματοποίηση δυναμικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς ενός ηλιακού συστήματος ζεστού νερού για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος, ώστε να μπορεί να διαπιστωθεί η μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους ενός τέτοιου συστήματος. Βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου λογισμικού αποτελεί το γεγονός ότι δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να επέμβει και να τροποποιήσει με τρόπο κατάλληλο τον κώδικα των υπολογιστικών μοντέλων (Types) που περιλαμβάνονται σε αυτό με σκοπό την εξυπηρέτηση των δικών του αναγκών.

Το TRNSYS έχει γίνει λογισμικό αναφοράς για ερευνητές και μηχανικούς σε όλο τον κόσμο. Είναι ένα από τα καταχωρημένα προγράμματα προσομοίωσης στα πρόσφατα Ευρωπαϊκά πρότυπα για τα ηλιακά θερμικά συστήματα. Το επίπεδο λεπτομέρειας του μοντέλου του κτηρίου του TRNSYS (Type 56) συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του προτύπου ANSI/ASHRAE 140-2001 και επίσης πληροί τις γενικές τεχνικές απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων, γεγονός που καθιστά το TRNSYS ικανό για συμμόρφωση με τις εφαρμογές της οδηγίας σε διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Το TRNSYS αποτελείται από δύο μέρη. Ο πρώτος είναι ένας μηχανισμός (που ονομάζεται πυρήνας) ο οποίος διαβάζει και επεξεργάζεται το αρχείο εισόδου, επιλύει

διαδοχικά το σύστημα, προσδιορίζει τη σύγκλιση και μεταβάλλει τις μεταβλητές του συστήματος. Ο πυρήνας παρέχει επίσης βοηθητικές εφαρμογές που μεταξύ άλλων καθορίζουν τις θερμοφυσικές ιδιότητες, εκτελούν γραμμικές παλινδρομήσεις και παρεμβάλλουν εξωτερικά αρχεία δεδομένων. Το δεύτερο μέρος του TRNSYS είναι μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη στοιχείων (components), καθένα από τα οποία μοντελοποιεί την απόδοση ενός μέρους του συστήματος. Η συνηθισμένη βιβλιοθήκη περιλαμβάνει περίπου 150 μοντέλα που κυμαίνονται από αντλίες σε κτήρια πολλαπλών ζωνών, ανεμογεννήτριες σε ηλεκτρολύτες, επεξεργαστές δεδομένων καιρού σε οικονομικές εφαρμογές και από βασικό εξοπλισμό HVAC σε αναδυόμενες τεχνολογίες αιχμής. Τα μοντέλα κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι χρήστες να μπορούν να τροποποιούν υπάρχοντα στοιχεία ή να γράφουν τα δικά τους, επεκτείνοντας τις δυνατότητες του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, με το TRNSYS μπορεί να μελετηθεί η θερμική συμπεριφορά ενός κτηρίου σε συνδυασμό με την εγκατάσταση θέρμανσης και κλιματισμού δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργεί ο ίδιος την εγκατάσταση.

Οι κυριότερες εφαρμογές περιλαμβάνουν: ηλιακά συστήματα (ηλιακά θερμικά και φωτοβολταϊκά συστήματα), κτήρια χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και συστήματα HVAC, συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπαραγωγή, κυψέλες καυσίμου.

Επιπλέον, τα κλιματολογικά δεδομένα που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα προέρχονται από αρχεία του λογισμικού Meteororm, το οποίο περιλαμβάνει μια εκτεταμένη βάση κλιματικών δεδομένων από περίπου 8000 μετεωρολογικούς σταθμούς σ' όλο τον κόσμο, η οποία είναι κατάλληλη για το σχεδιασμό κάθε είδους εφαρμογής στην ηλιακή ενέργεια. Στις πηγές των δεδομένων συμπεριλαμβάνονται οι NCDC (National Climatic Data Center, USA), NREL (National Renewable Energy Laboratory), GEBA (Global Energy Balance Archive) κ.α.

6.1.1 Type 56 (Κτήριο)

Το Type 56 του TRNSYS (μοντέλο πολυζωνικού κτηρίου) μοντελοποιεί την θερμική συμπεριφορά κτηρίων διηρημένων σε διαφορετικές θερμικές ζώνες, ο αριθμός των οποίων δεν ξεπερνά τις 25. Μέσω μίας σειράς αρχείων, το μοντέλο «διαβάζει» την περιγραφή του κτηρίου. Τα συγκεκριμένα αρχεία δημιουργούνται με βάση τα δεδομένα τα οποία εισάγει ο χρήστης στο TRNBuild.

Το TRNBuild αποτελεί ένα πρόγραμμα στο οποίο ο χρήστης μπορεί να μεταβεί μέσω της επιλογής “Edit Building” του Type 56 και να ορίσει όλες τις λεπτομέρειες οι οποίες απαιτούνται για τον καθορισμό της θερμικής συμπεριφοράς του κτηρίου όπως λόγου χάρη τις θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών, την διείσδυση αέρα, το θερμικό κέρδος, τον φωτισμό καθώς και τα στοιχεία εκείνα τα οποία αφορούν στη δομή του όπως για παράδειγμα τα υλικά και τα πάχη της τοιχοποιίας και των υαλοπινάκων [6.3-6.4].

6.1.2 Εισαγωγή PCM στο λογισμικό TRNSYS

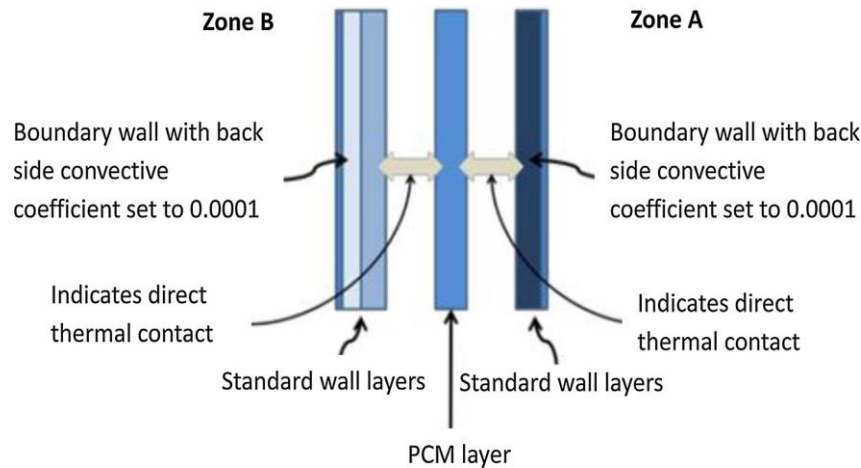
Τα τελευταία χρόνια, η προσομοίωση του PCM στα κτήρια διεξάγεται χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό. Το TRNSYS και το EnergyPlus είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα λογισμικά που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες [6.5]. Το λογισμικό TRNSYS εφαρμόζεται σε πολλές μελέτες με PCM, ειδικά στις περιπτώσεις που το κτήριο πρέπει να συνδυαστεί με άλλη εγκατάσταση (π.χ. ηλιακό σύστημα θέρμανσης). Οι Ibanez et al. [6.6] δημιούργησαν ένα απλό μοντέλο με το TRNSYS για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτηρίου με PCM. Γενικά, η εφαρμογή του PCM στο TRNSYS χρειάζεται τη χρήση εξωτερικού στοιχείου σε συνδυασμό με το στοιχείο που μοντελοποιεί το κτήριο (Type 56). Για παράδειγμα, ορισμένα μοντέλα προσομοίωσης του PCM στους τοίχους είναι τα ακόλουθα: Type 241 [6.7], Type 260 [6.8], Type 285 [6.9], Type 399 [6.10], Type 3258 [6.11], Type 1270 [6.12].

6.1.2.1 Type 1270 (PCM)

Στην παρούσα διατριβή γίνεται η χρήση του Type 1270 για την προσομοίωση του PCM στον εξεταζόμενο κτήριο. Το Type 1270 αναπτύχθηκε από την TESS (Thermal Energy System Specialists) και είναι εμπορικά διαθέσιμο ως μεμονωμένο Type. Η μεθοδολογία του είναι παρόμοια με τη μέθοδο θερμικής πηγής.

Το Type 1270 χρησιμοποιεί την έννοια του τοίχου οριακών συνθηκών (boundary wall) του Type 56 για να μας επιτρέψει να ενσωματώσουμε ένα στρώμα PCM οπουδήποτε θέλουμε μέσα σε μια δομή τοίχου, οροφής ή δαπέδου. Τα τυποποιημένα στοιχεία τοιχοποιίας του εκάστοτε κτηρίου διαμορφώνονται με το Type 56 και το στρώμα PCM διαμορφώνεται εξωτερικά. Ο τοίχος, ο οποίος περιέχει PCM, χωρίζεται σε δύο μέρη και κάθε τμήμα τοποθετείται ως οριοθετημένο τοίχωμα στο στρώμα PCM με τον συντελεστή συναγωγιμότητας της πίσω πλευράς να είναι ίσος με 0.0001 (δηλώνοντας

την άμεση επαφή). Η ροή ενέργειας που διαπερνά την εξωτερική επιφάνεια κάθε οριακού τοιχώματος δίνεται από την έξοδο του Type 56 “QCOMO” (NTYPE20) η οποία συνδέεται ως είσοδος στο μοντέλο PCM. Στο τέλος, το Type 1270 υπολογίζει τη θερμοκρασία του στρώματος PCM (T_{PCM}), το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται πίσω στο Type 56. Η εικόνα 6.1.1 δείχνει την σχηματική απεικόνιση του μοντέλου PCM.



Εικόνα 6.1.1: Απεικόνιση του μοντέλου Type 1270 [6.12].

Σύμφωνα με την μαθηματική αναφορά της TESSLibs, το Type 1270 είναι ένα απλό μαθηματικό μοντέλο επειδή η διαδικασία τήξης/στερεοποίησης θεωρείται ότι γίνεται σε ένα σταθερό επίπεδο θερμοκρασίας. Το PCM έχει σταθερή ειδική θερμοχωρητικότητα σε στερεή κατάσταση και άλλη σταθερή σε υγρή κατάσταση [6.12].

Όταν το PCM έχει στερεοποιηθεί πλήρως, η θερμοκρασία στο τέλος του χρονικού βήματος δίνεται ως:

$$T_{final} = T_{initial} + \frac{q_1 + q_2}{m_{pcm} \cdot c_{p,solid}} \quad (6.1.1)$$

Όταν έχει επέλθει πλήρης τήξη του PCM, η τελική θερμοκρασία του δίνεται ως:

$$T_{final} = T_{initial} + \frac{q_1 + q_2}{m_{pcm} \cdot c_{p,liquid}} \quad (6.1.2)$$

όπου q_1 και q_2 είναι οι ποσότητες εισροής ενέργειας στο PCM από τα οριακά στρώματα τοιχώματος, m_{pcm} είναι η μάζα του PCM, $C_{p,solid}$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα στην στερεή κατάσταση του PCM και $C_{p,liquid}$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα στην υγρή κατάσταση του PCM.

Όταν το PCM βρίσκεται σε μεταβατική φάση, η τελική θερμοκρασία και η αρχική θερμοκρασία είναι ίσες (υπό τον όρο ότι το PCM δεν είναι πλήρως στερεό ή πλήρως υγρό κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος) και το Type 1270 παρακολουθεί απλώς πόση ενέργεια απορροφά ή απελευθερώνει το PCM. Εάν η ενέργεια που απορροφάται από το PCM κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού βήματος υπερβαίνει την ικανότητα λανθάνουσας αποθήκευσης του PCM, τότε το Type 1270 υπολογίζει πόση ενέργεια απαιτείται για την πλήρη τήξη του PCM και στη συνέχεια παρέχει την υπόλοιπη ενέργεια σε μια αλλαγή θερμοκρασίας στην υγρή φάση χρησιμοποιώντας την εξίσωση 6.1.2. Ομοίως, εάν το PCM αποδίδει ενέργεια στα περιβάλλοντα τοιχώματα και εκπέμπει περισσότερη ενέργεια από ό, τι έχει αποθηκευτεί σε ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα, τότε το Type 1270 υπολογίζει πόση ενέργεια απαιτείται για να στερεοποιηθεί πλήρως το PCM και παρέχει την υπόλοιπη ενέργεια στην αλλαγή της θερμοκρασίας στη στερεά φάση χρησιμοποιώντας την εξίσωση 6.1.1 [6.12].

Ο χρήστης είναι σε θέση να προσδιορίσει τις φυσικές ιδιότητες του PCM (πυκνότητα, ειδική θερμότητα, θερμοκρασία τήξης, θερμοκρασία στερεοποίησης και λανθάνουσα θερμότητα). Το μοντέλο έχει επίσης ενσωματωμένες τιμές για μια συγκεκριμένη μάρκα PCM (BioPCM) από την εταιρεία Phase Change Energy Solutions. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει απευθείας έναν αριθμό μοντέλου PCM θέτοντας μία μόνο παράμετρο [6.12].

6.2 Κτήρια με Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)

6.2.1 Επικύρωση του Type 1270 μέσω πειράματος σε τοίχους.

Σχετικά με την επικύρωση του μοντέλου, πρέπει να ειπωθεί ότι το Type 1270 έχει επικυρωθεί με πειραματικά αποτελέσματα από τους Jayalath et al. [6.13] και Panayiotou et al. [6.14] και έτσι αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως αξιόπιστο μοντέλο. Παρόλα αυτά, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έγινε εκ νέου επικύρωση του μοντέλου με σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα της έρευνας των Kuznic και Virgone [6.15].

Οι Kuznic και Virgone [6.15] διεξήγαγαν το πείραμά τους στην αίθουσα δοκιμών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Πολεοδομικού Σχεδιασμού του Εθνικού Ινστιτούτου Εφαρμοσμένων Επιστημών στη Λυών (CETHIL-INSA de Lyon, Γαλλία). Η αίθουσα δοκιμών αποτελούνταν από δύο πανομοιότυπα περιβλήματα που ονομάζονταν πειραματικοί χώροι. Στα πειράματά τους, μόνο ένας πειραματικός χώρος

χρησιμοποιήθηκε με όγκο $3.10 \times 3.10 \times 2.50 \text{m}^3$. Επιπλέον, ο χώρος είχε προσανατολισμό προς τον νότο με μια γυάλινη πρόσοψη. Τα υλικά των τοιχωμάτων περιγράφονται στον Πίνακα 6.2.1. Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών συνοψίζονται στον Πίνακα 6.2.2.

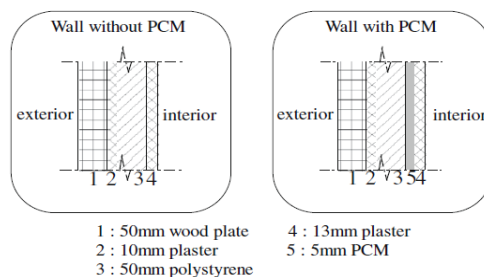
Πίνακας 6.2.1: Υλικά τοιχοποιίας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον.

	<i>Δομικά Υλικά</i>	<i>Πάχη (mm)</i>
<i>Δάπεδο</i>	Τσιμέντο	200
<i>Τοίχοι</i>	Σοβάς	10
	Πολυστερίνη	50
	Σοβάς	10
	Ξύλινη πλάκα	50
<i>Οροφή</i>	Σοβάς	10
	Ξύλινη πλάκα	8
	Μόνωση	55
	Ξύλινη πλάκα	25
<i>Γυάλινη πρόσοψη</i>	Γυαλί	10

Πίνακας 6.2.2: Φυσικές ιδιότητες υλικών του εξεταζόμενου χώρου.

<i>Δομικά Υλικά</i>	<i>Πυκνότητα (kg/m³)</i>	<i>Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kgK)</i>	<i>Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)</i>
<i>Τσιμέντο</i>	400	919.5	0.16
<i>Σοβάς</i>	817	1620	0.35
<i>Ξύλινη πλάκα</i>	544	1640	0.136
<i>Πολυστερίνη</i>	35	1210	0.04
<i>Μόνωση</i>	200	362.8	0.06
<i>Γυαλί</i>	2500	770	1.00

Τρία από τα τοιχώματα του χώρου (βόρειος, ανατολικός και δυτικός τοίχος) τροποποιούνται ώστε να περιλαμβάνουν ή όχι ένα σύνθετο PCM. Η σύνθεση των τοίχων με και χωρίς PCM περιγράφεται στην εικόνα 6.2.1.



Εικόνα 6.2.1: Σύνθεση των τοίχων με και χωρίς PCM [6.15].

Το PCM, με την ονομασία ENERGAİN, που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Dupont de Nemours Society και αποτελείται από 60% μικροενθυλακωμένη παραφίνη μέσα σε ένα συμπολυμερές. Έχει πάχος 5 mm και πυκνότητα ίση περίπου με 900 kg/m³. Τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου PCM φαίνονται στον πίνακα 6.2.3.

Πίνακας 6.2.3: Ιδιότητες του PCM του πειράματος [6.15].

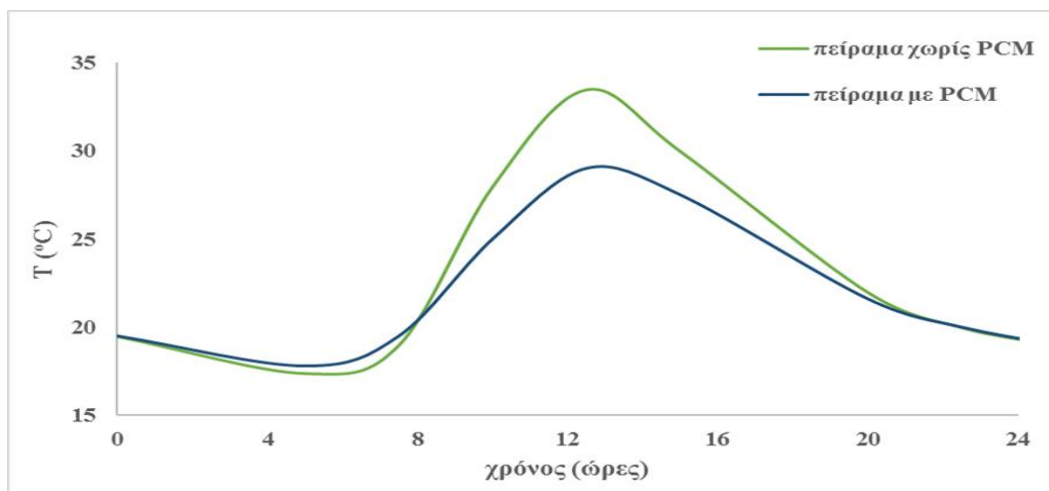
Υλικό	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Λανθάνουσα	Θερμική	Θερμική
		θερμότητα αποθήκευσης (J/g)	αγωγιμότητα (σε υγρή φάση) (W/mK)	αγωγιμότητα (σε στερεή φάση) (W/mK)
PCM	22.5	106	0.22	0.18

Το πείραμα διεξήχθη για το καλοκαίρι, για το χειμώνα και για την ενδιάμεση περίοδο. Για την περίπτωση της ενδιάμεσης περιόδου (Μάρτιος-Μάιος), όπου θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω για την επικύρωση του μοντέλου Type 1270, ισχύουν τα εξής:

- Εξέταση ενός 24ώρου.
- Ρυθμός ροής αέρα 1.8 εναλλαγές/ώρα. Ο αερισμός χρειάζεται για την καλύτερη λειτουργία του PCM [6.16].

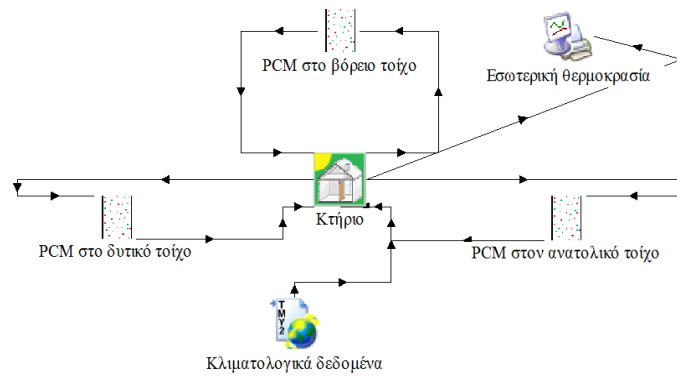
Το παρακάτω διάγραμμα 6.2.2 δείχνει τα προφίλ της θερμοκρασίας αέρα του εξεταζόμενου χώρου, χωρίς και με PCM σε τρεις τοίχους όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μετά από τα πειράματα που διεξήχθησαν από τους Kuznic και Virgone [6.15]. Παρατηρείται ότι, όταν δεν υπάρχει PCM η θερμοκρασία αέρα του χώρου κυμαίνεται μεταξύ 17.4°C και 33.5°C, με μέση τιμή θερμοκρασίας 23.2°C. Όταν οι τρεις τοίχοι περιλαμβάνουν PCM, η θερμοκρασία αέρα του χώρου κυμαίνεται μεταξύ 17.8°C και 29.0°C, με μέση τιμή θερμοκρασίας 22.1°C. Το PCM που περιλαμβάνεται στους τοίχους επιτρέπει τη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στο δωμάτιο: η μέγιστη τιμή

θερμοκρασίας αέρα μειώνεται κατά 2.3°C ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία αέρα αυξάνεται περίπου 0.4°C.



Διάγραμμα 6.2.2: Προφίλ θερμοκρασίας του χώρου ενός 24ώρου για την ενδιάμεση περίοδο.

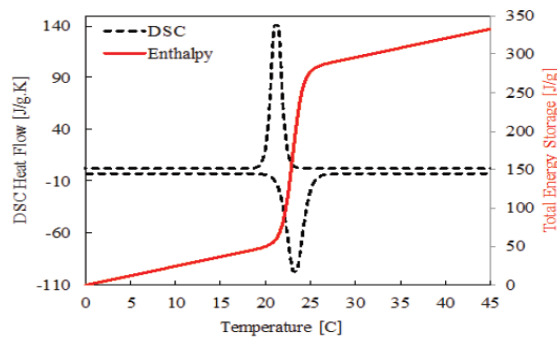
Στην συνέχεια γίνεται επικύρωση του μοντέλου Type 1270 (PCM) του TRNSYS κάνοντας σύγκριση με τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα. Έτσι, με το λογισμικό TRNSYS, σχεδιάστηκε ο παραπάνω πειραματικός χώρος με την ίδια γεωμετρία και τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Η μόνη διαφορά βρίσκεται στο PCM. Το Type 1270 δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη ή να ορίσει τις φυσικές ιδιότητες ενός PCM (όπως την πυκνότητα, την θερμοκρασία τήξης και στερεοποίησης, την λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης) ή να χρησιμοποιήσει δεδομένα μιας συγκεκριμένης μάρκας PCM (BioPCM). Στην δεύτερη περίπτωση, ο χρήστης μπορεί να διαλέξει τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης δηλαδή 23, 25, 27 και 29°C. Για την παρούσα σύγκριση επιλέχθηκε το BioPCM με κωδικό προϊόντος M91 και με θερμοκρασία τήξης 23°C, δηλαδή κοντά στην θερμοκρασία τήξης του PCM του πειράματος. Τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου PCM (Q23/M91) δίνονται στον πίνακα 6.2.4. Η μέθοδος τοποθέτησης του BioPCM είναι η μακροενσωμάτωση σε κάψουλα που έχει τη μορφή τετράγωνης σακούλας. Το TRNSYS επιτρέπει τη δημιουργία συμπαγών στρωμάτων και γι' αυτό το λόγο θεωρούμε το BioPCM που χρησιμοποιείται ως σταθερό συνεχές στρώμα. Η απλή διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με στρώμα PCM στο βόρειο, στο δυτικό και στον ανατολικό τοίχο με το λογισμικό TRNSYS δίνεται στην παρακάτω εικόνα 6.2.3. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Β, η εικόνα Β1 δείχνει την ολοκληρωμένη διαμόρφωση του συστήματος στο TRNSYS.



Εικόνα 6.2.3: Απλή διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με PCM στο βόρειο, στο δυτικό και στον ανατολικό τοίχο.

Πίνακας 6.2.4: Ιδιότητες του PCM των προσομοιώσεων [6.17].

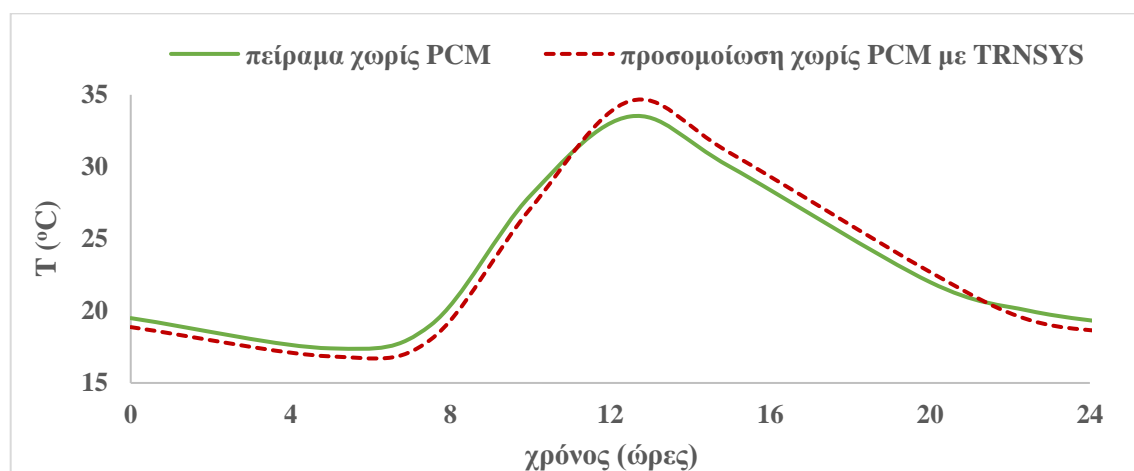
<i>BioPCM</i>	<i>Q23/M91</i>
Πυκνότητα	800 kg/m ³
Πάχος	20 mm
Θερμοκρασία τήξης	23°C
Θερμική αγωγιμότητα (σε υγρή φάση)	0.15 W/mK
Θερμική αγωγιμότητα (σε στερεή φάση)	2.5 W/mK
Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης	210 kJ/kg



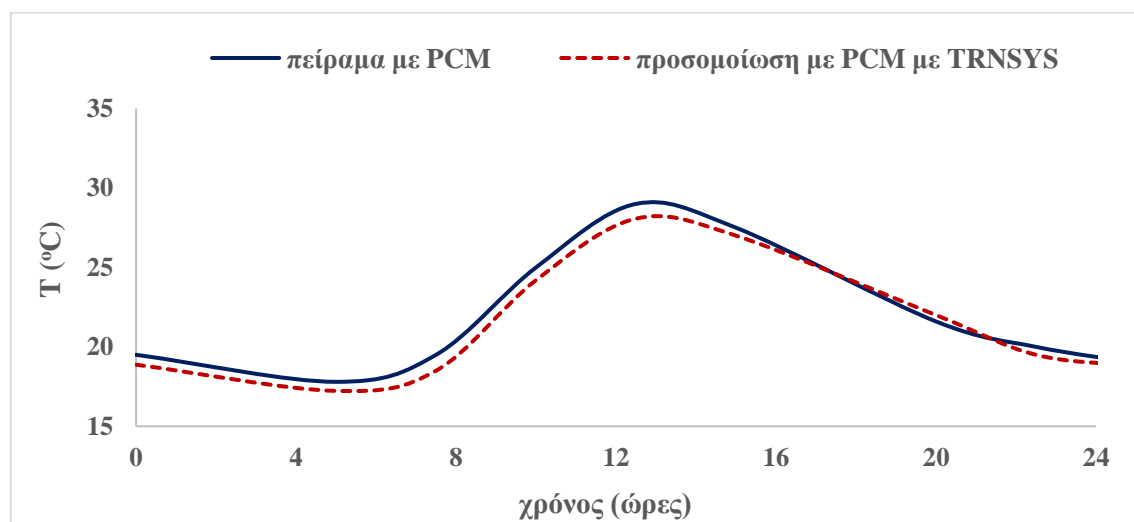
Εικόνα 6.2.4: Καμπύλες DSC και ενθαλπίας του PCM (Q23/M91) [6.17].

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (διάγραμμα 6.2.5) δείχνουν ότι, όταν δεν υπάρχει PCM η θερμοκρασία αέρα του χώρου κυμαίνεται μεταξύ 16.8°C και 34.5°C. Συγκρίνοντας τις κατανομές των θερμοκρασιών παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασιακή απόκλιση των εσωτερικών θερμοκρασιών μεταξύ του πειράματος και της προσομοίωσης είναι 0.7°C. Όταν οι τρεις τοίχοι περιλαμβάνουν PCM (διάγραμμα 6.2.6), η θερμοκρασία αέρα του χώρου κυμαίνεται μεταξύ τουλάχιστον 17.2°C και

μέγιστο 28.1°C. Συγκρίνοντας τις κατανομές των θερμοκρασιών παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασιακή απόκλιση των εσωτερικών θερμοκρασιών είναι 0.5°C. Επομένως, τα διαγράμματα 6.2.5-6.2.6 δείχνουν καλή σύγκλιση αποτελεσμάτων μεταξύ των προσομοιωμένων θερμοκρασιών του χώρου και των θερμοκρασιών του πειράματος. Η απόκλιση των θερμοκρασιών είναι συγκρίσιμη με τη μελέτη των Alam et al. [6.18] όπου παρατηρήθηκε απόκλιση 3% σε °C μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και του αριθμητικού μοντέλου του λογισμικού EnergyPlus. Ως εκ τούτου, το Type 1270 (PCM) του TRNSYS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς κτηρίων και των οφελών της ενσωμάτωσης των PCM σε αυτά.



Διάγραμμα 6.2.5: Προφίλ θερμοκρασίας του χώρου χωρίς PCM ενός 24ώρου για την ενδιάμεση περίοδο α) από πείραμα, β) από προσομοίωση στο TRNSYS.



Διάγραμμα 6.2.6: Προφίλ θερμοκρασίας του χώρου με PCM ενός 24ώρου για την ενδιάμεση περίοδο α) από πείραμα, β) από προσομοίωση στο TRNSYS.

6.2.2 Προσομοιώσεις κτηρίων με Υλικά Αλλαγής Φάσης (PCM)

6.2.2.1 Κτήριο στην Αθήνα με PCM στην οροφή

A) Γενικά

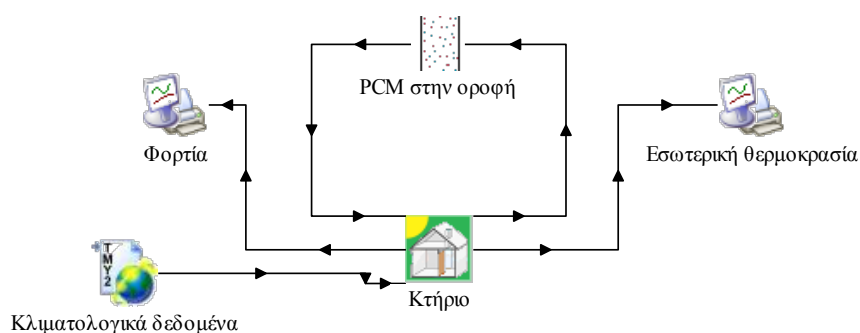
Ο κτηριακός τομέας είναι ένας από τους τομείς που καταναλώνει περισσότερο ενέργεια και είναι υπεύθυνος για το περίπου 30%~40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Η αξιοποίηση εναλλακτικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον κτηριακό τομέα είναι ένα κρίσιμο ζήτημα που πρέπει να επιτευχθεί η βιωσιμότητά του [6.20]. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας αποτελεί σημαντικό όπλο για τη μείωση της χρήσης ηλεκτρισμού και ορυκτών καυσίμων στον κτηριακό τομέα [6.21].

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια πλούσια πηγή ενέργειας η οποία μπορεί να μετατραπεί είτε σε χρήσιμη θερμότητα είτε σε ηλεκτρική ενέργεια. Η Ελλάδα είναι μια χώρα με υψηλό ηλιακό δυναμικό που κυμαίνεται από 1400 kWh/m² έως 1800 kWh/m² ετησίως. Στην Αθήνα, το ηλιακό δυναμικό είναι περίπου 1600 kWh/m² [6.22] και είναι μια πολλά υποσχόμενη τιμή για την κάλυψη των ενεργειακών φορτίων με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας.

Η σωστή εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας από το περίβλημα του κτηρίου μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) στα εξωτερικά τοιχώματα [6.23]. Το PCM βοηθάει στην σωστή διαχείριση ενέργειας της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας προκειμένου να μειωθούν τα ενεργειακά φορτία του κτηρίου. Η χρήση των PCM εισήχθη από τη δεκαετία του 1980 [6.24] και από τότε εμφανίζει μεγάλη εξέλιξη [6.25]. Η σωστή θέση του PCM στα δομικά υλικά είναι ένα πολύ κρίσιμο θέμα και καθορίζει τα περιθώρια βελτίωσης της απόδοσης. Στη βιβλιογραφία, εξετάστηκαν διαφορετικές θέσεις για το στρώμα PCM, κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου [6.26], κοντά στην εσωτερική επιφάνεια τοίχου [6.27] και κοντά στο ενδιάμεσο στρώμα μόνωσης [6.15]. Επιπλέον, υπάρχουν μελέτες σχετικά με κτήρια με PCM που έχουν προσομοιωθεί στο TRNSYS. Οι Stritih et al. [6.28] εξέτασαν τη χρήση του PCM στα δομικά στοιχεία ενός κτηρίου προκειμένου να καταστεί το κτήριο σχεδόν μηδενικής ενέργειας. Επιπλέον διαπίστωσαν ότι τα δεδομένα καιρού παίζουν σημαντικό ρόλο στη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου. Οι Fateh et al. [6.29] εξέτασαν τη χρήση του PCM σε ένα κτήριο ελαφριάς κατασκευής και βρήκαν ότι η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης του PCM ήταν 23°C. Οι Lu et al. [6.30] διαπίστωσαν ότι

η χρήση PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης οδηγεί σε μείωση κατά 6% των φορτίων θέρμανσης του κτηρίου. Οι Derradji et al. [6.31] διαπίστωσαν ότι η χρήση του PCM σε έναν τοίχο είναι σε θέση να αυξήσει την εσωτερική θερμοκρασία έως 4°C το χειμώνα και να μειώσει την εσωτερική θερμοκρασία έως 7°C το καλοκαίρι. Υπάρχουν και άλλες μελέτες των PCM σε τοίχους και σε οροφές κτηρίων που έχουν αναφερθεί στις παραγράφους 5.2.1 και 5.2.2 της παρούσας διατριβής.

Στην παρούσα ενότητα, η ενσωμάτωση ενός στρώματος PCM στην οροφή ενός κτηρίου στην Αθήνα αξιολογείται θεωρητικά χρησιμοποιώντας λογισμικό TRNSYS 17. Επιπλέον παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα θερμικά και ψυκτικά φορτία και τα προφίλ της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου, χωρίς και με δύο διαφορετικής θερμοκρασίας τήξης PCM στην οροφή του. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της μελέτης έχουν δημοσιευθεί από τη συγγραφέα [6.19]. Η εικόνα 6.2.7 δείχνει τη διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το στρώμα PCM στην οροφή στο TRNSYS.



Εικόνα 6.2.7: Η διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM.

B) Περιγραφή κτηρίου και χρησιμοποιούμενων PCM

Το εξεταζόμενο κτήριο είναι ένα γραφείο, το οποίο έχει εμβαδόν δαπέδου 100 m² και αποτελείται από τέσσερις εξωτερικούς τοίχους, ενώ δεν υπάρχουν εσωτερικοί τοίχοι. Οι παράμετροι του εξεταζόμενου κτηρίου έχουν τυπικές τιμές οι οποίες συνήθως εφαρμόζονται στις προσομοιώσεις θερμικής συμπεριφοράς κτηρίων στην Ελλάδα. Το σχήμα του δαπέδου του κτηρίου είναι ένα τετράγωνο και είναι προσανατολισμένο προς τις τέσσερις κατευθύνσεις. Τα διπλά παράθυρα τοποθετούνται στο νότο, ανατολικά και δυτικά. Υπάρχουν παράθυρα σε όλες τις κατευθύνσεις εκτός από τη βόρεια κατεύθυνση, διότι δεν υπάρχει άμεση διείσδυση του ήλιου από τη βόρεια κατεύθυνση μέσα στο κτήριο. Το πρόγραμμα λειτουργίας του κτηρίου αρχίζει στις 8:00 π.μ. και τελειώνει στις 18:00 μ.μ. για όλη την εξεταζόμενη περίοδο. Κατά τις ώρες αυτές, θεωρείται ότι 5 άτομα

εργάζονται μέσα στο κτήριο, το φορτίο του εξοπλισμού είναι ίσο με 250W και το φορτίο φωτισμού είναι περίπου 500W.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για το χειμώνα οι εναλλαγές αέρα ανά ώρα είναι 0.8 και το καλοκαίρι 2 για να μην υπερθερμανθεί το κτήριο, ιδιαίτερα με την χρήση του PCM. Είναι σημαντικό να δηλωθεί ότι οι επιθυμητές εσωτερικές θερμοκρασίες ρυθμίστηκαν να είναι 20°C το χειμώνα και στους 26°C το καλοκαίρι σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς [6.32-6.33]. Ο Πίνακας 6.2.5 δίνει όλες τις παραμέτρους του εξεταζόμενου κτηρίου [6.4] αλλά και των χρησιμοποιούμενων PCM [6.17]. Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν και συγκρίθηκαν τα ΒιοPCM με θερμοκρασία τήξης 23°C και 25°C (θερμοκρασίες που είναι εντός των ορίων της θερμικής άνεσης), λόγω της εφαρμογής των PCM καθ' όλη τη διάρκεια τους έτους, χειμώνα και καλοκαίρι, στην Αθήνα. Η θέση του PCM στην οροφή είναι μετά την μόνωση και πριν από το σοβά, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.2.8. Ο πίνακας 6.2.6 δίνει τα υλικά τοιχοποιίας και τα πάχη τους ενώ ο πίνακας 6.2.7 δίνει τις φυσικές τους ιδιότητες.

Πίνακας 6.2.5: Παράμετροι κτηρίου [6.4] και χρησιμοποιούμενων PCM [6.17].

	<i>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ</i>	<i>ΤΙΜΕΣ</i>
ΚΤΗΡΙΟ	Ύψος κτηρίου	3 m
	Εμβαδόν κτηρίου	100 m ²
	Επιφάνεια διπλού υαλοπίνακα στο νότο	6 m ²
	Επιφάνεια διπλού υαλοπίνακα στην ανατολή	3 m ²
	Επιφάνεια διπλού υαλοπίνακα στη δύση	3 m ²
	Συντελεστής σκίασης	60%
	Αερισμός	0.8-2 εναλλαγές αέρα/ ώρα
	Φορτίο εξοπλισμού	250 W
	Αριθμός ατόμων	5
	Φωτισμός	500 W
	Συντελεστής θερμοπερατότητας των τοίχων	0.510 W/m ² K
	Συντελεστής θερμοπερατότητας των παραθύρων	1.4 W/m ² K
	Συντελεστής σκίασης των παραθύρων	0.60
	Συντελεστής θερμοπερατότητας της οροφής	0.467 W/m ² K
Συντελεστής θερμοπερατότητας του δαπέδου	0.648 W/m ² K	

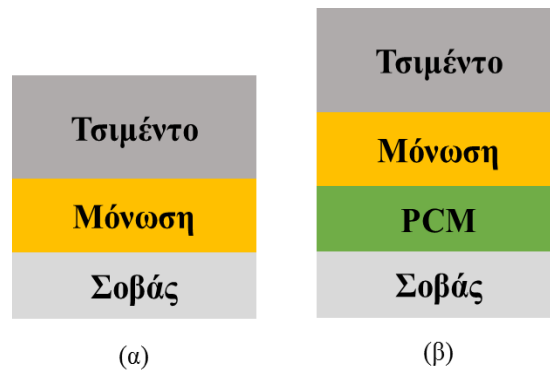
PCM (Q23/M91)	Θερμοκρασία τήξης	23°C
	Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης	210 kJ/kg
	Χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας	1033 kJ/m ² (91 Btu/ft ²)
	Θερμική αγωγιμότητα	0.15-2.5W/mK
	Πάχος	20 mm
	Θερμοκρασία στερεοποίησης	18.5°C
PCM (Q25/M91)	Θερμοκρασία τήξης	25°C
	Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης	210 kJ/kg
	Χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας	1033 kJ/m ² (91 Btu/ft ²)
	Θερμική αγωγιμότητα	0.15-2.5W/mK
	Πάχος	20 mm
	Θερμοκρασία στερεοποίησης	21°C

Πίνακας 6.2.6: Υλικά τοιχοποιίας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον.

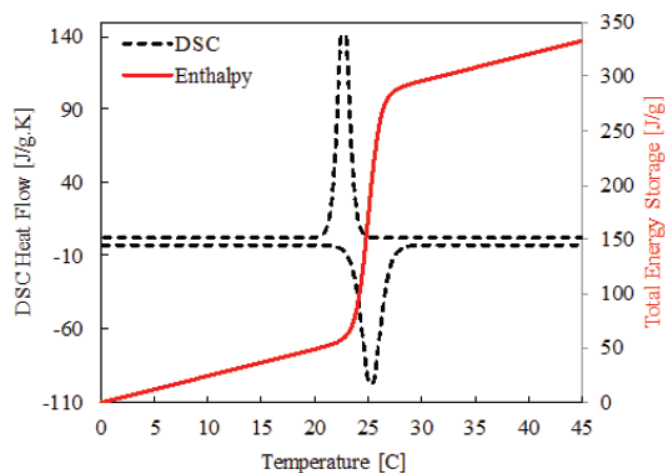
	<i>Δομικά Υλικά</i>	<i>Πάχη (mm)</i>
<i>Δάπεδο</i>	Δάπεδο	10
	Μόνωση	60
	Τσιμέντο	240
<i>Τοίχοι</i>	Σοβάς	15
	Τούβλο	120
	Μόνωση	60
	Τούβλο	120
	Σοβάς	15
<i>Οροφή</i>	Σοβάς	15
	Μόνωση	70
	Τσιμέντο	240

Πίνακας 6.2.7: Φυσικές ιδιότητες υλικών του κτηρίου [6.4].

Δομικά Υλικά	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kgK)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)
Τσιμέντο	1400	1000	1.13
Σοβάς	2000	1000	1.39
Μόνωση	25	1500	0.04
Δάπεδο	800	1000	0.07
Τούβλο	1800	1000	0.89



Εικόνα 6.2.8: Στρώματα οροφής α) χωρίς PCM β) με PCM.



Εικόνα 6.2.9: Καμπύλες DSC και ενθαλπίας του PCM (Q25/M91) [6.17].

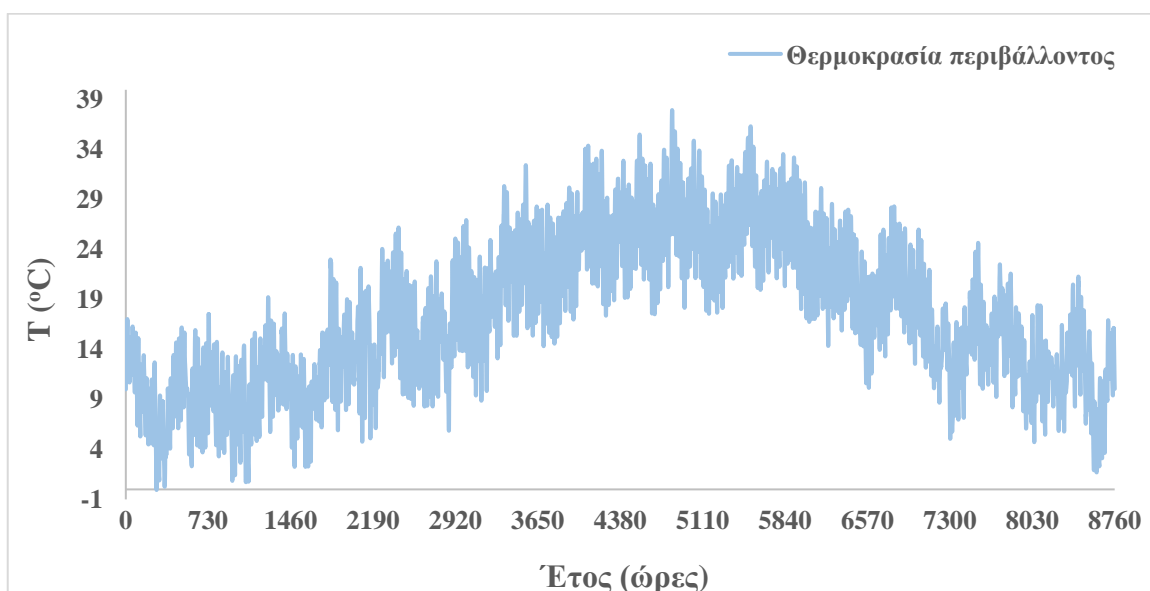
Γ) Προσομοίωση και αποτελέσματα

1. Υπολογισμός και σύγκριση θερμικών και ψυκτικών φορτίων

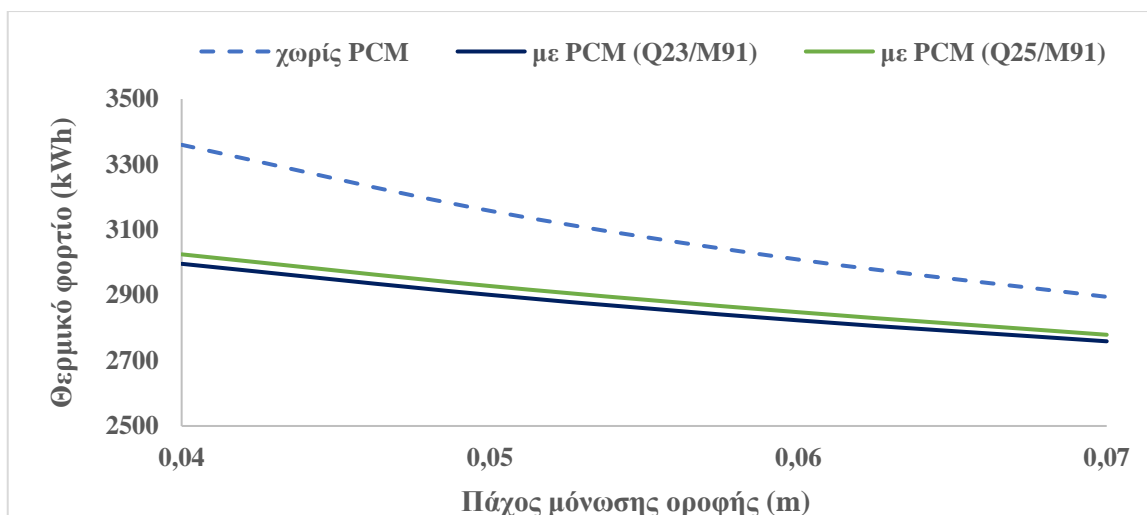
Το εξεταζόμενο κτήριο, με και χωρίς PCM, σχεδιάστηκε και προσομοιάστηκε στο TRNSYS 17. Το χρονικό βήμα επιλέχθηκε να είναι τα 10 λεπτά για συγκλίνοντα αποτελέσματα.

Τα διαγράμματα 6.2.11 και 6.2.12 δείχνουν τα ετήσια θερμικά φορτία και τα ετήσια ψυκτικά φορτία αντίστοιχα με και χωρίς PCM (Q23/M91, Q25/M91). Πιο συγκεκριμένα, το διάγραμμα 6.2.11 απεικονίζει τη μείωση των θερμικών φορτίων που με τη χρήση του Q23/M91 φτάνει το 10.8% και με τη χρήση του Q25/M91 φτάνει το 9.9%. Το διάγραμμα 6.2.12 απεικονίζει τη μείωση των ψυκτικών φορτίων που με τη χρήση του Q23/M91 φτάνει το 10.2% και με τη χρήση του Q25/M91 φτάνει το 10.7%. Το χειμώνα, το BioPCM Q23/M91 είναι λίγο καλύτερο από το BioPCM Q25/M91. Το καλοκαίρι συμβαίνει το αντίθετο και η αιτία είναι το γεγονός ότι το BioPCM Q25/M91 λιώνει σε υψηλότερη θερμοκρασία (25°C) από ότι το BioPCM Q23/M91 (23°C).

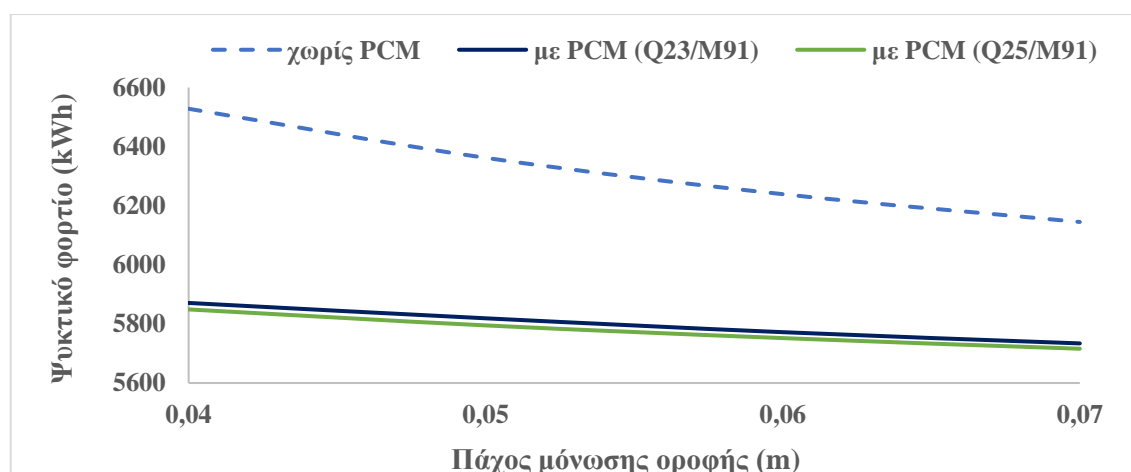
Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο μικρότερο πάχος μόνωσης έχει η οροφή, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το PCM λειτουργεί καλύτερα με μικρότερο πάχος μόνωσης γιατί το μεγαλύτερο εμποδίζει την ροή θερμότητας.



Διάγραμμα 6.2.10: Θερμοκρασία περιβάλλοντος όλου του έτους στην Αθήνα.



Διάγραμμα 6.2.11: Ετήσια θερμικά φορτία.

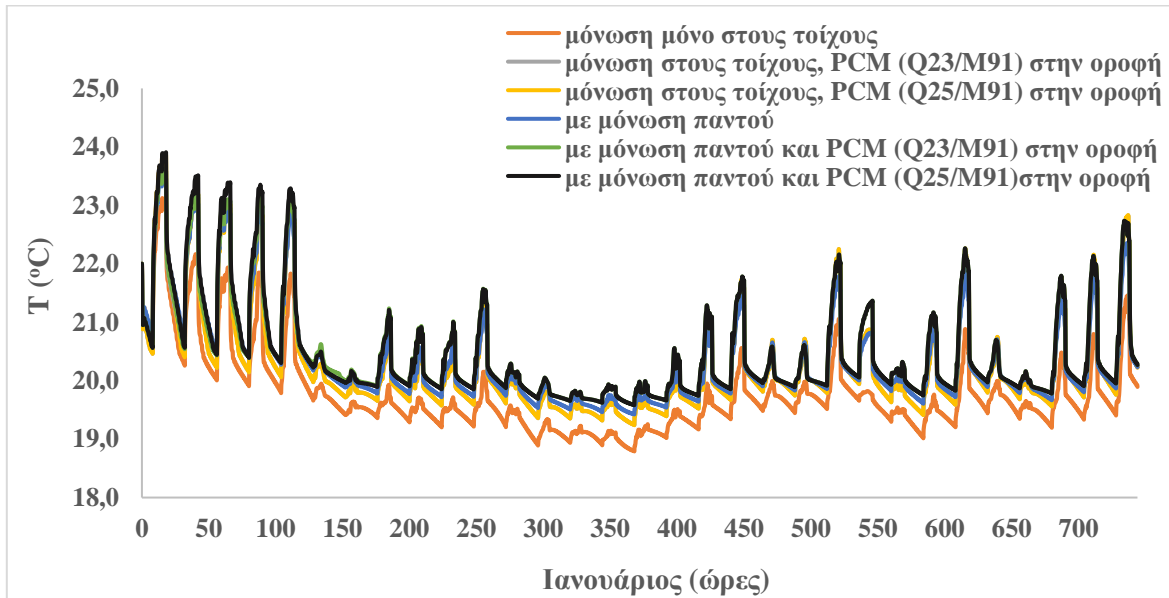


Διάγραμμα 6.2.12: Ετήσια ψυκτικά φορτία.

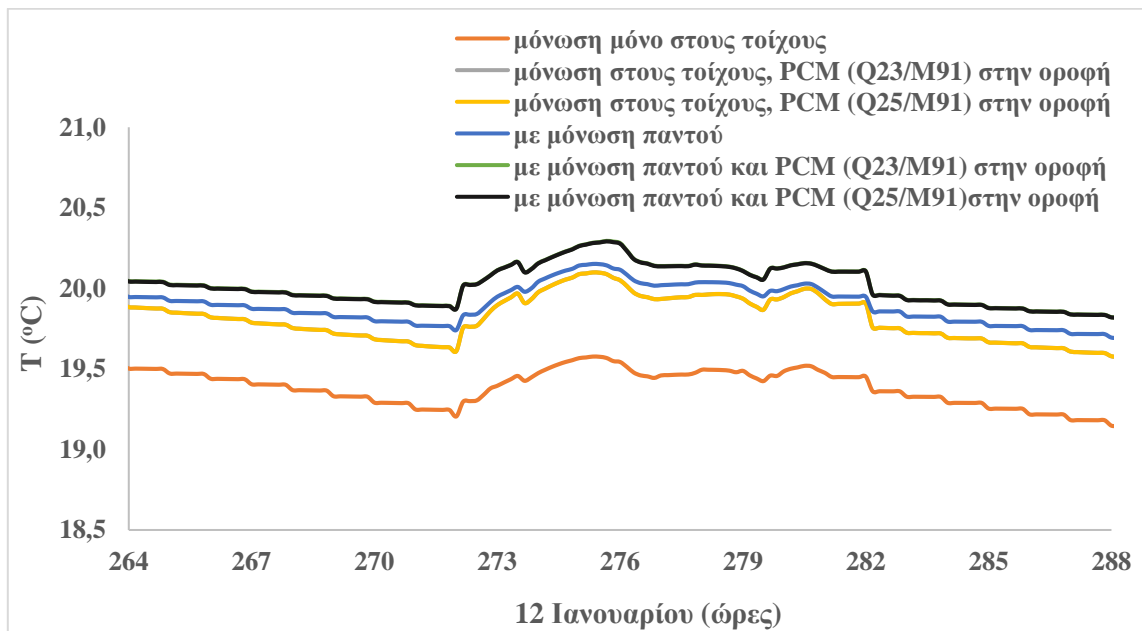
2. Διακύμανση εσωτερικών θερμοκρασιών

Οι υπολογισμοί έγιναν για τον ψυχρότερο μήνα (Ιανουάριος) και για τον θερμότερο μήνα (Ιούλιο) του έτους στην Αθήνα, σύμφωνα με το διάγραμμα 6.2.10. Η πιο κρύα μέρα του έτους είναι η 12^η Ιανουαρίου και η πιο ζεστή είναι η 22^η Ιουλίου. Το χειμώνα, η θερμοκρασία στο γραφείο πρέπει να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κοντά στα όρια της θερμικής άνεσης. Το διάγραμμα 6.2.13 δείχνει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις τον ψυχρότερο μήνα του έτους, δηλαδή τον Ιανουάριο. Παρατηρούμε ότι η υψηλότερη θερμοκρασία, στα όρια της θερμικής άνεσης, είναι με τον συνδυασμό μόνωσης και PCM στην οροφή. Η διαφορά των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα δύο PCM, Q23/M91 και Q25/M91 είναι ανεπαίσθητη. Τα αποτελέσματα είναι πιο ορατά στο διάγραμμα

6.2.14, όπου μελετήσαμε την ψυχρότερη ημέρα του έτους, δηλαδή την 12^η Ιανουαρίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας μελετήθηκαν και τα 4 πάχη μονώσεων (0.04m, 0.05m, 0.06m, 0.07m) της οροφής αλλά λόγω ότι συνέπιπταν οι καμπύλες, στα διαγράμματα που ακολουθούν η μόνωση οροφής είναι 0.05m.



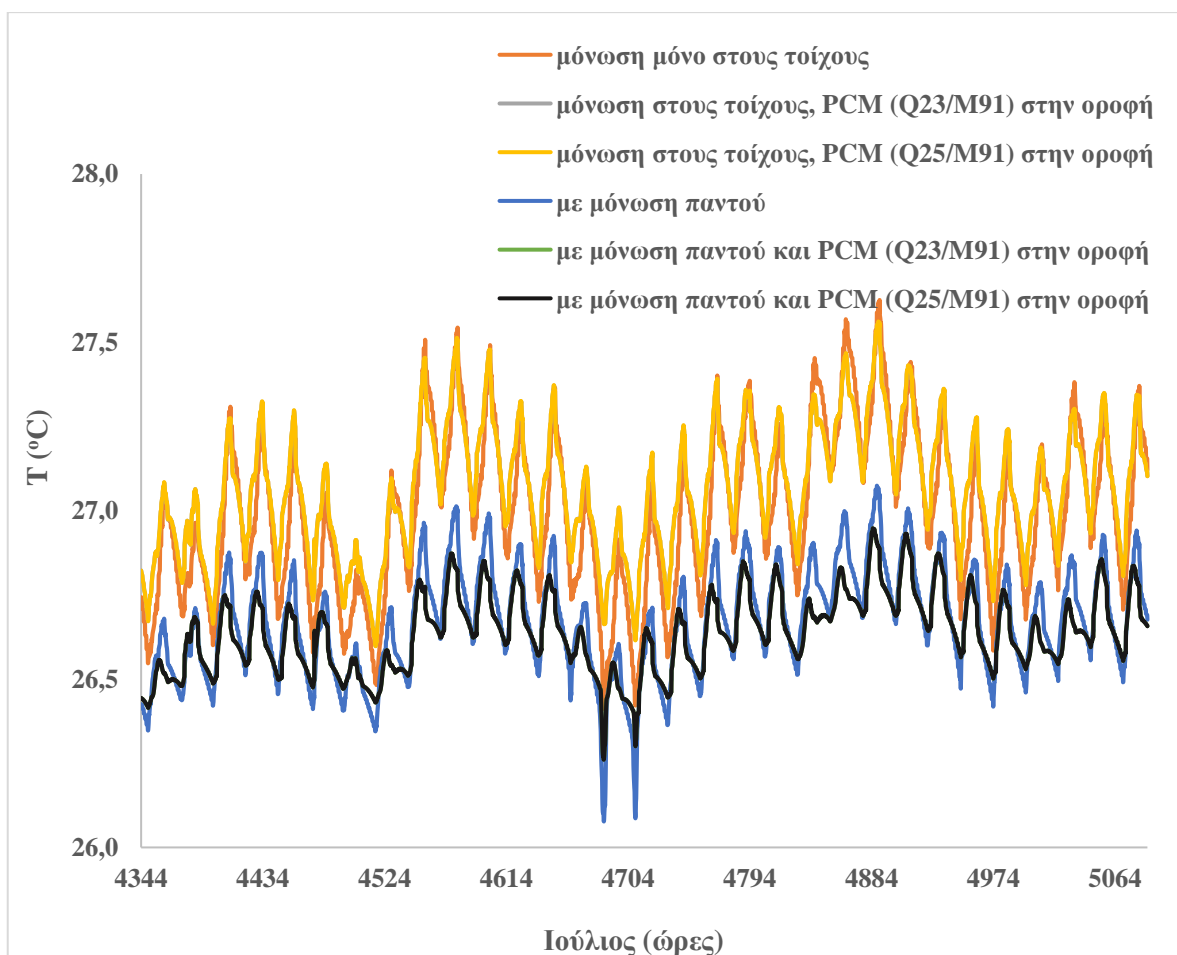
Διάγραμμα 6.2.13: Διακυμάνσεις της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις τον ψυχρότερο μήνα του έτους, τον Ιανουάριο.



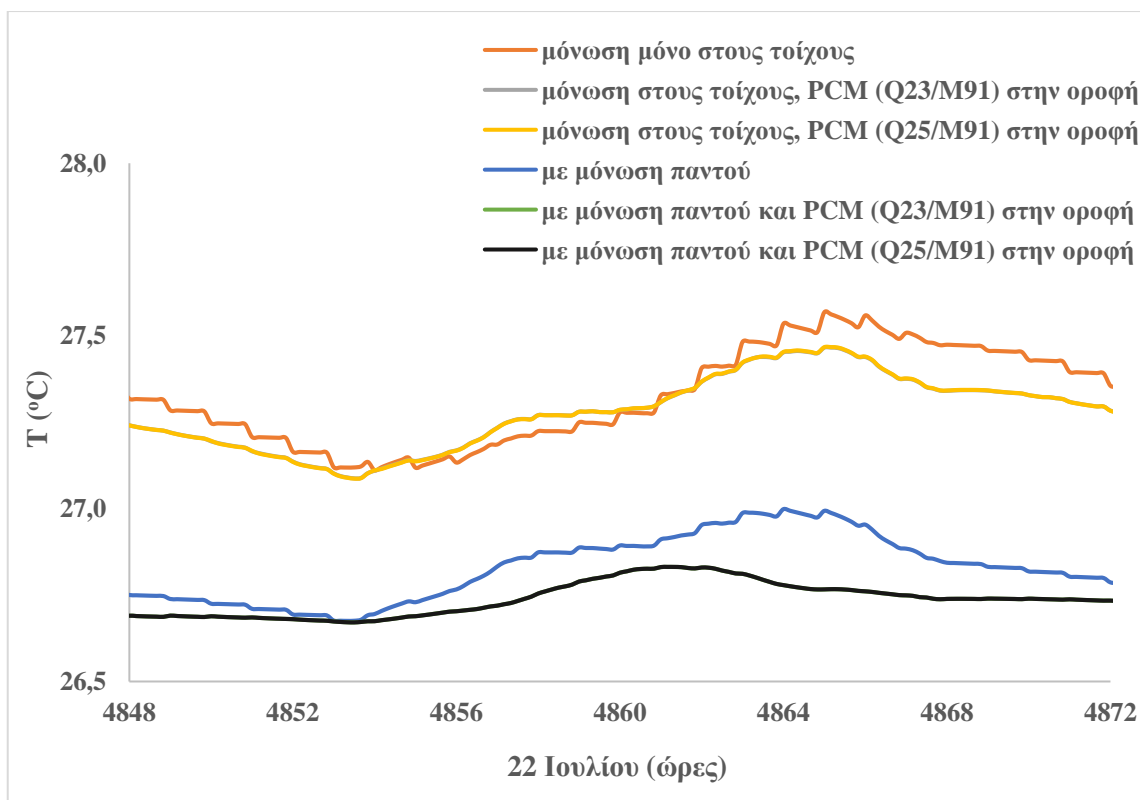
Διάγραμμα 6.2.14: Διακύμανση της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις την πιο κρύα ημέρα του έτους, την 12^η Ιανουαρίου.

Σε αντίθεση το καλοκαίρι, η θερμοκρασία στο γραφείο πρέπει να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κοντά στα όρια της θερμικής άνεσης. Το διάγραμμα 6.2.15 δείχνει τη διακύμανση της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις τον θερμότερο μήνα του έτους, τον Ιούλιο. Παρατηρούμε ότι η καλύτερη περιοχή θερμοκρασιών με τις μικρότερες διακυμάνσεις επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μόνωση σε συνδυασμό με PCM στην οροφή. Η διαφορά των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα PCM Q23/M91 και Q25/M91 είναι επίσης ανεπαίσθητη.

Τα αποτελέσματα είναι πιο ορατά στο διάγραμμα 6.2.16, όπου μελετήσαμε τη θερμότερη ημέρα του έτους, δηλαδή την 22^η Ιουλίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα των PCM το καλοκαίρι είναι ότι εάν χρησιμοποιούνται χωρίς διείσδυση αέρα, μπορεί να υπερθερμανθεί το κτήριο κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Διάγραμμα 6.2.15: Διακυμάνσεις της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις τον θερμότερο μήνα του έτους, τον Ιούλιο.



Διάγραμμα 6.2.16: Διακύμανση της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις την πιο ζεστή ημέρα του έτους, την 22^η Ιουλίου.

Δ) Οικονομική αξιολόγηση

Για την οικονομική αξιολόγηση αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της περιόδου αποπληρωμής. Η περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

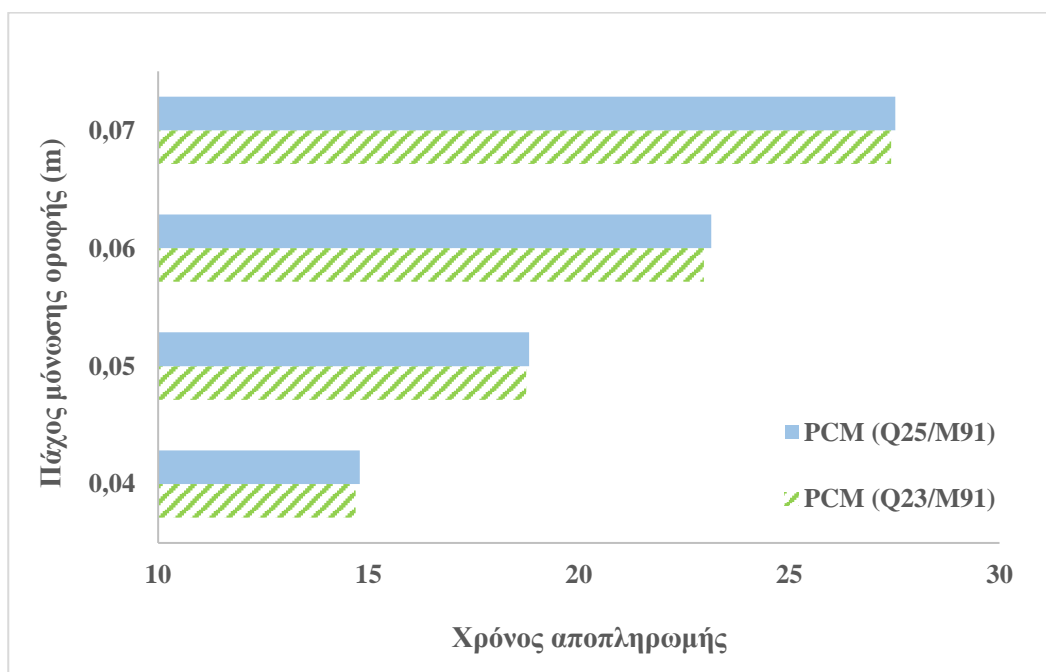
$$\text{Περίοδος αποπληρωμής} = \frac{\text{Κόστος του PCM (€)}}{\text{Τιμή ρεύματος} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \times \text{Συνολική μείωση φορτίων} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{έτος}} \right)}$$

Το κόστος και των δύο χρησιμοποιούμενων PCM υπολογίζεται περίπου σε 30 €/m² [6.34]. Η οροφή είναι 100 m² άρα το κόστος των PCM είναι 3000€. Η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος για την Ελλάδα υπολογίζεται σε 0.20 €/kWh [6.35]. Το κόστος της μόνωσης θεωρείται σταθερό οπότε δεν συνυπολογίζεται. Η συνολική ετήσια μείωση των φορτίων για διαφορετικά πάχη μόνωσης οροφής και των δύο PCM δίνονται στον πίνακα 6.2.8. Το διάγραμμα 6.2.17 δίνει τους χρόνους αποπληρωμής για όλες τις περιπτώσεις. Οι χρόνοι αποπληρωμής είναι σχεδόν οι ίδιοι και για τα δύο PCM με μια μικρή διαφορά της τάξεως του 0.4% και κυμαίνονται από 15 έως 28 έτη. Ο μικρότερος

χρόνος αποπληρωμής, τα 15 έτη, επιτυγχάνεται με πάχος μόνωσης οροφής 0.04 m γιατί σ' αυτή την περίπτωση έχουμε την μεγαλύτερη μείωση ετήσιων φορτίων. Παρόλα αυτά ο χρόνος αποπληρωμής εξαρτάται από την τιμή ρεύματος και το κόστος του PCM που μπορεί να αλλάξουν. Με μια αυξημένη τιμή κόστους του PCM ο χρόνος αποπληρωμής αυξάνεται και η επένδυση γίνεται ασύμφορη.

Πίνακας 6.2.8: Συνολική ετήσια μείωση των φορτίων για διαφορετικά πάχη μόνωσης οροφής και των δύο PCM.

Πάχος μόνωσης οροφής (m)	PCM (Q23/M91)	PCM (Q25/M91)
	Συνολική ετήσια μείωση φορτίων (kWh)	
0.04	1021	1014
0.05	800	797
0.06	653	648
0.07	547	545



Διάγραμμα 6.2.17: Χρόνος αποπληρωμής των PCM (Q23,Q25) με βάση την μείωση των ετήσιων φορτίων για διαφορετικά πάχη μόνωσης οροφής.

E) Συμπεράσματα

- Το PCM ως στρώμα της οροφής μειώνει τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτηρίου (γραφείο) και βελτιώνει την θερμική άνεση των ατόμων μέσα σ' αυτό. Η βέλτιστη περίπτωση PCM είναι όταν συνδυάζεται με μόνωση με μικρότερο πάχος. Δηλαδή με το PCM στην οροφή εξοικονομούμε ενέργεια μειώνοντας και το πάχος της μόνωσης της οροφής.
- Η μείωση των συνολικών ετήσιων φορτίων με τη χρήση και των δύο PCM (Q23/M91 και Q25/M91) φτάνει περίπου το 21%. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης συγκρίνονται με άλλες μελέτες όπως φαίνεται στον πίνακα 6.2.9 και παρατηρείται μια καλή σύγκλιση αποτελεσμάτων.
- Το χειμώνα, το BioPCM Q23/M91 είναι ελάχιστα καλύτερο από το BioPCM Q25/M91. Το καλοκαίρι συμβαίνει το αντίθετο και η αιτία είναι το γεγονός ότι το BioPCM Q25/M91 λιώνει σε υψηλότερη θερμοκρασία (25°C) από ότι το BioPCM Q23/M91 (23°C).
- Η καλύτερη περιοχή θερμοκρασιών με τις μικρότερες διακυμάνσεις επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μόνωση σε συνδυασμό με PCM στην οροφή.
- Για τη διακύμανση των θερμοκρασιών χειμώνα-καλοκαίρι, η διαφορά των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα PCM Q23/M91 και Q25/M91 είναι ανεπαίσθητη.
- Οι χρόνοι αποπληρωμής είναι σχεδόν οι ίδιοι και για τα δύο PCM με μια μικρή διαφορά της τάξεως του 0.4% και κυμαίνονται από 15 έως 28 έτη.
- Ο μικρότερος χρόνος αποπληρωμής, τα 15 έτη, επιτυγχάνεται με πάχος μόνωσης οροφής 0.04 m γιατί σ' αυτή την περίπτωση έχουμε τη μεγαλύτερη μείωση ετήσιων φορτίων.

Τέλος, είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι η μόνωση λειτουργεί αυξάνοντας την θερμική αντίσταση ενός κτηρίου, επιβραδύνοντας τη ροή θερμότητας εσωτερικά και εξωτερικά της τοιχοποιίας του κτηρίου. Το PCM λειτουργεί αυξάνοντας τη θερμική μάζα ενός κτηρίου, η οποία όχι μόνο μπορεί να μειώσει την ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής, αλλά μπορεί επίσης να μειώσει τις σχετικά μεγάλες εσωτερικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Έτσι λοιπόν, τα PCM δεν προορίζονται για να αντικαταστήσουν τη μόνωση αλλά για να την συμπληρώσουν.

Πίνακας 6.2.9: Αποτελέσματα άλλων μελετών για την επικύρωση των αποτελεσμάτων.

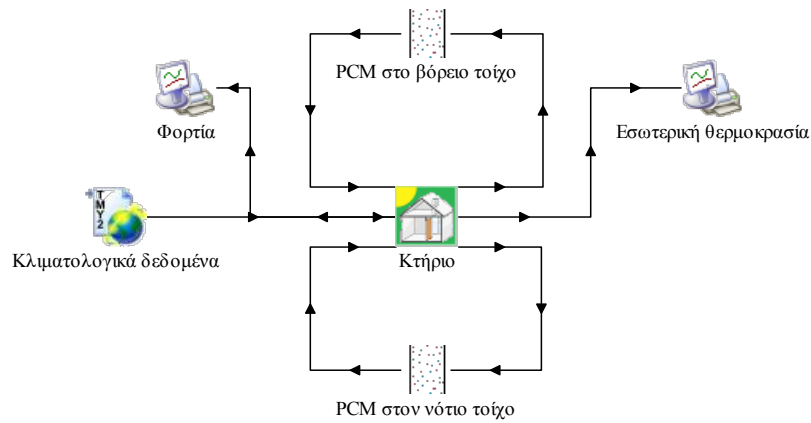
Συγγραφείς	Είδος μελέτης	Περιοχή	PCM στο κτήριο	Εξοικονόμηση ενέργειας (%)	
				Θερμικά Φορτία	Ψυκτικά Φορτία
<i>Alam et al. [6.18]</i>	Προσομοίωση και πείραμα	Sydney, Αυστραλία	PCM στην οροφή κτηρίου	22.9%	
<i>Jayalath et al. [6.13]</i>	Προσομοίωση και πείραμα	Sydney, Αυστραλία	PCM στην οροφή κτηρίου	17.8%	13.4%
<i>Παρούσα μελέτη</i>	Προσομοίωση	Αθήνα, Ελλάδα	PCM στην οροφή κτηρίου	~21%	

6.2.2.2 Κτήριο στην Αθήνα με PCM στο νότιο και βόρειο τοίχο

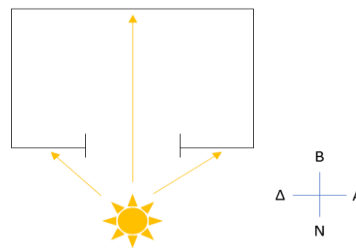
A) Γενικά

Στην παρούσα ενότητα, η ενσωμάτωση ενός στρώματος PCM σε διαφορετικές θέσεις στο νότιο και στο βόρειο τοίχο για ένα κτήριο (γραφείο) στην Αθήνα αξιολογείται θεωρητικά χρησιμοποιώντας το λογισμικό TRNSYS 17. Η πρωτοτυπία αυτής της εργασίας βασίζεται στη εξέταση διαφορετικών σεναρίων με τη θέση του PCM και την αλλαγή του πάχους της μόνωσης στο νότιο και στο βόρειο τοίχο. Σε κάθε περίπτωση υπολογίζονται τα θερμικά και τα ψυκτικά φορτία και τα προφίλ της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου.

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της μελέτης έχουν δημοσιευθεί από τη συγγραφέα [6.36-6.37]. Η εικόνα 6.2.18α δείχνει τη διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM στους τοίχους στο TRNSYS και η εικόνα 6.2.18β δείχνει το σχεδιάγραμμα του κτηρίου με τον προσανατολισμό των εξεταζόμενων τοίχων.



(α)



(β)

Εικόνα 6.2.18: (α) Η διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM, (β) το σχεδιάγραμμα του κτηρίου με τον προσανατολισμό των εξεταζόμενων τοίχων.

B) Περιγραφή κτηρίου και χρησιμοποιούμενου PCM

Το εξεταζόμενο κτήριο είναι και σε αυτή την ενότητα ένα γραφείο στην Αθήνα, ακριβώς ίδιο με την προηγούμενη μελέτη στην ενότητα 6.2.2.1B, με ίδιες συνθήκες λειτουργίας και ίδια υλικά τοιχοποιίας. Οι επιθυμητές εσωτερικές θερμοκρασίες ρυθμίστηκαν και εδώ να είναι 20°C το χειμώνα και στους 26°C το καλοκαίρι σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς [6.32-6.33]. Διαφορετικές περιπτώσεις εξετάζονται σ' αυτή τη μελέτη:

Περίπτωση 1^η : Το στρώμα του PCM βρίσκεται μόνο στο νότιο τοίχο πριν τη μόνωση, δηλαδή προς το εξωτερικό περιβάλλον.

Περίπτωση 2^η: Το στρώμα του PCM βρίσκεται μόνο στο νότιο τοίχο μετά από τη μόνωση, δηλαδή προς το εσωτερικό περιβάλλον.

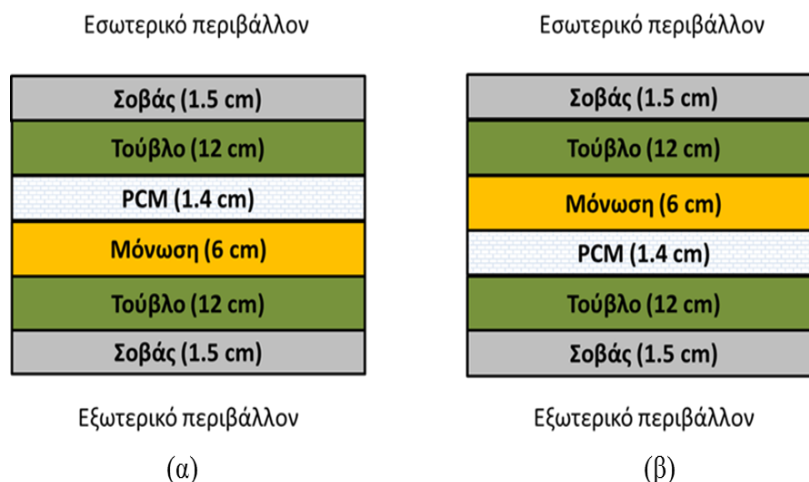
Περίπτωση 3^η : Το στρώμα του PCM βρίσκεται στο νότιο και το βόρειο τοίχο μετά από τη μόνωση, προς το εσωτερικό περιβάλλον.

Περίπτωση 4^η : Το στρώμα του PCM βρίσκεται στο νότιο τοίχο μετά από τη μόνωση και στο βόρειο τοίχο πριν τη μόνωση.

Γενικά, ένα PCM με υψηλότερη θερμοκρασία τήξης είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, σε αντίθεση με ένα PCM με χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης το οποίο είναι πιο αποτελεσματικό κατά τη χειμερινή περίοδο [6.18]. Ως εκ τούτου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η αποτελεσματικότητα του PCM εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές καιρικές συνθήκες. Έτσι, ένα PCM με υψηλότερη θερμοκρασία τήξης θα είναι πιο αποτελεσματικό στη ζεστή εύκρατη κλιματική ζώνη και ένα PCM με χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης θα έχει καλύτερες επιδόσεις στη ψυχρή και μέτρια κλιματική ζώνη [6.18]. Επιπλέον, η επιλογή ενός PCM εξαρτάται από τη θερμοκρασία ρύθμισης του θερμοστάτη του κτηρίου μαζί με το τοπικό κλίμα [6.18]. Για παράδειγμα, όταν η επιθυμητή θερμοκρασία θέρμανσης και ψύξης του θερμοστάτη είναι 20°C και 26°C αντίστοιχα, τότε ένα PCM με θερμοκρασία τήξης 27°C βρίσκεται εκτός του εύρους του θερμοστάτη. Όταν η εσωτερική θερμοκρασία του κτηρίου ήταν πάνω από 27°C, τότε το PCM 27 θα ήταν σε υγρή φάση. Καθώς το σημείο ρύθμισης θερμοκρασίας ψύξης είναι 26°C, απαιτείται κατανάλωση ενέργειας για τη ψύξη και τη μείωση της θερμοκρασίας στους 26°C. Το υγρό PCM 27 θα έπρεπε να στερεοποιηθεί για να μειώσει τη θερμοκρασία στους 26°C, το οποίο με τη σειρά του, θα έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση επιπλέον ενέργειας και χαμηλότερη απόδοση στην περίπτωση αυτή του PCM με θερμοκρασία τήξης 27°C.

Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε το BioPCM με θερμοκρασία τήξης 25°C, δηλαδή μια μέση θερμοκρασία από τις επιλεγόμενες λόγω της εφαρμογής του PCM καθ' όλη τη διάρκεια τους έτους στην Αθήνα που είναι μια μεσογειακή περιοχή με ήπιο χειμώνα και ζεστό καλοκαίρι [6.38-6.39]. Επιπλέον, η θερμοκρασία τήξης του PCM βρίσκεται και εντός των επιθυμητών εσωτερικών θερμοκρασιών.

Η θέση του PCM στους τοίχους (νότιο και βόρειο) είναι μετά ή πριν τη μόνωση όπως φαίνεται στην εικόνα 6.2.19. Για τη μελέτη επιλέχθηκε, πρώτον ο νότιος τοίχος γιατί γνωρίζουμε ότι οι κατακόρυφες επιφάνειες νοτίου προσανατολισμού δέχονται κατά τη διάρκεια της ημέρας τη μεγαλύτερη ολική ακτινοβολία σε σχέση με τις υπόλοιπες, και δεύτερον ο βόρειος τοίχος γιατί βρίσκεται απέναντι από το νότιο και δέχεται τη διάχυτη ακτινοβολία από αυτόν.



Εικόνα 6.2.19: Στρώματα τοίχων α) με PCM μετά τη μόνωση β) με PCM πριν τη μόνωση.

Γ) Προσομοίωση και αποτελέσματα

1. Κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές περιπτώσεις, με και χωρίς PCM

Πρώτον, εξετάζονται τα θερμικά και τα ψυκτικά φορτία για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.10. Τα διαγράμματα 6.2.20 και 6.2.21 δείχνουν τα ετήσια θερμικά και ψυκτικά φορτία αντίστοιχα για κάθε περίπτωση. Αυτές οι περιπτώσεις αφορούν διαφορετικούς συνδυασμούς μόνωσης και PCM στο βόρειο και νότιο τοίχο.

Για τη μείωση των θερμικών φορτίων, η καλύτερη περίπτωση είναι όταν υπάρχει μόνο μόνωση και στους δύο τοίχους, ενώ το χειρότερο σενάριο είναι η περίπτωση χωρίς μόνωση και χωρίς PCM και στους δύο τοίχους. Είναι λογικό ότι η περίπτωση χωρίς μόνωση είναι η χειρότερη γιατί η μόνωση είναι επωφελής για τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου. Πρακτικά, η μόνωση μειώνει την ‘ανταλλαγή’ θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου.

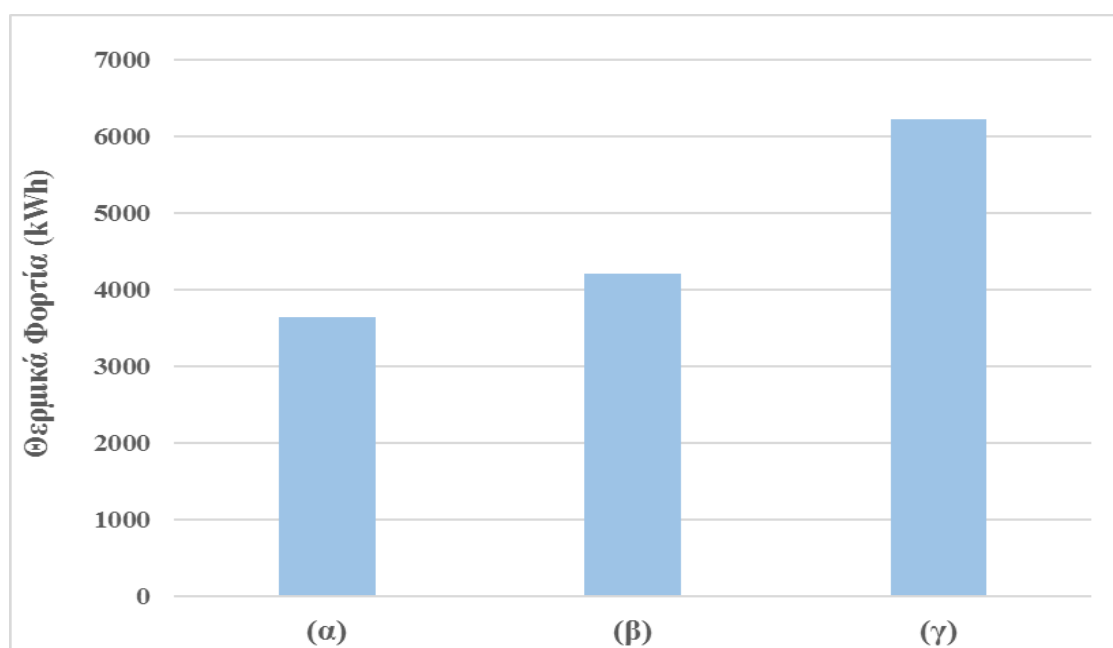
Για τη μείωση των ψυκτικών φορτίων, η καλύτερη περίπτωση είναι με τη χρήση PCM και στους δύο τοίχους, ενώ η χειρότερη είναι όταν υπάρχει μόνωση και στους δύο τοίχους. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με το γεγονός ότι το καλοκαίρι η μόνωση εγκλωβίζει τη θερμότητα μέσα στο κτήριο και δεν μπορεί να διαφύγει προς το εξωτερικό περιβάλλον εύκολα ενώ όταν χρησιμοποιούνται τα PCM στους τοίχους, αυτό δεν

συμβαίνει. Επιπλέον, η θερμική μάζα των τοίχων αυξάνεται με τη χρήση PCM και αυτό καθιστά δυνατή τη σωστή διαχείριση ενέργειας.

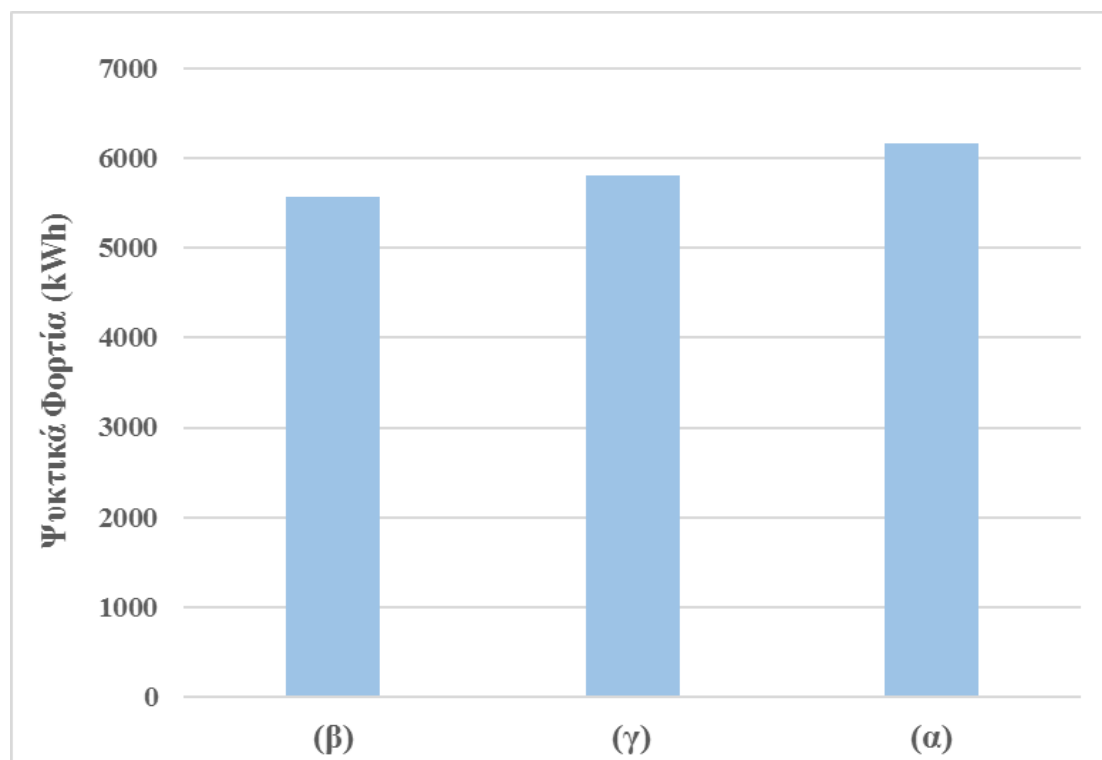
Όπως έχει ειπωθεί προηγούμενα, η θερμική μάζα (θερμοχωρητικότητα) των τοίχων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο των κτηρίων. Σε ένα κτήριο κατασκευασμένο από υλικά μικρής θερμοχωρητικότητας, οι ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος γίνονται άμεσα αισθητές στο εσωτερικό του. Αντίθετα, σε ένα κτήριο κατασκευασμένο με PCM (ελαφριές κατασκευές με μεγάλη θερμοχωρητικότητα) εξασφαλίζεται εξομάλυνση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Ο έλεγχος της εσωτερικής θερμοκρασίας σε συνδυασμό με τους βελτιωμένους μηχανισμούς ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του PCM και του περιβάλλοντος επιτυγχάνουν ικανοποιητικά όρια θερμικής άνεσης.

Πίνακας 6.2.10: Διαφορετικές περιπτώσεις στο βόρειο και νότιο τοίχο.

<i>Περιπτώσεις</i>	<i>Βόρειος τοίχος</i>	<i>Νότιος τοίχος</i>
(α)	μόνωση=0.06m	μόνωση=0.06m
(β)	PCM	PCM
(γ)	χωρίς μόνωση, χωρίς PCM	χωρίς μόνωση, χωρίς PCM



Διάγραμμα 6.2.20: Ετήσια θερμικά φορτία για τις περιπτώσεις (α), (β) και (γ).



Διάγραμμα 6.2.21: Ετήσια ψυκτικά φορτία για τις περιπτώσεις (α), (β) και (γ).

2. Κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικές περιπτώσεις με μεταβλητό πάχος μόνωσης στο νότιο τοίχο.

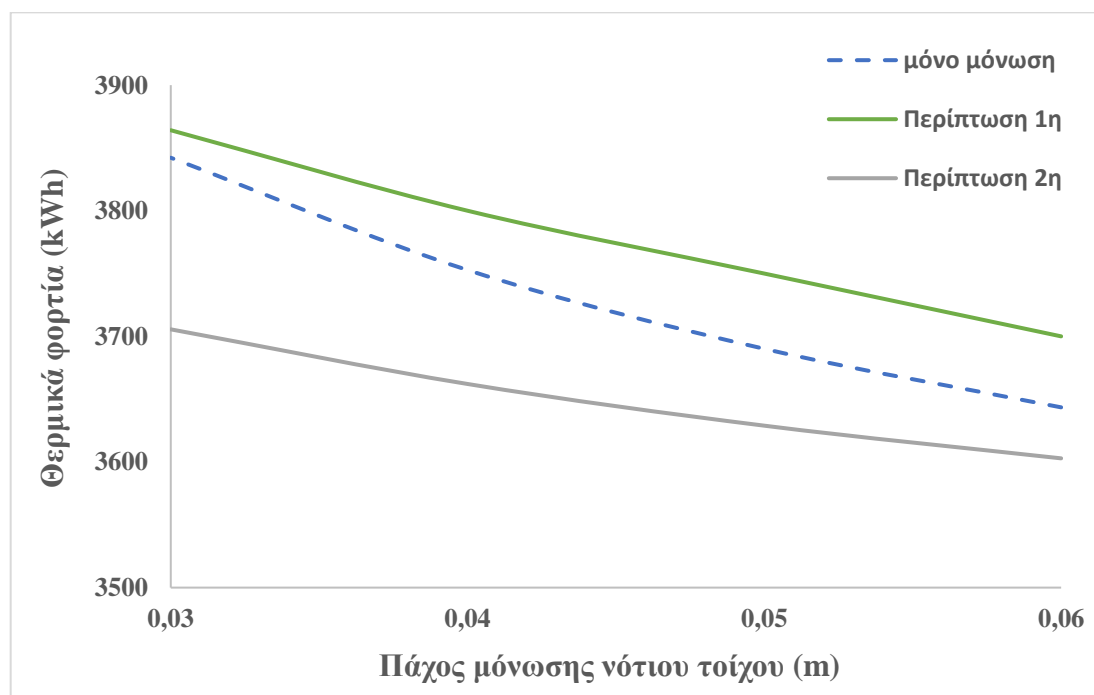
Το επόμενο βήμα είναι η διερεύνηση θερμικών και ψυκτικών φορτίων για μεταβλητό πάχος μόνωσης στο νότιο τοίχο, με και χωρίς PCM. Οι υπόλοιποι τοίχοι, η οροφή και το δάπεδο παραμένουν αμετάβλητα. Τα διαγράμματα 6.2.22 και 6.2.23 δείχνουν τα ετήσια θερμικά και ψυκτικά φορτία αντιστοίχως μόνο με μόνωση και χωρίς PCM και με στρώμα PCM που τοποθετείται πριν τη μόνωση (Περίπτωση 1^η) και μετά από τη μόνωση (Περίπτωση 2^η) μόνο στο νότιο τοίχο.

Παρατηρείται ότι ο συνδυασμός της μόνωσης και του PCM μειώνει τα θερμικά και ψυκτικά φορτία όταν το στρώμα του PCM στο νότιο τοίχο τοποθετείται μετά από τη μόνωση, προς το εσωτερικό περιβάλλον (Περίπτωση 2^η). Όταν το PCM τοποθετείται πριν τη μόνωση, δηλαδή προς το εξωτερικό περιβάλλον, τότε η μόνωση εμποδίζει τη συναλλαγή θερμότητας του PCM με το εσωτερικό περιβάλλον και συνεπώς η αποθηκευμένη ηλιακή θερμότητα του PCM δεν μπορεί να μεταδοθεί μέσα στο κτήριο. Ειδικότερα, το διάγραμμα 6.2.22 απεικονίζει τη μείωση των θερμικών φορτίων με τη χρήση του PCM μετά από τη μόνωση, η οποία κυμαίνεται από 1.15% έως 3.56%, ενώ

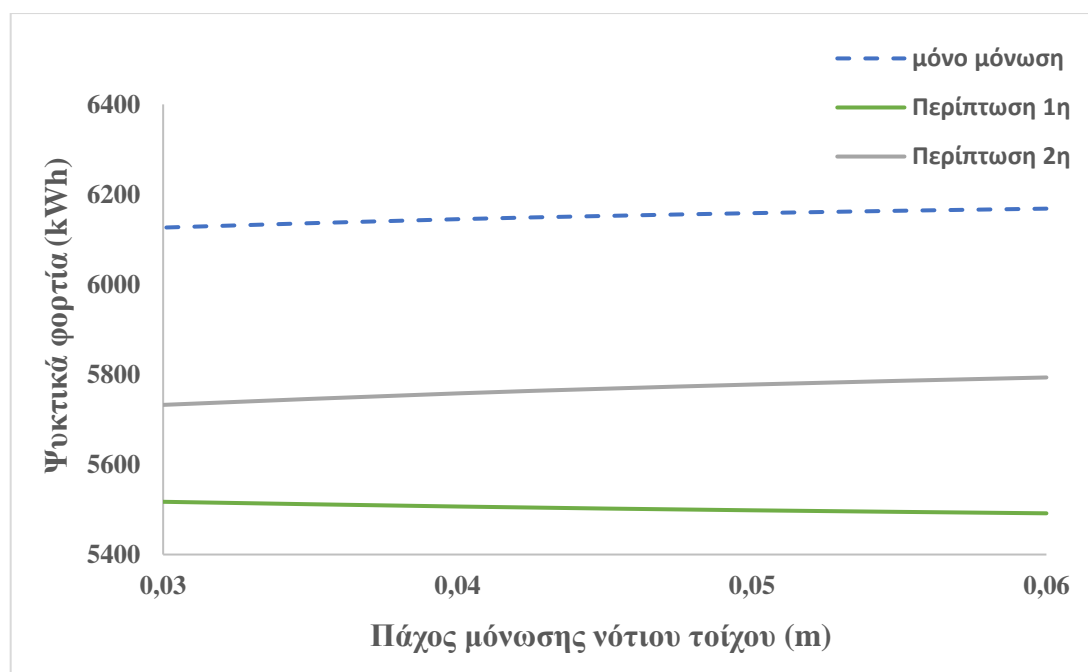
το διάγραμμα 6.2.23 απεικονίζει τη μείωση των ψυκτικών φορτίων με τη χρήση του PCM μετά τη μόνωση που κυμαίνεται από 5.80% έως 6.43%. Επομένως, η ετήσια συνολική μείωση των φορτίων κυμαίνεται περίπου μεταξύ 7% και 10%.

Το PCM στο νότιο τοίχο λειτουργεί πολύ καλύτερα το καλοκαίρι, ανεξάρτητα από τη θέση που βρίσκεται (πριν ή μετά τη μόνωση), γιατί οι θερμοκρασίες είναι πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του PCM που είναι 25°C. Έτσι, το PCM στο νότιο τοίχο λειτουργεί καλύτερα το καλοκαίρι, ανεξάρτητα από τη θέση, αλλά το χειμώνα, λειτουργεί καλύτερα όταν βρίσκεται μετά από τη μόνωση, προς το εσωτερικό περιβάλλον για τον λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω. Επομένως, η καλύτερη επιλογή με μείωση θερμικών και ψυκτικών φορτίων είναι η Περίπτωση 2.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο μικρότερο πάχος μόνωσης έχει ο νότιος τοίχος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των θερμικών φορτίων ενώ η μείωση των ψυκτικών δεν επηρεάζεται πολύ με τη διαφορά του πάχους της μόνωσης. Για παράδειγμα με τη χρήση PCM μόνο στο νότιο τοίχο και με μειωμένο πάχος μόνωσης (0.04 m) γίνεται μείωση των θερμικών φορτίων κατά 1.54% και μείωση κατά 5.90% των ψυκτικών φορτίων.



Διάγραμμα 6.2.22: Ετήσια θερμικά φορτία για διαφορετικά πάχη μόνωσης του νότιου τοίχου, με και χωρίς PCM.



Διάγραμμα 6.2.23: Ετήσια ψυκτικά φορτία για διαφορετικά πάχη μόνωσης του νότιου τοίχου, με και χωρίς PCM.

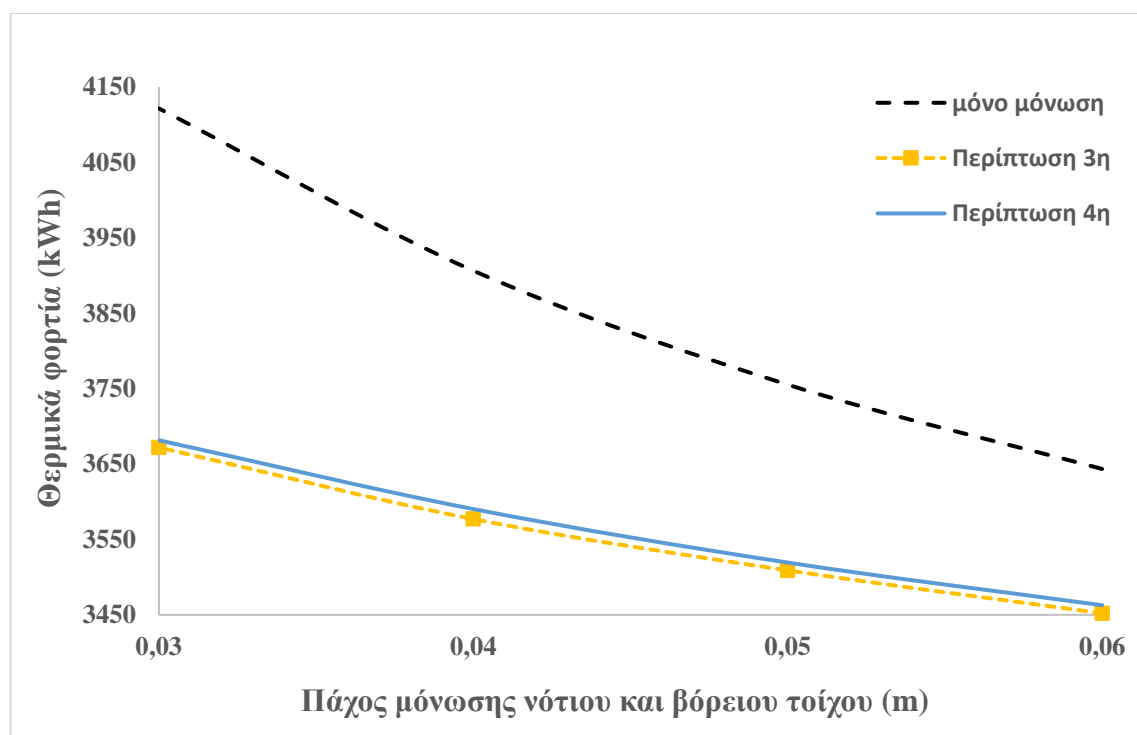
3. Κατανάλωση ενέργειας σε διαφορετικές περιπτώσεις με μεταβλητό πάχος μόνωσης στο νότιο και στο βόρειο τοίχο.

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται διερεύνηση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων για μεταβλητό πάχος μόνωσης στο νότιο και στο βόρειο τοίχο, με και χωρίς PCM. Οι υπόλοιποι τοίχοι, η οροφή και το δάπεδο παραμένουν αμετάβλητα. Τα διαγράμματα 6.2.24 και 6.2.25 δείχνουν τα ετήσια θερμικά φορτία και τα ετήσια ψυκτικά φορτία αντιστοίχως μόνο με μόνωση και χωρίς PCM και με PCM στο βόρειο τοίχο μετά από τη μόνωση (Περίπτωση 3^η) και πριν τη μόνωση (Περίπτωση 4^η) σε συνδυασμό με την καλύτερη θέση του PCM στο νότιο τοίχο που είναι η περίπτωση μετά από τη μόνωση.

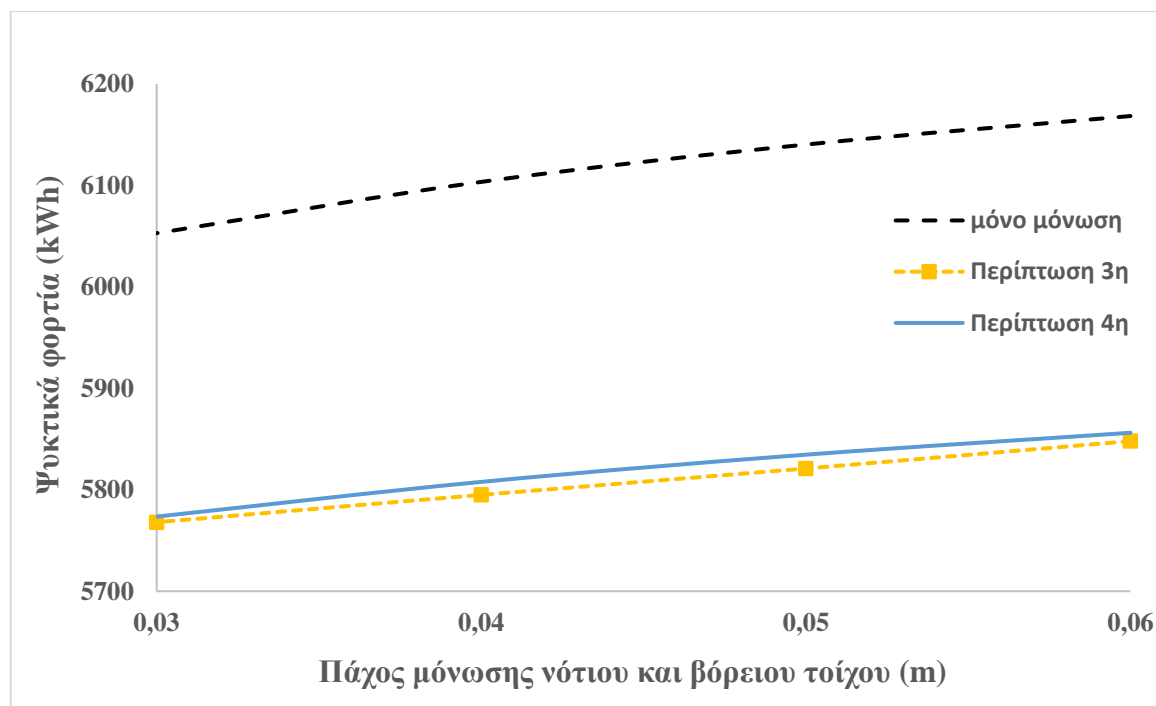
Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με το στρώμα PCM πριν και μετά τη μόνωση στο βόρειο τοίχο είναι ανεπαίσθητη (περίπου 0.3%), με λίγο καλύτερη την περίπτωση στην οποία το PCM βρίσκεται μετά από τη μόνωση στο βόρειο τοίχο (Περίπτωση 3^η). Μια εξήγηση γι' αυτό είναι το γεγονός ότι απέναντι από το βόρειο τοίχο βρίσκεται ο υαλοπίνακας του νότιου τοίχου ο οποίος επιτρέπει την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας για τη φόρτιση του PCM και έτσι αυτό γίνεται πιο ενεργό. Πιο συγκεκριμένα, το διάγραμμα 6.2.24 απεικονίζει τη μείωση των θερμικών φορτίων με τη χρήση PCM και στους δύο τοίχους που κυμαίνεται από 5.30% έως 10.90%, ενώ το

διάγραμμα 6.2.25 απεικονίζει τη μείωση των ψυκτικών φορτίων με τη χρήση PCM και στους δύο τοίχους που κυμαίνεται από 4.70% έως 5.20%. Επομένως, η ετήσια συνολική μείωση των φορτίων κυμαίνεται περίπου μεταξύ 10% και 16.1%. Τα υψηλότερα ποσοστά μείωσης των ετήσιων θερμικών και ψυκτικών επιτυγχάνονται με το μικρότερο πάχος μόνωσης (0.03m). Επομένως και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι όσο μικρότερο πάχος μόνωσης έχει ο νότιος και ο βόρειος τοίχος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων. Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούμε να μειώσουμε το πάχος της μόνωσης των τοίχων σε 0.03m και με το συνδυασμό του PCM παρατηρούμε μείωση των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων.

Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι το PCM δεν προορίζεται για να αντικαταστήσει αλλά για να συμπληρώσει τη μόνωση. Η ενσωμάτωση του PCM σε μια δομή είναι αποτελεσματική, διότι όλη η εξοικονόμηση ενέργειας από το PCM είναι επιπρόσθετη σε οποιαδήποτε εξοικονόμηση ενέργειας από τη μόνωση. Το θέμα είναι ότι μπορούμε να επιτύχουμε μείωση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων με την ενσωμάτωση του PCM σε μειωμένο πάχος μόνωσης.



Διάγραμμα 6.2.24: Ετήσια θερμικά φορτία για διαφορετικά πάχη μόνωσης του νότιου και του βόρειου τοίχου, με και χωρίς PCM.



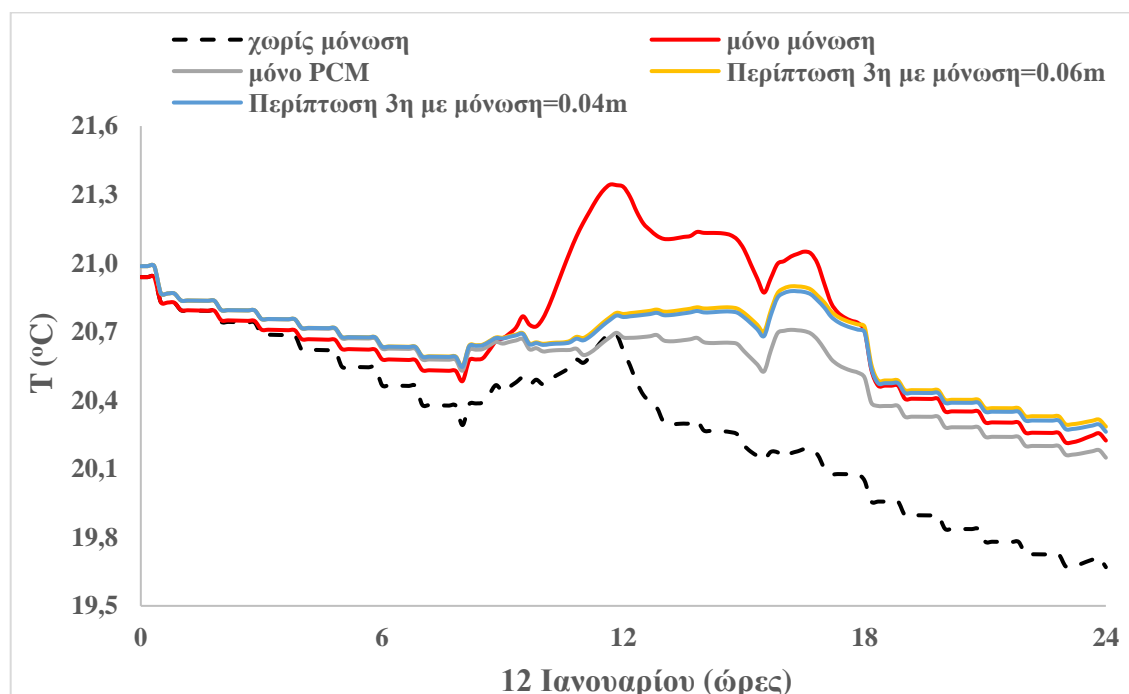
Διάγραμμα 6.2.25: Ετήσια ψυκτικά φορτία για διαφορετικά πάχη μόνωσης του νότιου και του βόρειου τοίχου, με και χωρίς PCM.

4. Διακύμανση εσωτερικών θερμοκρασιών

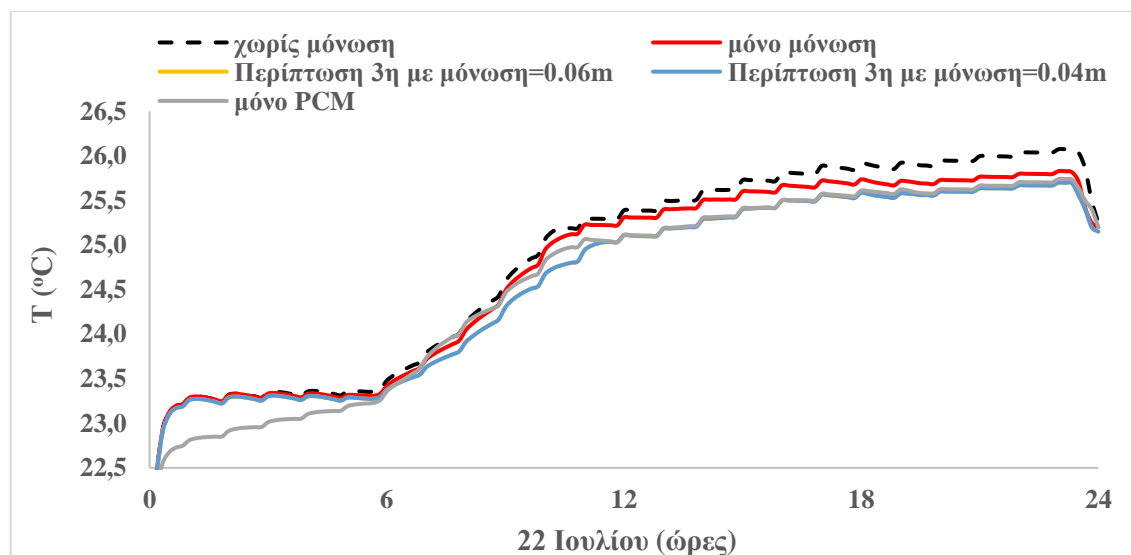
Το χειμώνα, η θερμοκρασία στο κτήριο (γραφείο) πρέπει να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κοντά στα όρια της θερμικής άνεσης (20°C-26°C). Το διάγραμμα 6.2.26 δείχνει τη διακύμανση της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις (χωρίς μόνωση στο νότιο και βόρειο τοίχο, μόνο μόνωση στο νότιο και βόρειο τοίχο, μόνο PCM στο νότιο και βόρειο τοίχο, PCM στο νότιο και το βόρειο τοίχο μετά από τη μόνωση (Περίπτωση 3^η) με μόνωση=0.06 m ή 0.04 m) κατά την πιο κρύα ημέρα του έτους, δηλαδή την 12^η Ιανουαρίου. Παρατηρείται ότι χωρίς μόνωση, η θερμοκρασία είναι η χαμηλότερη μεταξύ όλων των περιπτώσεων και αυτό είναι ένα λογικό αποτέλεσμα. Η καλύτερη λύση για το χειμώνα είναι η περίπτωση που υπάρχει μόνο μόνωση και στη συνέχεια ακολουθεί η περίπτωση με το συνδυασμό της μόνωσης και του PCM. Η συνδυασμένη περίπτωση έχει διαφορά 0.5°C σε σύγκριση με την περίπτωση της μόνωσης. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων της μόνωσης με πάχος 0.06 m και με πάχος 0.04 m είναι ανεπαίσθητη. Πρέπει να σημειωθεί ότι, μπορεί η καλύτερη λύση για το χειμώνα να είναι η περίπτωση που υπάρχει μόνο μόνωση (γιατί η θερμοκρασία είναι η υψηλότερη) αλλά η χρήση του PCM αυξάνει τη θερμική μάζα του

περιβλήματος του κτηρίου και αυτό οδηγεί σε ένα πιο σταθερό προφίλ εσωτερικής θερμοκρασίας και σε χαμηλότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Σε αντίθεση το καλοκαίρι, η θερμοκρασία στο γραφείο πρέπει να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κοντά στα όρια της θερμικής άνεσης. Το διάγραμμα 6.2.27 δείχνει τη διακύμανση της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις (χωρίς μόνωση στο νότιο και βόρειο τοίχο, μόνο μόνωση στο νότιο και βόρειο τοίχο, μόνο PCM στο νότιο και βόρειο τοίχο, PCM στο νότιο και το βόρειο τοίχο μετά από τη μόνωση (Περίπτωση 3^η) με μόνωση=0.06 m ή 0.04 m) κατά τη θερμότερη ημέρα του έτους, δηλαδή την 22^η Ιουλίου. Παρατηρείται ότι χωρίς μόνωση, η θερμοκρασία είναι η υψηλότερη μεταξύ όλων των περιπτώσεων και αυτό είναι ένα λογικό αποτέλεσμα. Η καλύτερη λύση για το καλοκαίρι είναι η περίπτωση με το συνδυασμό της μόνωσης και του PCM. Η συνδυασμένη περίπτωση έχει διαφορά 0.2°C σε σύγκριση με την περίπτωση που υπάρχει μόνο μόνωση, και διαφορά 0.4°C σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς μόνωση. Η διαφορά των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τη μόνωση των 0.06 m και 0.04 m είναι επίσης ανεπαίσθητη. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η χρήση του PCM οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής ημέρας.



Διάγραμμα 6.2.26: Η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις την πιο κρύα μέρα του έτους (12^η Ιανουαρίου).



Διάγραμμα 6.2.27: Η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις την πιο ζεστή μέρα του έτους (22^η Ιουλίου).

Δ) Οικονομική αξιολόγηση

Οικονομικά αξιολογήθηκε η 3^η Περίπτωση (το PCM βρίσκεται στο νότιο και το βόρειο τοίχο μετά από τη μόνωση) γιατί είχε τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης των ετήσιων συνολικών φορτίων. Για την οικονομική αξιολόγηση αυτής της περίπτωσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της περιόδου αποπληρωμής. Η περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

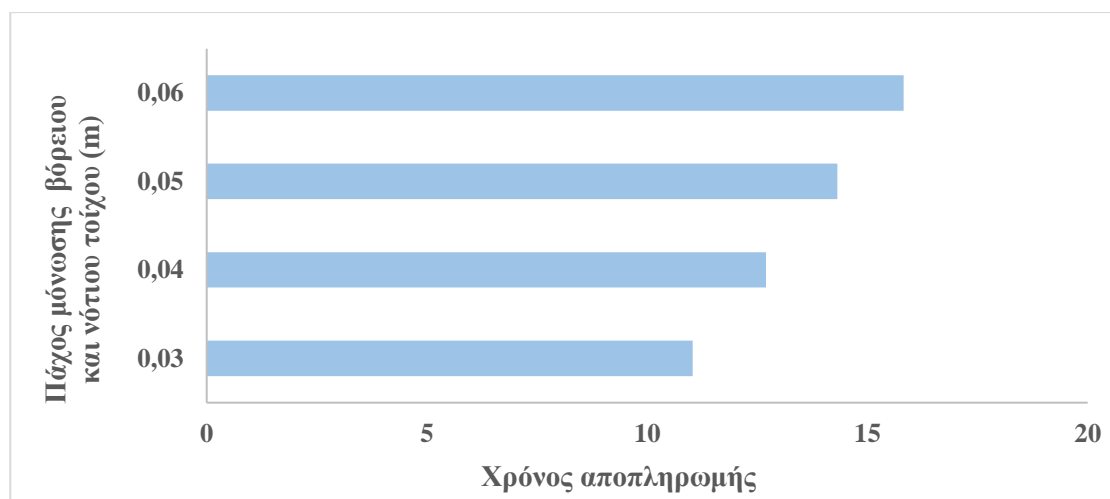
$$\text{Περίοδος αποπληρωμής} = \frac{\text{Κόστος του PCM (€)}}{\text{Τιμή ρεύματος} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) \times \text{Συνολική μείωση φορτίων} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{έτος}} \right)}$$

Το κόστος του PCM, όπως και στην προηγούμενη μελέτη, υπολογίζεται περίπου σε 30€/m² [6.34]. Ο βόρειος τοίχος έχει εμβαδόν 30 m² και ο νότιος 24 m² (6 m² παράθυρο). Επομένως, καλύπτονται 54 m² με PCM και άρα το κόστος του χρησιμοποιούμενου PCM είναι 1620€. Η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος για την Ελλάδα υπολογίζεται σε 0.20 €/kWh [6.35]. Το κόστος της μόνωσης θεωρείται σταθερό οπότε δεν συνυπολογίζεται. Η συνολική ετήσια μείωση των φορτίων για διαφορετικά πάχη μόνωσης του βόρειου και του νότιου τοίχου δίνονται στον πίνακα 6.2.11. Το διάγραμμα 6.2.28 δίνει τους χρόνους αποπληρωμής με βάση την μείωση των ετήσιων φορτίων για διαφορετικά πάχη μόνωσης του βόρειου και του νότιου τοίχου. Οι χρόνοι αποπληρωμής κυμαίνονται από 11 έως 16 έτη. Ο μικρότερος χρόνος αποπληρωμής, τα 11 έτη, επιτυγχάνεται με πάχος

μόνωσης βόρειου και νότιου τοίχου 0.03 m γιατί σ' αυτή την περίπτωση έχουμε τη μεγαλύτερη μείωση ετήσιων φορτίων.

Πίνακας 6.2.11: Συνολική ετήσια μείωση των φορτίων για διαφορετικά πάχη μόνωσης του βόρειου και του νότιου τοίχου και με PCM.

Πάχος μόνωσης βόρειου και νότιου τοίχου (m)	PCM (Q25/M91)
	Συνολική ετήσια μείωση φορτίων (kWh)
0.03	734.5
0.04	637.9
0.05	565.6
0.06	512



Διάγραμμα 6.2.28: Χρόνος αποπληρωμής του PCM (Q25) με βάση την μείωση των ετήσιων φορτίων για διαφορετικά πάχη μόνωσης του βόρειου και του νότιου τοίχου.

Ε) Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάστηκε και αξιολογήθηκε θεωρητικά η σύγκριση μεταξύ των θερμικών φορτίων, των ψυκτικών φορτίων και της διακύμανσης της θερμοκρασίας ενός γραφείου στην Αθήνα, με και χωρίς τη χρήση στρώματος PCM σε διαφορετικές θέσεις πρώτα μόνο στο νότιο τοίχο και μετά και στο βόρειο. Τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

- Το PCM ως στρώμα τοίχου σε συνδυασμό με τη μόνωση μειώνει τα θερμικά και τα ψυκτικά φορτία του γραφείου και βελτιώνει τη θερμική άνεση των ατόμων μέσα σ' αυτό.
- Όταν το PCM τοποθετείται μόνο στο νότιο τοίχο, η ετήσια συνολική μείωση των φορτίων κυμαίνεται περίπου μεταξύ 7% και 10%.
- Το PCM στο νότιο τοίχο λειτουργεί καλύτερα το καλοκαίρι, ανεξάρτητα από τη θέση, αλλά το χειμώνα, λειτουργεί καλύτερα όταν βρίσκεται μετά από τη μόνωση, προς το εσωτερικό περιβάλλον. Επομένως, η καλύτερη επιλογή με μείωση θερμικών και ψυκτικών φορτίων είναι όταν το PCM τοποθετείται μετά τη μόνωση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο μικρότερο πάχος μόνωσης έχει ο νότιος τοίχος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των θερμικών φορτίων ενώ η μείωση των ψυκτικών φορτίων δεν επηρεάζεται πολύ με τη διαφορά του πάχους της μόνωσης.
- Με τη χρήση PCM μόνο στο νότιο τοίχο και με μειωμένο πάχος μόνωσης (0.04m) γίνεται μείωση των θερμικών φορτίων κατά 1.54% και μείωση κατά 5.90% των ψυκτικών φορτίων.
- Όταν το PCM τοποθετείται στο νότιο και το βόρειο τοίχο, η ετήσια συνολική μείωση των φορτίων κυμαίνεται περίπου μεταξύ 10% και 16.1%. Η καλύτερη περίπτωση είναι όταν υπάρχει ένα στρώμα PCM στο νότιο και στο βόρειο τοίχο μετά από τη μόνωση, προς το εσωτερικό περιβάλλον και αυτό γιατί η μόνωση σ' αυτή την περίπτωση δεν εμποδίζει τη συναλλαγή θερμότητας του PCM με το εσωτερικό περιβάλλον και συνεπώς η αποθηκευμένη ηλιακή θερμότητα του PCM μεταδίδεται μέσα στο κτήριο. Αυτό το συμπέρασμα αποδεικνύεται και από τη μελέτη των Antonopoulos et al. [6.40].
- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούμε να μειώσουμε το πάχος της μόνωσης των τοίχων (βόρειο και νότιο) σε 0.03m και με τη ταυτόχρονη χρήση του PCM παρατηρούμε μείωση των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων. Αυτό συμβαίνει γιατί μ' αυτόν τον τρόπο το PCM συναλλάσσει ευκολότερα θερμότητα.
- Επομένως, μπορούμε να επιτύχουμε μείωση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων με την ενσωμάτωση του PCM σε τοίχο με μειωμένο πάχος μόνωσης γιατί μ' αυτόν τον τρόπο το PCM συναλλάσσει ευκολότερα θερμότητα.

- Για το χειμώνα, η καλύτερη λύση είναι η περίπτωση που υπάρχει μόνο μόνωση (γιατί η θερμοκρασία είναι η υψηλότερη) αλλά η χρήση του PCM αυξάνει τη θερμική μάζα του περιβλήματος του κτηρίου και αυτό οδηγεί σε ένα πιο σταθερό προφίλ εσωτερικής θερμοκρασίας, δηλαδή σε χαμηλότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.
- Για το καλοκαίρι, η καλύτερη λύση είναι η περίπτωση με το συνδυασμό της μόνωσης και του PCM. Η χρήση του PCM οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής ημέρας.
- Ο μικρότερος χρόνος αποπληρωμής, τα 11 έτη, επιτυγχάνεται με πάχος μόνωσης βόρειου και νότιου τοίχου 0.03 m γιατί σ' αυτή την περίπτωση έχουμε τη μεγαλύτερη μείωση ετήσιων φορτίων.
- Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης συγκρίνονται με άλλες μελέτες όπως φαίνεται στον πίνακα 6.2.12 και παρατηρείται μια καλή σύγκλιση αποτελεσμάτων.

Πίνακας 6.2.12: Αποτελέσματα άλλων μελετών για την επικύρωση των αποτελεσμάτων.

Συγγραφείς	Είδος μελέτης	Περιοχή	PCM στο κτήριο	Εξοικονόμηση ενέργειας (%)	
				Θερμικά Φορτία	Ψυκτικά Φορτία
<i>Athienitis et al. [6.41]</i>	Προσομοίωση και πείραμα	Montreal, Καναδάς	PCM σε τοίχο κτηρίου	15%	-
<i>Chen et al. [6.42]</i>	Προσομοίωση και πείραμα	Πεκίνο, Κίνα	PCM στο βόρειο τοίχο κτηρίου	17%	-
<i>Derradji et al. [6.31]</i>	Προσομοίωση	Αλγερία	PCM στους τοίχους κτηρίου	25%	
<i>Παρούσα μελέτη</i>	Προσομοίωση	Αθήνα, Ελλάδα	PCM στο βόρειο και νότιο τοίχο κτηρίου	~16%	

6.2.3 Επικύρωση του Type 1270 μέσω πειράματος σε δάπεδο

Στην παράγραφο 6.2.1 επικυρώθηκε το μοντέλο (Type) 1270 του PCM με σύγκριση των πειραματικών δεδομένων των Kuznic και Virgone [6.15] από την εφαρμογή του PCM σε τοίχους, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μέσω TRNSYS. Σ' αυτή την παράγραφο γίνεται εκ νέου επικύρωση του μοντέλου στο δάπεδο με σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με πειραματικά δεδομένα της έρευνας των Xu et al. [6.43].

Οι Xu et al. [6.43] διεξήγαγαν το πείραμά τους στο πανεπιστήμιο Tsinghua του Πεκίνο. Ο πειραματικός χώρος που χρησιμοποιήθηκε είχε διαστάσεις 3m (μήκος) x 2m (πλάτος) x 2m(ύψος). Επιπλέον, ο χώρος είχε προσανατολισμό προς τον νότο με ένα διπλό παράθυρο διαστάσεων 1.6m x 1.5m. Τα υλικά των τοιχομάτων περιγράφονται στον Πίνακα 6.2.13. Η εικόνα 6.2.29 [6.43] δείχνει τη διάταξη του δαπέδου. Επιπλέον, ο πίνακας 6.2.14 δίνει τις ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου PCM του πειράματος.

Πίνακας 6.2.13: Υλικά τοιχοποιίας.

	<i>Δομικά Υλικά</i>	<i>Πάχη (mm)</i>
<i>Οροφή</i>	Πολυστερίνη	100
<i>Τοίχοι</i>	Πολυστερίνη	100
<i>Δάπεδο</i>	Πλάκα PCM	8
	Πολυστερίνη	50



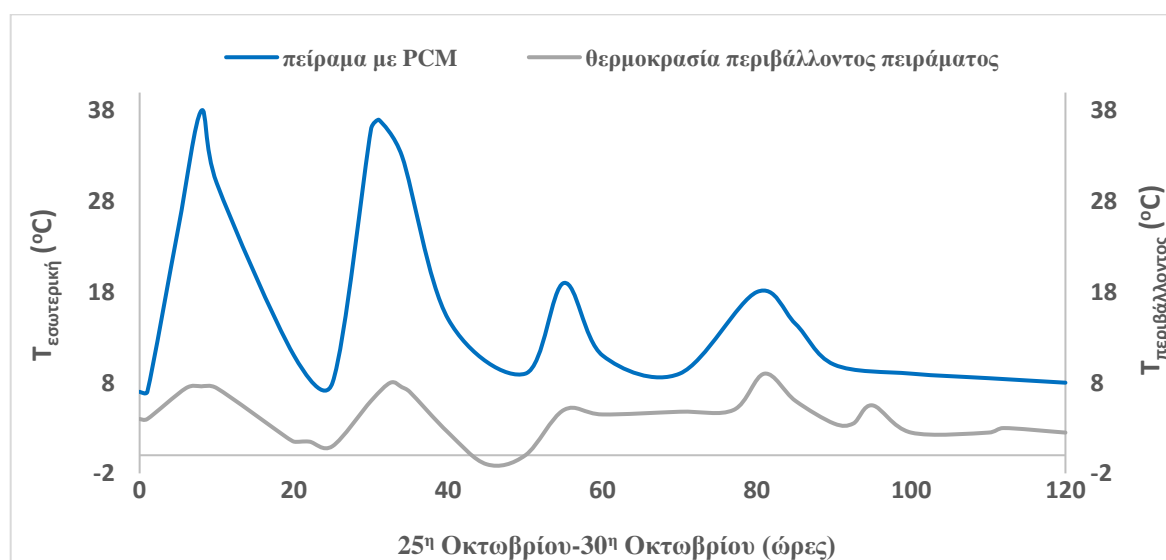
Εικόνα 6.2.29: Διάταξη δαπέδου [6.43].

Πίνακας 6.2.14: Ιδιότητες του PCM του πειράματος [6.43].

Υλικό	Θερμοκρασία τήξης ($^{\circ}\text{C}$)	Πυκνότητα (kg/m^3)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (kJ/kgK)	Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης (J/g)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)
PCM	25	850	1.0	120	0.2

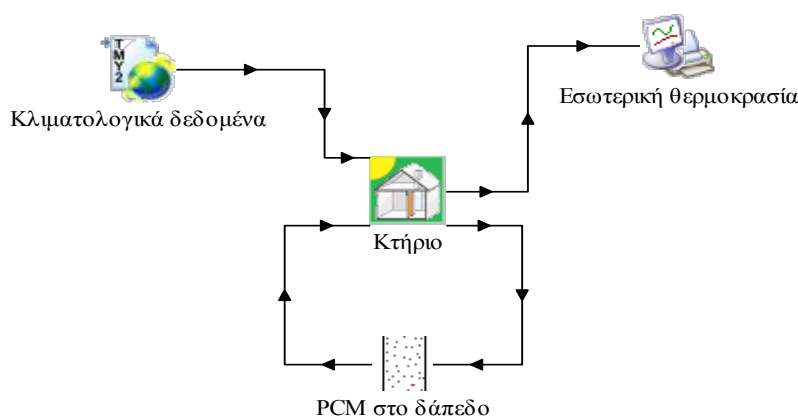
Το πείραμα διεξήχθη για την περίοδο από 15^η Οκτωβρίου έως και 15^η Δεκεμβρίου. Ωστόσο τα αποτελέσματα του πειράματος ήταν για την περίοδο μιας εβδομάδας (25^η-30^η Οκτωβρίου).

Το παρακάτω διάγραμμα 6.2.30 δείχνει το προφίλ της θερμοκρασίας αέρα του εξεταζόμενου χώρου με το PCM στο δάπεδο, μετά από τα πειράματα που διεξήχθησαν από τους Xu et al. [6.43], καθώς και τη θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος. Παρατηρείται ότι, η εσωτερική θερμοκρασία του πειραματικού χώρου κυμαίνεται μεταξύ 7°C και 38°C . Η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του πειραματικού χώρου είναι αρκετά υψηλή, επειδή οι τοίχοι και η οροφή του χώρου κατασκευάστηκαν από πολυστερίνη όπου η θερμική αγωγιμότητά της είναι πολύ μικρή και η ποσότητα του χρησιμοποιούμενου PCM δεν ήταν αρκετή.



Διάγραμμα 6.2.30: Προφίλ θερμοκρασίας του πειραματικού χώρου και του εξωτερικού περιβάλλοντος για το διάστημα από 25^η έως 30^η Οκτωβρίου στο Πεκίνο.

Στην συνέχεια γίνεται επικύρωση, για το δάπεδο, του μοντέλου (Type) 1270 (PCM) του TRNSYS κάνοντας σύγκριση με τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα. Έτσι, με το λογισμικό TRNSYS, σχεδιάστηκε ο παραπάνω πειραματικός χώρος με την ίδια γεωμετρία, τα ίδια υλικά τοιχοποιίας και τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας με τα κλιματολογικά δεδομένα για το Πεκίνο. Η μόνη διαφορά βρίσκεται στο PCM. Για την παρούσα σύγκριση επιλέχθηκε το BioPCM με κωδικό προϊόντος M91 και με θερμοκρασία τήξης 25°C, δηλαδή την θερμοκρασία τήξης του PCM του πειράματος. Τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου PCM (Q25/M91) δίνονται στον πίνακα 6.2.15. Η μέθοδος τοποθέτησης του BioPCM είναι η μακροενσωμάτωση σε κάψουλα που έχει τη μορφή τετράγωνης σακούλας. Το TRNSYS επιτρέπει τη δημιουργία συμπαγών στρωμάτων και γι' αυτό το λόγο θεωρούμε το BioPCM που χρησιμοποιείται ως σταθερό συνεχές στρώμα. Η διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με στρώμα PCM στο δάπεδο με το λογισμικό TRNSYS δίνεται στην παρακάτω εικόνα 6.2.31.

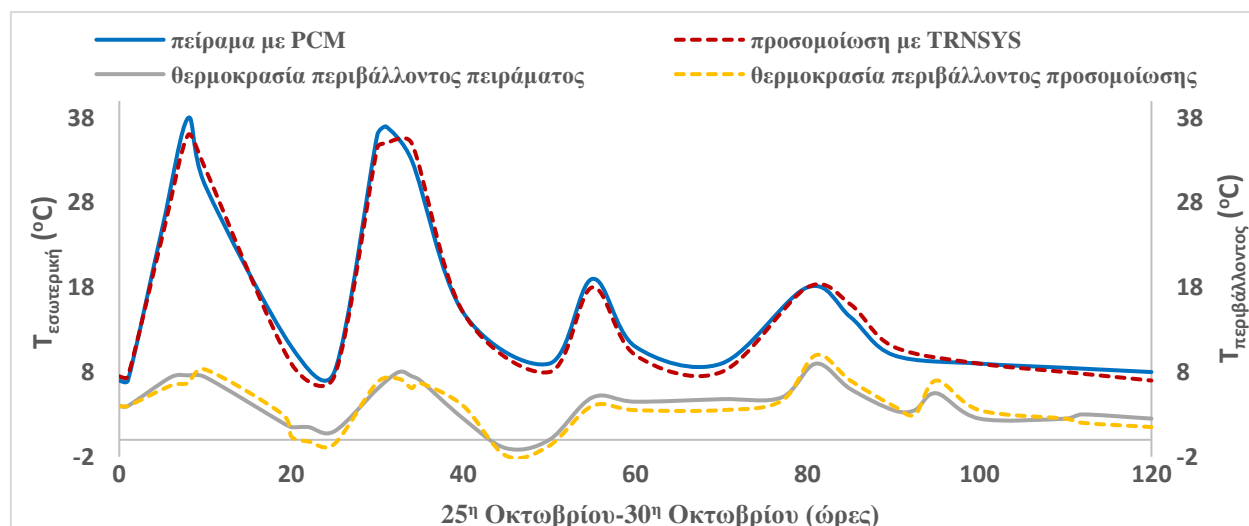


Εικόνα 6.2.31: Η διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με PCM στο δάπεδο.

Πίνακας 6.2.15: Ιδιότητες του PCM της προσομοίωσης [6.17].

<i>BioPCM</i>	<i>Q25/M91</i>
<i>Πυκνότητα</i>	850 kg/m ³
<i>Πάχος</i>	20 mm
<i>Θερμοκρασία τήξης</i>	25°C
<i>Θερμική αγωγιμότητα (σε υγρή φάση)</i>	0.15 W/mK
<i>Θερμική αγωγιμότητα (σε στερεή φάση)</i>	2.5 W/mK
<i>Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης</i>	210 kJ/kg

Το διάγραμμα 6.2.31 δείχνει τα προφίλ της θερμοκρασίας του εξεταζόμενου χώρου για το διάστημα από 25^η έως 30^η Οκτωβρίου στο Πεκίνο: α) μετά από πείραμα και β) μετά από την προσομοίωση στο TRNSYS. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση φαίνεται ότι συμφωνούν αρκετά καλά με τα αποτελέσματα του πειράματος. Η εσωτερική θερμοκρασία του πειραματικού χώρου κυμαίνεται μεταξύ 7°C και 38°C ενώ η εσωτερική θερμοκρασία με την προσομοίωση στο TRNSYS του πειραματικού χώρου κυμαίνεται μεταξύ 7°C και 36°C. Συγκρίνοντας τις κατανομές των θερμοκρασιών παρατηρείται ότι η μέση θερμοκρασιακή απόκλιση των εσωτερικών θερμοκρασιών είναι 0.75°C. Επιπλέον, η απόκλιση των θερμοκρασιών περιβάλλοντος συμβαδίζει με αυτή των εσωτερικών θερμοκρασιών. Ως εκ τούτου, το Type 1270 (PCM) του TRNSYS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς κτηρίων όταν τοποθετείται και στο δάπεδο.



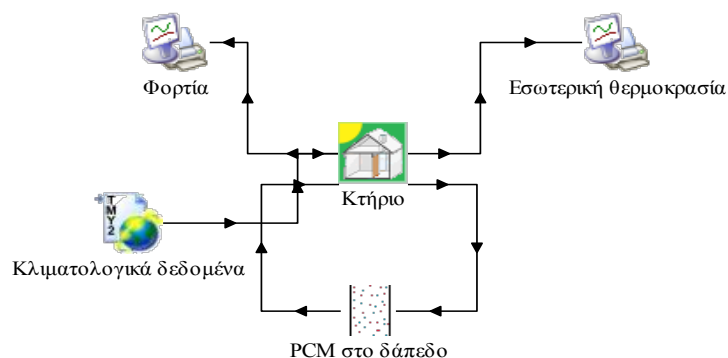
Διάγραμμα 6.2.31: Προφίλ θερμοκρασίας του πειραματικού χώρου και του εξωτερικού περιβάλλοντος για το διάστημα από 25^η έως 30^η Οκτωβρίου στο Πεκίνο α) από πείραμα, β) από προσομοίωση στο TRNSYS.

6.2.4 Προσομοίωση κτηρίου στην Αθήνα με PCM σε δάπεδο

Α) Γενικά

Στην παρούσα ενότητα, η ενσωμάτωση ενός στρώματος PCM στο δάπεδο ενός κτηρίου στην Αθήνα αξιολογείται θεωρητικά χρησιμοποιώντας το λογισμικό TRNSYS 17. Επιπλέον παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα θερμικά και ψυκτικά φορτία και τα προφίλ της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου, χωρίς και με δύο διαφορετικές

θερμοκρασίας τήξης PCM στο δάπεδο. Η εικόνα 6.2.32 δείχνει τη διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το στρώμα PCM στο δάπεδο στο TRNSYS.



Εικόνα 6.2.32: Η διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM.

B) Περιγραφή κτηρίου και χρησιμοποιούμενων PCM

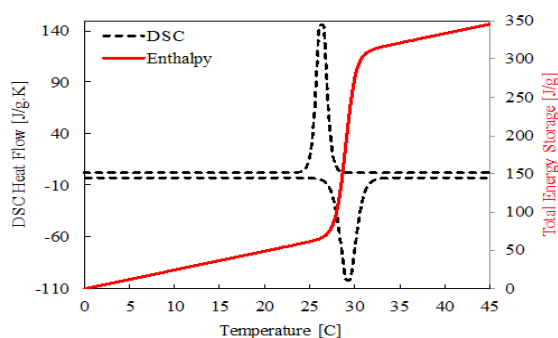
Το εξεταζόμενο κτήριο έχει μέγεθος, τοιχοποιία και συνθήκες λειτουργίας ίδιες με το κτήριο που περιεγράφηκε στην παράγραφο 6.2.2.1. Θεωρείται ότι 7 άτομα εργάζονται μέσα στο κτήριο και το φορτίο του εξοπλισμού είναι ίσο με 350W. Πρέπει να σημειωθεί ότι για το χειμώνα οι εναλλαγές αέρα ανά ώρα είναι 0.8 και το καλοκαίρι 2 για να μην υπερθερμανθεί το κτήριο, ιδιαίτερα με την χρήση του PCM. Είναι σημαντικό να δηλωθεί ότι οι επιθυμητές εσωτερικές θερμοκρασίες ρυθμίστηκαν να είναι 20°C το χειμώνα και στους 26°C το καλοκαίρι σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς [6.32-6.33]. Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν και συγκρίθηκαν τα ΒιοPCM με θερμοκρασία τήξης 25°C και 29°C. Η θερμοκρασία τήξης 25°C επιλέχθηκε για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα 6.2.2.2, ενώ η θερμοκρασία 29°C επιλέχθηκε για να μελετηθεί η απόδοση του συγκεκριμένου PCM [6.14]. Η θέση του PCM στο δάπεδο φαίνεται στην εικόνα 6.2.33. Ο πίνακας 6.2.16 δίνει τα χαρακτηριστικά του PCM (Q29/M91).



Εικόνα 6.2.33: Στρώματα δαπέδου α) χωρίς PCM β) με PCM.

Πίνακας 6.2.16: Ιδιότητες PCM (Q29/M91) [6.17].

	<i>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ</i>	<i>ΤΙΜΕΣ</i>
<i>PCM</i> <i>(Q29/M91)</i>	Θερμοκρασία τήξης	29°C
	Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης	210 kJ/kg
	Θερμική αγωγιμότητα	0.15-2.5W/mK
	Πάχος	20 mm
	Θερμοκρασία στερεοποίησης	25.5°C

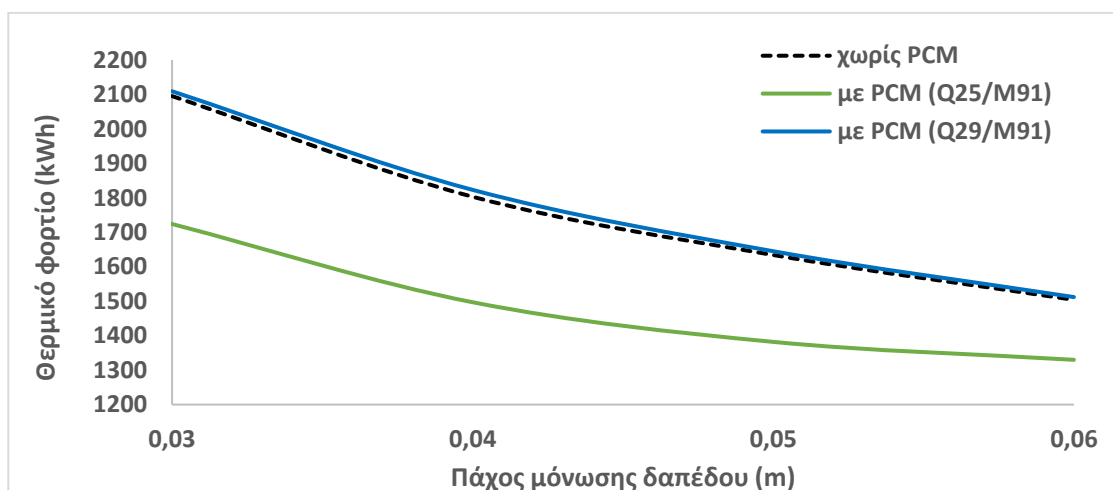
**Εικόνα 6.2.34: Καμπύλες DSC και ενθαλπίας του PCM (Q29/M91) [6.17].**

Γ) Προσομοίωση και αποτελέσματα

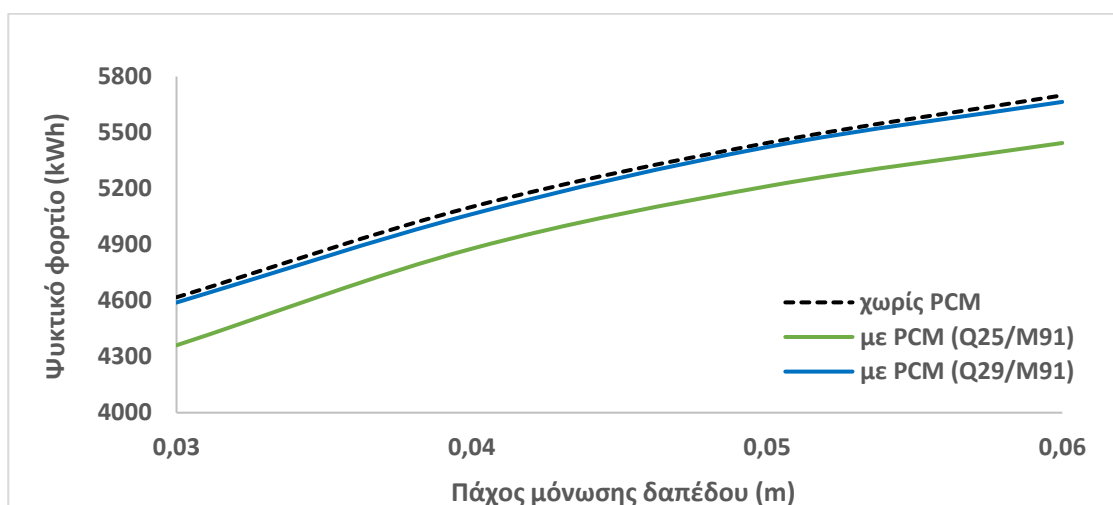
1. Υπολογισμός και σύγκριση θερμικών και ψυκτικών φορτίων

Το εξεταζόμενο κτήριο, με και χωρίς PCM στο δάπεδο, σχεδιάστηκε και προσομοιάστηκε στο TRNSYS 17. Το χρονικό βήμα επιλέχθηκε να είναι τα 10 λεπτά για συγκλίνοντα αποτελέσματα. Τα διαγράμματα 6.2.35 και 6.2.36 δείχνουν τα ετήσια θερμικά φορτία και τα ετήσια ψυκτικά φορτία αντίστοιχα με και χωρίς PCM (Q25/M91, Q29/M91). Πιο συγκεκριμένα, το διάγραμμα 6.2.35 δείχνει ότι με τη χρήση του Q25/M91 γίνεται κατά μέσο όρο 15.4% μείωση των θερμικών φορτίων ενώ με τη χρήση του Q29/M91 έχουμε μια μικρή αύξηση των θερμικών φορτίων κατά 0.8%. Το διάγραμμα 6.2.36 δείχνει ότι με τη χρήση του Q25/M91 γίνεται κατά μέσο όρο 4.7% μείωση των ψυκτικών φορτίων και με τη χρήση του Q29/M91 γίνεται κατά μέσο όρο 0.6% μείωση. Το BioPCM Q25/M91 είναι σαφώς καλύτερο από το BioPCM Q29/M91 και αυτό γιατί το πρώτο έχει θερμοκρασία τήξης (25°C) εντός των ορίων θερμικής άνεσης χειμώνα-καλοκαίρι. Το καλοκαίρι, όπου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από το

χειμώνα και θα περιμέναμε να λειτουργήσει καλύτερα BioPCM Q29/M91, παρατηρούμε ότι αυτό μειώνει λίγο τα ψυκτικά φορτία γιατί λειτουργεί στη διαφασική περιοχή και δεν υγροποιείται πλήρως. Γενικότερα γνωρίζουμε ότι, αν η θερμοκρασία τήξης του PCM είναι πολύ υψηλή, η ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται από αυτό θα είναι χαμηλή. Αν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ χαμηλή, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα δεν μπορεί να διατηρηθεί σε άνετο επίπεδο χωρίς πρόσθετη θέρμανση χώρου. Με άλλα λόγια, εάν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ υψηλή, η ποσότητα θερμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που αποθηκεύεται στο PCM είναι πολύ μικρή κατά τη διάρκεια της ημέρας και εάν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ χαμηλή, είναι δύσκολο να διατηρηθεί η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου στα πλαίσια της θερμικής άνεσης τη νύχτα [6.44].



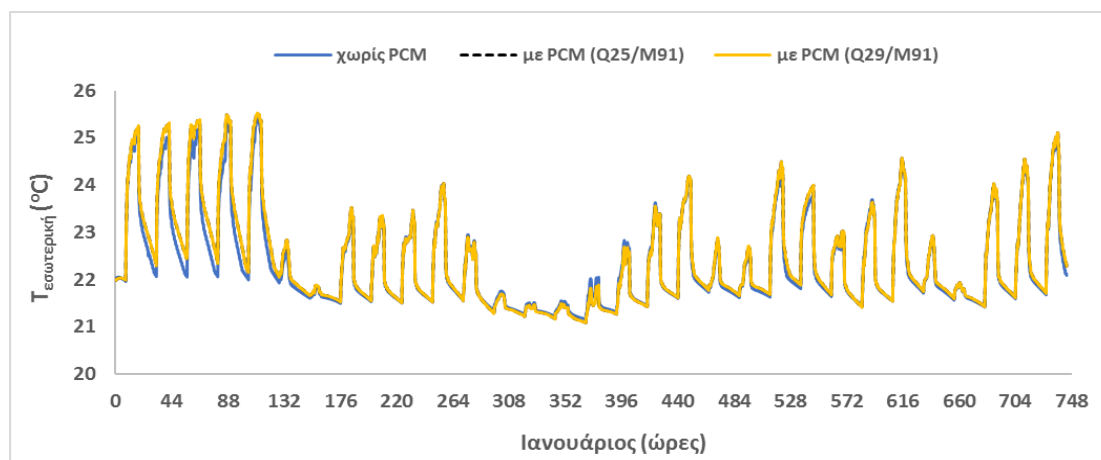
Διάγραμμα 6.2.35: Ετήσια θερμικά φορτία.



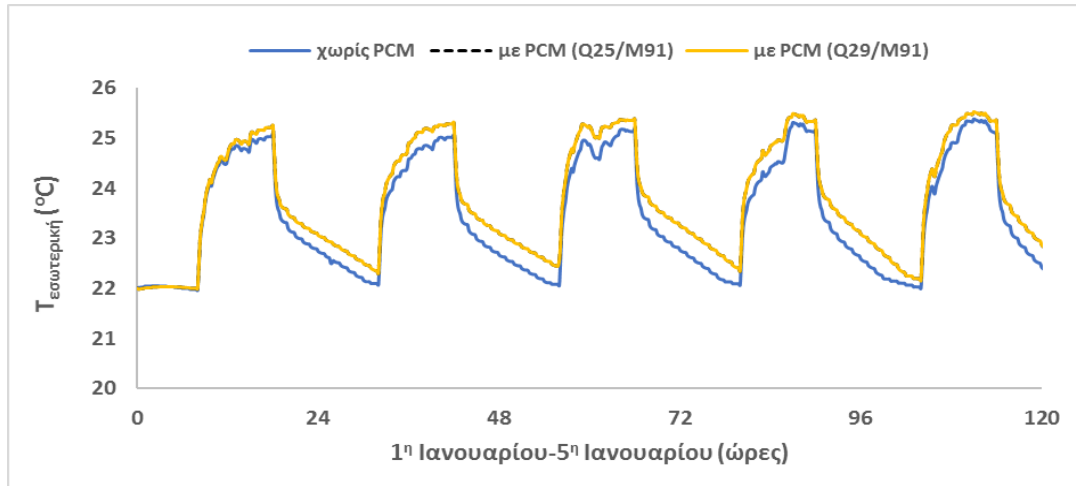
Διάγραμμα 6.2.36: Ετήσια ψυκτικά φορτία.

2. Διακύμανση εσωτερικών θερμοκρασιών

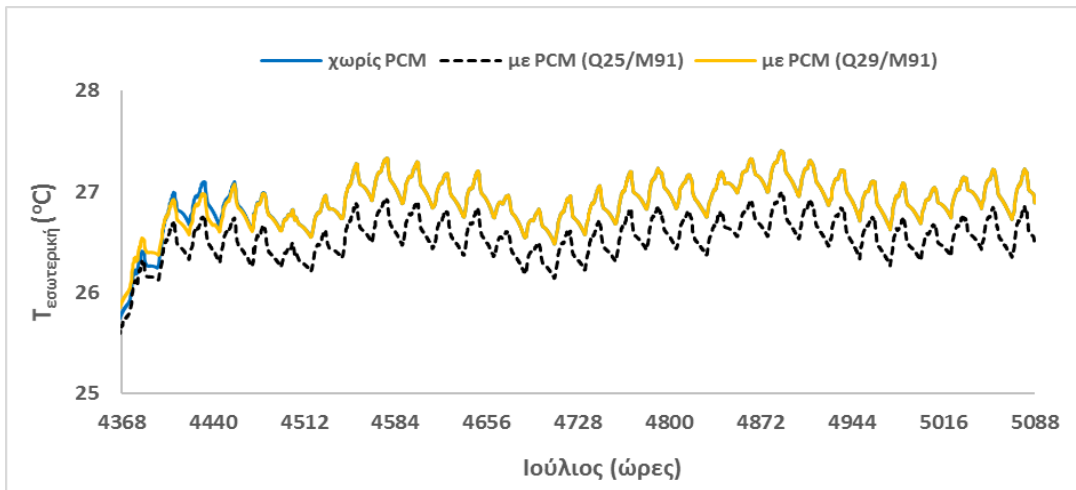
Οι υπολογισμοί έγιναν για τον ψυχρότερο μήνα (Ιανουάριος) και για τον θερμότερο μήνα (Ιούλιο) του έτους στην Αθήνα. Το διάγραμμα 6.2.37 δείχνει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας για τρεις περιπτώσεις (χωρίς PCM και με PCM (Q25 και Q29) τον ψυχρότερο μήνα του έτους, δηλαδή τον Ιανουάριο. Παρατηρούμε ότι οι διακυμάνσεις των θερμοκρασιών και για τις τρεις περιπτώσεις σχεδόν συμπίπτουν. Η διαφορά των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα δύο PCM, Q25/M91 και Q29/M91 είναι ανεπαίσθητη. Τα αποτελέσματα είναι πιο ορατά στο διάγραμμα 6.2.38, που φαίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας για πέντε μέρες του Ιανουαρίου (1^η-5^η Ιανουαρίου). Η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας χωρίς PCM και με PCM είναι +0.5°C. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας μελετήθηκε το πάχος μόνωσης δαπέδου 0.06m. Το διάγραμμα 6.2.39 δείχνει τη διακύμανση της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις τον θερμότερο μήνα του έτους, τον Ιούλιο. Παρατηρούμε ότι με τη χρήση του PCM Q25/M91 η εσωτερική θερμοκρασία μειώνεται περίπου κατά 0.4°C ενώ με τη χρήση του Q29/M91 η εσωτερική θερμοκρασία είναι σχεδόν η ίδια (με μια πολύ μικρή μείωση) με την εσωτερική θερμοκρασία χωρίς PCM. Τα αποτελέσματα είναι πιο ορατά στο διάγραμμα 6.2.40 που φαίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας για πέντε μέρες του Ιουλίου (1^η-5^η Ιουλίου). Η διαφορά των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα PCM Q25/M91 και Q29/M91 είναι μικρή και φτάνει έως και 1.5%. Αξίζει να σημειωθεί ότι το καλοκαίρι η διακύμανση της θερμοκρασίας είναι ομαλότερη από του χειμώνα γιατί τα PCM λειτουργούν καλύτερα λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας.



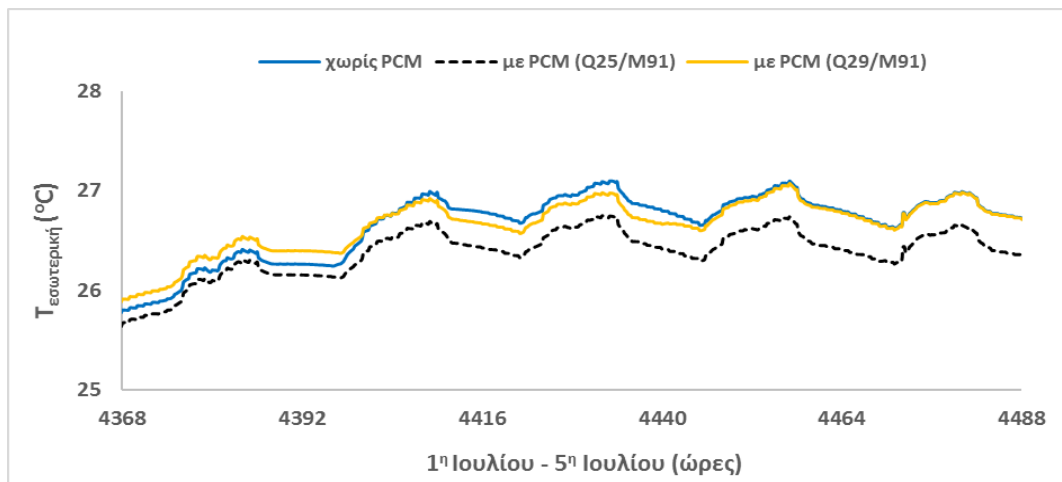
Διάγραμμα 6.2.37: Διακυμάνσεις της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις τον ψυχρότερο μήνα του έτους, τον Ιανουάριο.



Διάγραμμα 6.2.38: Διακύμανση της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις την περίοδο από 1^η έως 5^η Ιανουαρίου.



Διάγραμμα 6.2.39: Διακυμάνσεις της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις τον θερμότερο μήνα του έτους, τον Ιούλιο.



Διάγραμμα 6.2.40: Διακύμανση της θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις την περίοδο από 1^η έως 5^η Ιουλίου.

Δ) Συμπεράσματα

- Το PCM ως στρώμα του δαπέδου μειώνει τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτηρίου (γραφείο) αρκεί η θερμοκρασία τήξης του χρησιμοποιούμενου PCM να μην είναι πολύ μεγαλύτερη από τα όρια της θερμικής άνεσης.
- Το χειμώνα αλλά και το καλοκαίρι το BioPCM Q25/M91 είναι καλύτερο από το BioPCM Q29/M91 και αυτό γιατί το πρώτο έχει θερμοκρασία τήξης (25°C) εντός των ορίων θερμικής άνεσης.
- Το καλοκαίρι, όπου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από το χειμώνα και θα περιμέναμε να λειτουργήσει καλύτερα BioPCM Q29/M91, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας τήξης, παρατηρούμε ότι αυτό μειώνει λίγο τα ψυκτικά φορτία γιατί λειτουργεί στη διασπαστική περιοχή και δεν υγροποιείται πλήρως.
- Το χειμώνα, η διακύμανση της θερμοκρασίας χωρίς PCM φτάνει να είναι μικρότερη έως και 0.5°C σε σχέση με τη διακύμανση της θερμοκρασίας με PCM.
- Το καλοκαίρι, η διακύμανση της θερμοκρασίας χωρίς PCM φτάνει να είναι μεγαλύτερη έως και 0.4°C σε σχέση με τη διακύμανση της θερμοκρασίας με PCM.
- Τα θερμοκρασιακά αποτελέσματα αυτής της μελέτης συγκρίνονται με την μελέτη των Entrop et al. [6.45] και όπως φαίνεται στον πίνακα 6.2.17 παρατηρείται μια καλή σύγκλιση αποτελεσμάτων.

Πίνακας 6.2.17: Αποτελέσματα άλλης μελέτης για την επικύρωση των αποτελεσμάτων.

<i>Συγγραφείς</i>	<i>Είδος μελέτης</i>	<i>Περιοχή</i>	<i>PCM στο κτήριο</i>	<i>Διαφορά θερμοκρασιών</i>
<i>Entrop et al. [6.45]</i>	Πείραμα	Ολλανδία	Στο δάπεδο	0.21-0.32°C
<i>Παρούσα μελέτη</i>	Προσομοίωση	Αθήνα	Στο δάπεδο	0.4-0.5°C

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[6.1] <http://www.trnsys.com/> <accessed 2017>.

[6.2] TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, <http://www.transsolar.com> <accessed 2017>.

- [6.3] TRNSYS 17 Transient System Simulation Program – Volume 1, Getting Started, Solar Energy Laboratory (SEL), University of Wisconsin: Madison, WI, USA, 2012;1-79.
- [6.4] TRNSYS 17 Transient System Simulation Program – Volume 5, Multizone Building Modeling with Type56 and TRNBuild, Solar Energy Laboratory (SEL), University of Wisconsin: Madison, WI, USA, 2012;8-200.
- [6.5] TRNSYS 17, Thermal Energy System Specialists (TESS), TESSLibs 3-Mathematical Reference, Type 1270: Phase Change Material (PCM wall layer) for Type56, 2012;1-4.
- [6.5] M.A Medina, J.B King, X. Zhang, On the heat transfer rate reduction of structural insulated panels outfitted with phase change materials, *Energy* 2013;33:667–678.
- [6.6] M. Ibanez, A. Lazaro, B. Zalba, L.F. Cabeza, An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS, *Applied Thermal Engineering* 2005; 25:1796–1807.
- [6.7] H. Schranzhofer, P. Puschnig, A. Heinz, W. Streicher, Validation of TRNSYS simulation model for PCM energy storages and PCM wall construction elements. In *Proceedings of the ECOSTOCK 2006-10th International Conference on Thermal Energy Storage*, Atlantic City, NJ, USA, 31 May–1 June 2006; Institute of Thermal Engineering, University of Technology Graz: Pomona, NJ, USA, 2006.
- [6.8] F. Kuznik, J. Virgone, K. Johannes, Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM, *Energy and Buildings* 2010;42:1004–1009.
- [6.9] S.N. Al-Saadi, Z.J. Zhai, TRNSYS Type 285—Phase Change Materials Embedded in Wall System, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado: Boulder, CO, USA, 2014.
- [6.10] A. Dentel, W. Stephan, TRNSYS TYPE 399—Phase Change Materials in Passive and Active Wall Constructions, Institute for Energy and Building, Georg Simon Ohm University of Applied Sciences: Nürnberg, Germany, 2013.

- [6.11] B. Delcroix, M. Kummert, A. Daoud, Development and numerical validation of a new model for walls with phase change materials implemented in TRNSYS, *Journal of Building Performance Simulation* 2017;10:422–437.
- [6.12] TRNSYS 17, Thermal Energy System Specialists (TESS), TESSLibs 3-Mathematical Reference, Type 1270: Phase Change Material (PCM wall layer) for Type56, 2012;1-4.
- [6.13] A. Jayalath, L. Aye, P. Mendis, T. Ngo, Effects of phase change material roof layers on thermal performance of a residential building in Melbourne and Sydney, *Energy and Buildings* 2016;121:152–158.
- [6.14] G.P. Panayiotou, S.A. Kalogirou, S.A. Tassou, Evaluation of the application of Phase Change Materials (PCM) on the envelope of a typical dwelling in the Mediterranean region, *Renewable Energy* 2016;97:24-32.
- [6.15] F. Kuznik, J. Virgone, Experimental assessment of a phase change material for the wall building use, *Applied Energy* 2009;86:2038–2046.
- [6.16] G. Zhou, Y. Yang, X. Wang, S. Zhou, Numerical analysis of effect of shape-stabilized phase change material plates in a building combined with night ventilation, *Applied Energy* 2009;86:52–9.
- [6.17] BioPCM, Technical data Q23-Q25, Phase Change Energy Solutions Australia, www.phasechange.com.au <accessed 2017>.
- [6.18] M. Alam, H. Jamil, J. Sanjayan, J. Wilson, Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities, *Energy and Buildings* 2014;78:192–201.
- [6.19] M.T. Plytaria, C. Tzivanidis, E. Bellos, K.A. Antonopoulos, Thermal analysis of a building in Athens with phase change materials in roof using simulation program TRNSYS 17, In *Proceedings of 7th International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization*, Vol II, pp. 509-518, July 5-18, 2017 Athens, Greece.
- [6.20] Z. Soleimani, J.K. Calautit, B.R. Hughes, Computational Analysis of Natural Ventilation Flows in Geodesic Dome Building in Hot Climates, *Computation* 2016;4: 31.

- [6.21] E. Bellos, C. Tzivanidis, K. Moschos, K.A. Antonopoulos, Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems, *Energy Conversion and Management* 2016;120:306–319.
- [6.22] J.G. Fantidis, D.V. Bandekas, C. Potolias, N. Vordos, Cost of PV electricity—Case study of Greece, *Solar Energy* 2013; 91:120–130.
- [6.23] D.A. Kouremenos, K.A. Antonopoulos, E. S. Domazakis, Solar radiation correlations for the Athens, Greece. *Solar Energy* 1985;35:259–269.
- [6.24] E.D. Kravvaritis, K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, E. Bellos, Solar Energy Management Using Phase Change Materials Passive Systems in the Athens Area Buildings, *Int. J. Mech. Syst. Eng.* 2015;1:102–110.
- [6.25] H.M. Chou, C.R. Chen, V.L. Nguyen, A new design of metal-sheet cool roof using PCM, *Energy and Buildings* 2013;57:42–50.
- [6.26] X. Jin, M.A. Medina, X. Zhang, Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame wall, *Applied Thermal Engineering* 2016;103:1057–1063.
- [6.27] M.D. Romero-Sanchez, C. Guillem-Lopez, A.M. Lopez-Buendia, M. Stamatiadou, I. Mandilaras, D. Katsourinis, M. Founti, Treatment of natural stone with phase change materials: Experiments and computational approaches, *Applied Thermal Engineering* 2012;48:136–143.
- [6.28] U. Stritih, V.V. Tyagi, R. Stropnik, H. Paksoy, F. Haghghat, M.M. Joybari, Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings, *Sustainable Cities and Society* 2018;1:286–295.
- [6.29] A. Fateh, D. Borelli, F. Devia, H. Weinsläder, Summer thermal performances of PCM-integrated insulation layers for light-weight building walls: Effect of orientation and melting point temperature, *Thermal Science and Engineering Progress* 2018;6:361–369.
- [6.30] S. Lu, Y. Zhao, K. Fang, Y. Li, P. Sun, Establishment and experimental verification of TRNSYS model for PCM floor coupled with solar water heating system, *Energy and Building* 2017;140:245–260.

- [6.31] L. Derradji, F.B. Errebai, M. Amara, Effect of PCM in Improving the Thermal Comfort in Buildings, *Energy Procedia* 2017;107:157–161.
- [6.32] ΥΠΕΚΑ. ΕΚ407/Β/9.4.2010, Κανονισμός για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων (20701-2/2010)—ΚΕΝΑΚ, ΥΠΕΚΑ: Αθήνα, Ελλάδα, 2010.
- [6.33] ΥΠΕΚΑ. ΕΚ407/Β/9.4.2010, Κανονισμός για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων (20701-1/2010)—ΚΕΝΑΚ, ΥΠΕΚΑ: Αθήνα, Ελλάδα, 2010.
- [6.34] J. Kosny, N. Shukla, A. Fallahi, Cost Analysis of Simple Phase Change Material-Enhanced Building Envelopes in Southern U.S. Climates, U.S. Department of Energy’s Building America Program, Fraunhofer CSE 2013.
- [6.35] https://ec.europa.eu/eurostat/.../Electricity_price/ <accessed 2018>.
- [6.36] M.T. Plytaria, C. Tzivanidis, E. Bellos, I. Alexopoulos, K.A. Antonopoulos, The impact of phase change materials in the heating and the cooling loads of a building, In Proceedings of 8th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering, July 4-7, 2018 Athens, Greece.
- [6.37] M.T. Plytaria, C. Tzivanidis, E. Bellos, I. Alexopoulos, K.A. Antonopoulos, Thermal behavior of a building with incorporated phase change materials in the south and the north wall, *Computational Engineering Journal* 2019;7,2:1-13.
- [6.38] F. Ascione, R.F. De Masi, F. De Rossi, S. Ruggiero, G.P. Vanoli, Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study, *Applied Energy* 2016;183:938–957.
- [6.39] F. Guarino, S. Longo, M. Cellura, M. Mistretta, V. La Rocca, Phase change materials applications to optimize cooling performance of buildings in the Mediterranean area: a parametric analysis, *Energy Procedia* 2015;78:1708 – 1713.
- [6.40] K.A. Antonopoulos, C. Tzivanidis, E.D. Kravvaritis, Solar energy and phase change materials (PCM) in buildings, PV Technology Development and Market Trends Congress, RES, 4-5 October 2010, NTUA, Athens.
- [6.41] A.K. Athienitis, C. Liu, D. Hawes, D. Banu, D. Feldman, Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage, *Building and Environment* 1997; 32(5):405-410.

[6.42] C. Chen, H.F. Guo, Y.N. Liu, A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard, *Energy and Buildings* 2008;40:882–890.

[6.43] X. Xu, Y. Zhang, K. Lin, H. Di, R. Yang, Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings, *Energy and Buildings* 2005;37:1084–1091.

[6.44] Y.P. Zhang, K.P. Lin, R. Yang, H.F. Di, Y. Jiang, Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings, *Energy and Buildings* 2006;38:1262–1269.

[6.45] A.G. Entrop, H.J.H. Brouwers, A.H.M.E. Reinders, Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses, *Solar Energy* 2011;85:1007-1020.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΗΛΙΑΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσονται και αναλύονται οι προσομοιώσεις πρωτότυπων συστημάτων για ηλιακή θέρμανση κτηρίων με υλικά αλλαγής φάσης (PCM), με το λογισμικό TRNSYS. Επιπλέον, γίνεται η επικύρωση των αποτελεσμάτων ενός απλού ηλιακού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με PCM με σύγκριση πειραματικών δεδομένων.

7.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκε η εφαρμογή των PCM στους τοίχους, στην οροφή και στο δάπεδο κτηρίου. Το αποτέλεσμα είναι ότι στα κτήρια, η ενσωμάτωση των PCM στα δομικά στοιχεία αποτελεί μια εξαιρετική λύση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, επειδή υπάρχουν τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης ενέργειας [7.1]. Έτσι, τα PCM μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορα δομικά στοιχεία, και έτσι να βελτιωθεί η θερμική συμπεριφορά του κτηρίου, μειώνοντας τις απαιτήσεις για θέρμανση ή ψύξη αέρα.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις για την εφαρμογή των PCM σε δοχεία αποθήκευσης ή σε ηλιακά ενεργειακά συστήματα όπως τις ηλιακές καμινάδες [7.2]. Για παράδειγμα, οι Padovan et al. [7.3] μελέτησαν ένα απλό ηλιακό σύστημα για ζεστό νερό οικιακής χρήσης (SDHW) που διαθέτει ένα επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, ένα λέβητα και ένα δοχείο αποθήκευσης ενισχυμένο με PCM. Το ενισχυμένο με PCM δοχείο βελτιστοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μόνο- και πολύ-παραγοντικούς αλγορίθμους. Οι Zhao et al. [7.4] πρότειναν ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης (SHS) με δοχείο θερμικής αποθήκευσης με υλικά αλλαγής φάσης (PCM) και διαπίστωσαν ότι το SHS με το δοχείο PCM παρείχε αύξηση κατά 34% στην εξοικονόμηση ενέργειας σε σύγκριση με ένα συνηθισμένο σύστημα θέρμανσης δοχείου νερού. Οι Mousavi Baygi και Sadrameli [7.5] διερεύνησαν πειραματικά ένα φωτοβολταϊκό (PV) ηλιακό πάνελ με τη χρήση PCM. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση του PCM βοηθά στη θερμική απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών. Οι Stritih et al. [7.6] εξέτασαν ένα σύστημα αποθήκευσης με PCM και εναλλάκτη θερμότητας αέρα για μια εφαρμογή σε κτήριο. Οι Safari et al. [7.7] εξέτασαν την υπερψύξη των PCM σε συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Επιπλέον, οι Ibrahim et al. [7.8] μελέτησαν εργασίες σχετικά με τη βελτίωση της

μεταφοράς θερμότητας των PCM για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας (TES). Οι Luo et al. [7.9] μελέτησαν ένα σύστημα φωτοβολταϊκών (PV)-PCM για τον έλεγχο της θερμοκρασίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με την εφαρμογή σύνθετου PCM με υψηλής θερμικής αγωγιμότητας σταθερής μορφής παραφίνη (ZDJN-28)/EG. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του συμβατικού φωτοβολταϊκού πλαισίου, η θερμοκρασία του πάνελ PV-PCM διατηρείται κάτω από τους 50°C με αυξημένη ισχύ εξόδου κατά 7.28% στη διαδικασία θέρμανσης. Οι Al-Waeli et al. [7.10] πρότειναν ένα νέο σύστημα θερμοφωτοβολταϊκού (PVT) που αποτελείτο από μια δεξαμενή γεμάτη με κερί παραφίνης αναμεμειγμένο με νανο-SiC για ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας. Η απόδοση του συστήματος συγκρίθηκε με άλλα συστήματα, συγκεκριμένα με φωτοβολταϊκό πλαίσιο, με δεξαμενή κεριού που ψύχθηκε με νερό, με δεξαμενή νερού που ψύχθηκε με νερό και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο νέο σύστημα μείωσε τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου περισσότερο από άλλα συστήματα, ιδίως την περίοδο αιχμής. Οι Nada et al. [7.11] διερεύνησαν τη θερμική απόδοση και την αύξηση της αποδοτικότητας ενός ολοκληρωμένου συστήματος κατασκευής φωτοβολταϊκών με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM) και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενσωμάτωση του PCM στην πίσω πλευρά των φωτοβολταϊκών πάνελ ρυθμίζει τη θερμοκρασία του πλαισίου και βελτιώνει την απόδοσή του. Τέλος, οι Youssef et al. [7.12] σχεδίασαν έναν εναλλάκτη θερμότητας PCM (HX) με σπειροειδείς σωλήνες και τον ενσωμάτωσαν σε ένα σύστημα έμμεσης ηλιακής υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας.

Για τις εφαρμογές, όπως για τη θέρμανση χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με συνηθισμένους ενσωματωμένους ηλιακούς συλλέκτες. Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν πολλές μελέτες που ερεύνησαν τα ηλιακά υποβοηθούμενα συστήματα και κυρίως με αντλίες θερμότητας [7.13]. Οι Mohanraj et al. [7.14] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας είναι ένας πολλά υποσχόμενος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για θέρμανση. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των πηγών ηλιακής ενέργειας με συστήματα αντλιών θερμότητας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση της κατανάλωσης συμβατικών πηγών ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων [7.14-7.15]. Γενικά, αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν κυρίως επίπεδους συλλέκτες για να θερμαίνουν το νερό στο δοχείο αποθήκευσης και στη συνέχεια το χρησιμοποιημένο αποθηκευμένο ζεστό νερό χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για την οδήγηση του

νερού για παράδειγμα σε μια αντλία θερμότητας αέρα για την παραγωγή θερμικού φορτίου. Αυτή η τεχνολογία έχει το πλεονέκτημα του υψηλότερου συντελεστή συμπεριφοράς (COP) σε σύγκριση με τις συμβατικές αντλίες θερμότητας λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας [7.13]. Σε πολλές μελέτες της βιβλιογραφίας, οι ερευνητές έχουν αναλύσει τη χρήση υβριδικών φωτοβολταϊκών ή θερμικών φωτοβολταϊκών αντί για επίπεδο συλλέκτη για την υποβοήθηση μιας αντλίας θερμότητας. Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη των Bellos et al. [7.16], όπου εξέτασαν διάφορους συνδυασμούς ηλιακών θερμικών συστημάτων και αντλιών θερμότητας, το κόστος ηλεκτρισμού αποτελεί αποφασιστικό παράγοντα για τη βιωσιμότητα κάθε συστήματος. Επιπλέον, υποστήριξαν ότι η χρήση θερμικών φωτοβολταϊκών συλλεκτών αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για το μέλλον, λόγω του αυξανόμενου ρυθμού της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος. Ο Atmaca [7.17] πραγματοποίησε μια πειραματική μελέτη μιας ηλιακής αντλίας θερμότητας και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αυτό το σύστημα είναι κατάλληλο για τοποθεσίες με υψηλό ηλιακό δυναμικό. Σε άλλη μελέτη, οι Porri et al. [7.18] σύγκριναν μια αντλία θερμότητας αέρα και ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας σε διάφορες συνθήκες.

Μια τεχνολογία που επιλέγεται όλο και περισσότερο την τελευταία δεκαετία είναι η ενδοδαπέδια θέρμανση όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3, ενότητα 3.1.1. Η ενεργειακή ανάλυση του συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης δείχνει ότι έχει πολλά πλεονεκτήματα και μπορεί να αποτελέσει μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση από άλλες πιο συνήθεις μορφές θέρμανσης [7.19]. Ένα παράδειγμα είναι ότι όταν ενσωματώνεται στο κτήριο, εξοικονομείται χώρος διαβίωσης και εργασίας [7.20]. Επιπλέον, τα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης μειώνουν την εποχική θέρμανση κατά 18% [7.21] και βελτιώνουν τις συνθήκες θερμικής άνεσης στα κτήρια [7.22]. Επιπλέον, με ένα σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, η υγρασία του δωματίου διατηρείται σε σταθερά επίπεδα και δεν υπάρχει μεταφορά σκόνης από τα ρεύματα αέρα των παραδοσιακών συστημάτων πηγής αέρα.

Ένα PCM μπορεί να ενσωματωθεί στη δομή του δαπέδου και επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα αποθήκευσης και να μειωθεί η ζήτηση ενέργειας. Η θερμική μάζα που είναι ενσωματωμένη σε σύστημα θέρμανσης δαπέδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση θερμικής ενέργειας εκτός αιχμής. Έτσι, τα φορτία αιχμής μπορούν να

μειωθούν και να μετατοπιστούν τη νύχτα, όταν το κόστος ηλεκτρισμού είναι χαμηλότερο και το λειτουργικό κόστος του συστήματος μπορεί να μειωθεί [7.23].

Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετές μελέτες που ασχολούνται με τη χρήση του PCM σε ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Για την εφαρμογή των PCM σε ένα ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης, οι πηγές θερμότητας μπορούν να είναι η ηλεκτρική ενέργεια, ο ηλιακός αέρας και το ζεστό νερό από αντλία θερμότητας. Οι Lin et al. [7.24-7.25] παρουσίασαν μια αριθμητική [7.24] και μια πειραματική μελέτη [7.25] ενός ηλεκτρικού συστήματος ακτινοβόλου δαπέδου με πλάκες PCM. Διαπίστωσαν ότι αυτή είναι μια πολλά υποσχόμενη ιδέα και δήλωσαν ότι η μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης δίνει τη δυνατότητα χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας των ωρών των χαμηλών τιμολογίων και τη δυνατότητα αξιοποίησής της όταν υπάρχει ανάγκη θέρμανσης. Οι Ansuini et al. [7.26] ανέπτυξαν ένα ακτινοβόλο σύστημα δαπέδου με PCM σε μορφή κόκκων. Τα PCM παρείχαν σημαντική ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας στις τρεις τελευταίες περιπτώσεις. Επιπλέον, οι Devaux και Farid [7.27] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση PCM με υψηλότερο σημείο τήξης με το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης επέτρεψε σημαντική μετατόπιση φορτίου αιχμής ενώ η χρήση PCM με χαμηλότερο σημείο τήξης στους τοίχους και την οροφή παρείχε την απαιτούμενη άνεση στο κτήριο. Οι Mays et al. [7.28] εξέτασαν ένα νέο σύστημα με κενό αέρα στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM. Το διάκενο αέρα λειτουργεί ως μόνωση προκειμένου να μειωθεί η διαρροή θερμότητας. Οι Farid και Kong [7.29] χρησιμοποίησαν ένα ενσωματωμένο PCM για να βελτιώσουν το υπάρχον σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση του PCM οδηγεί σε πολύ χαμηλότερη διακύμανση της θερμοκρασίας επιφάνειας και σε μια αποδεκτή θερμοκρασία επιφάνειας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Οι Jin και Zhang [7.30] διερεύνησαν ένα διπλό στρώμα PCM σε ένα σύστημα δαπέδου και τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι με τη χρήση PCM στο πάτωμα η ενέργεια που απελευθερώνεται από το δάπεδο στην περίοδο αιχμής αυξήθηκε κατά 41.1% και 37.9% κατά τη θέρμανση και την ψύξη αντίστοιχα. Οι Mazo et al. [7.31] ανέπτυξαν ένα μοντέλο για να προσομοιώσει ένα σύστημα ακτινοβολούμενου δαπέδου με PCM, το οποίο τροφοδοτήθηκε από μια αντλία θερμότητας. Συμπέραναν ότι υπάρχει εξοικονόμηση κατανάλωσης ενέργειας σχεδόν 18% με τη χρήση PCM. Οι Barzin et al. [7.32] πραγματοποίησαν πειράματα χρησιμοποιώντας PCM στους τοίχους σε συνδυασμό με ένα σύστημα ενδοδαπέδιας

θέρμανσης με PCM. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι σε πέντε ημέρες υπήρξε εξοικονόμηση ενέργειας και εξοικονόμηση ηλεκτρικού κόστους ίση με 18.8% και 28.7% αντίστοιχα. Οι Huang et al. [7.33] πραγματοποίησαν μια πειραματική και αριθμητική μελέτη και διερεύνησαν το ζεστό νερό από ηλιακό σύστημα ως πηγή θερμότητας για το PCM σε διπλό σύστημα θέρμανσης δαπέδου και τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι το 47.7% της ενέργειας από το ηλιακό νερό αποθηκεύτηκε και απελευθερώθηκε από το PCM. Επιπλέον, οι Zeng et al. [7.34] ανέπτυξαν και μελέτησαν πειραματικά μια καινοτόμο δομή ενός ολοκληρωμένου συστήματος θέρμανσης δαπέδου με σωλήνες νερού και με τη χρήση πλακών από PCM. Αυτοί έδειξαν ότι το σύστημα παρείχε σταθερή ροή θερμότητας και απέτρεπε μια μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας δαπέδου. Επιπλέον, το σύστημα αύξανε την ελάχιστη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα κατά 2°C-3°C υπό πειραματικές συνθήκες.

Συμπερασματικά, οι περισσότερες από τις μελέτες έχουν εφαρμόσει την ηλεκτρική ενέργεια ως πηγή θερμότητας για το PCM σε ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης και αρκετές μελέτες έχουν διερευνήσει το ζεστό νερό από την αντλία θερμότητας ως πηγή θερμότητας για το PCM σε ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Ακόμα, μερικές μελέτες έχουν διερευνήσει το ζεστό νερό από ηλιακό συλλέκτη ως πηγή θερμότητας για το PCM σε ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης ή χρησιμοποιούν δοχεία αποθήκευσης με PCM. Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν μελέτες που να έχουν εφαρμόσει και να έχουν συγκρίνει ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας που τροφοδοτούν με νερό ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης κτηρίων με ταυτόχρονη προσθήκη στρώματος PCM σ' αυτά. Έτσι, η μοντελοποίηση, η προσομοίωση και η μελέτη τέτοιων πρωτότυπων συστημάτων αποτελεί το κύριο κομμάτι αυτού του κεφαλαίου.

7.2 Επικύρωση απλού ηλιακού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης μέσω πειραματικών δεδομένων

7.2.1 Πειραματικά δεδομένα

Το Type 1270, που προσομοιώνει το PCM, έχει επικυρωθεί με πειραματικά αποτελέσματα σε τοίχους και δάπεδο τα οποία έχουν αναλυθεί στο κεφάλαιο 6 επομένως θεωρείται ως αξιόπιστο μοντέλο. Στη συνέχεια γίνεται η επικύρωση ενός απλού ηλιακού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης με τη χρήση πλακών PCM με σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με τα πειραματικά δεδομένα της έρευνας των Zeng et al. [7.34].

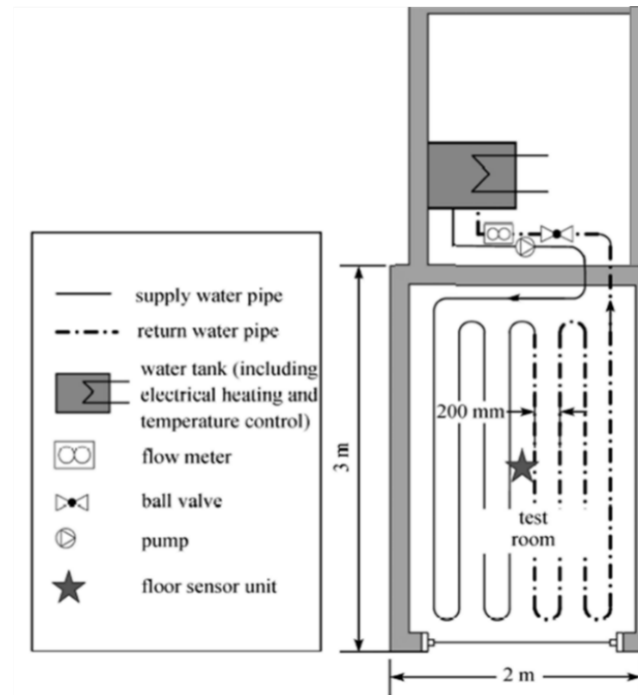
Οι Zeng et al. [7.34] διεξήγαγαν το πείραμά τους στο Πανεπιστήμιο Tsinghua, στο Πεκίνο (Κίνα). Η αίθουσα δοκιμών αποτελούνταν από δύο πανομοιότυπα περιβλήματα που ονομάζονταν πειραματικοί χώροι. Στα πειράματά τους, μόνο ένας πειραματικός χώρος χρησιμοποιήθηκε με πλάκες PCM στο δάπεδο. Ο πειραματικός χώρος είχε διαστάσεις 3m(μήκος) x 2m(πλάτος) x 2m(ύψος). Επιπλέον, ο χώρος είχε διπλό παράθυρο 1.6m x 1.5m με προσανατολισμό προς τον νότο και με συντελεστή θερμικής διαπερατότητας 1.4 W/m²K. Η εικόνα 7.2.1 δείχνει τον πειραματικό χώρο και το ολοκληρωμένο σύστημα που αναλύεται παρακάτω. Επιπλέον, τα υλικά των τοιχωμάτων περιγράφονται στον Πίνακα 7.2.1 και οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών των τοιχωμάτων συνοψίζονται στον Πίνακα 7.2.2. Η δομή του δαπέδου με πλάκα PCM περιγράφεται στην εικόνα 7.2.2. Η πλάκα PCM που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 5% γραφίτη και οι ιδιότητές του δίνονται στον πίνακα 7.2.3.

Πίνακας 7.2.1: Υλικά τοιχοποιίας.

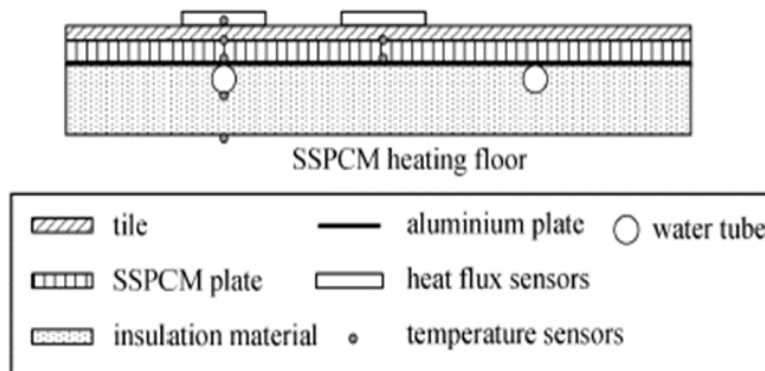
	<i>Δομικά Υλικά</i>	<i>Πάχη (mm)</i>
<i>Τοίχοι</i>	Πολυστερίνη	100
	Τούβλο	60
<i>Οροφή</i>	Πολυστερίνη	100
	Τούβλο	60
<i>Δάπεδο</i>	Πολυστερίνη	120
	Πλάκα αλουμινίου	0.8
	Πλάκα PCM	16
	Πλακάκι	8

Πίνακας 7.2.2: Φυσικές ιδιότητες υλικών του εξεταζόμενου χώρου.

<i>Δομικά Υλικά</i>	<i>Πυκνότητα (kg/m³)</i>	<i>Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kgK)</i>	<i>Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)</i>
<i>Τούβλο</i>	1800	880	0.4
<i>Πολυστερίνη</i>	30	1380	0.04



Εικόνα 7.2.1: Διάγραμμα πειραματικού συστήματος [7.34].



Εικόνα 7.2.2: Δομή δαπέδου με πλάκες PCM [7.34].

Πίνακας 7.2.3: Ιδιότητες του PCM του πειράματος [7.34].

Υλικό	Θερμοκρασία τήξης ($^{\circ}\text{C}$)	Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης (J/g)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	Πυκνότητα (kg/m^3)
PCM	30~35	139	0.77	850

Αναλυτικότερα, το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης περιλάμβανε δοχείο αποθήκευσης νερού με ηλεκτρική αντίσταση που λειτουργούσε με βάση έναν controller θερμοκρασίας, αντλία, μετρητή ροής, σφαιρικές βαλβίδες και σωλήνα PE-X για τη σύνδεση των άλλων εξαρτημάτων. Η διάταξη του σωλήνα ήταν μονής σπείρας με απόσταση σωλήνων 200 mm.

Η θερμοκρασία του ζεστού νερού παροχής ρυθμίστηκε στους 60°C. Προκειμένου να προσομοιωθούν οι διακεκομμένες συνθήκες θέρμανσης που σχετίζονται με την ηλιακή ενέργεια, οι περίοδοι παροχής ζεστού νερού καθορίστηκαν από τις 9:00 π.μ. έως τις 9:00 μ.μ. κάθε μέρα. Έτσι, το πάτωμα απελευθέρωνε την ενέργεια που αποθηκεύτηκε στις περιόδους παροχής ζεστού νερού για να θερμάνει το δωμάτιο για το υπόλοιπο της ημέρας. Η αντλία θέρμανσης άρχισε στις 9:00 π.μ. και σταματούσε στις 9:00 μ.μ. κάθε μέρα. Οι παροχές μάζας νερού καθορίστηκαν στα 94 g/s. Τα αποτελέσματα του πειράματος ελήφθησαν από τις 19 Μαρτίου έως και τις 22 Μαρτίου.

Αφού η παροχή ζεστού νερού άρχισε να λειτουργεί στις 9:00 π.μ., η ενέργεια μεταφερόταν στο δάπεδο με την πλάκα PCM με ζεστό νερό συνεχώς. Αν και μέρος της ενέργειας εκλυόταν στο δωμάτιο μέσω του δαπέδου, η θερμοκρασία της επιφάνειας της πλάκας PCM εξακολουθούσε να αυξάνεται γρήγορα. Όταν η παροχή ζεστού νερού σταματούσε να λειτουργεί στις 9:00 μ.μ., η πλάκα PCM απελευθέρωνε συνεχώς την ενέργεια που αποθηκεύτηκε κατά την προηγούμενη περίοδο και η θερμοκρασία της επιφάνειάς της μειωνόταν γρήγορα αρχικά. Όταν η θερμοκρασία της πλάκας PCM γινόταν χαμηλότερη από το σημείο μετάβασης φάσης, το PCM άρχισε να παγώνει, λόγω της μεγάλης λανθάνουσας θερμότητας της πλάκας PCM και η μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας της πλάκας PCM γινόταν πιο αργή.

Επιπλέον, το θερμικό φορτίο του χώρου υπολογίστηκε σε 41.3 W/m² με τον θερμοστάτη να δείχνει θερμοκρασία 20°C. Από τα αποτελέσματα του πειράματος (διάγραμμα 7.2.3) φαίνεται ότι η μέση θερμοκρασία εσωτερικού (πειραματικού) χώρου είναι περίπου 23°C και είναι σαφώς μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα στον εξεταζόμενο χώρο με το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM είναι περίπου 5°C. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι 25.4°C και η ελάχιστη 20.5°C.



Διάγραμμα 7.2.3: Διακύμανση εξωτερικής θερμοκρασίας και εσωτερικής θερμοκρασίας πειραματικού χώρου με πλάκα PCM στο δάπεδο μέσω πειράματος.

7.2.2 Επικύρωση απλού ηλιακού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης προσομοιωμένο με TRNSYS.

Στην συνέχεια γίνεται επικύρωση ενός απλού ηλιακού συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης που προσομοιάστηκε με το λογισμικό TRNSYS κάνοντας σύγκριση με τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα. Έτσι, με το λογισμικό TRNSYS, σχεδιάστηκε ο παραπάνω πειραματικός χώρος με την ίδια γεωμετρία και τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας και τα ίδια υλικά τοιχοποιίας. Όπου δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα από το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τιμές που βελτίωναν την απόδοση του συστήματος.

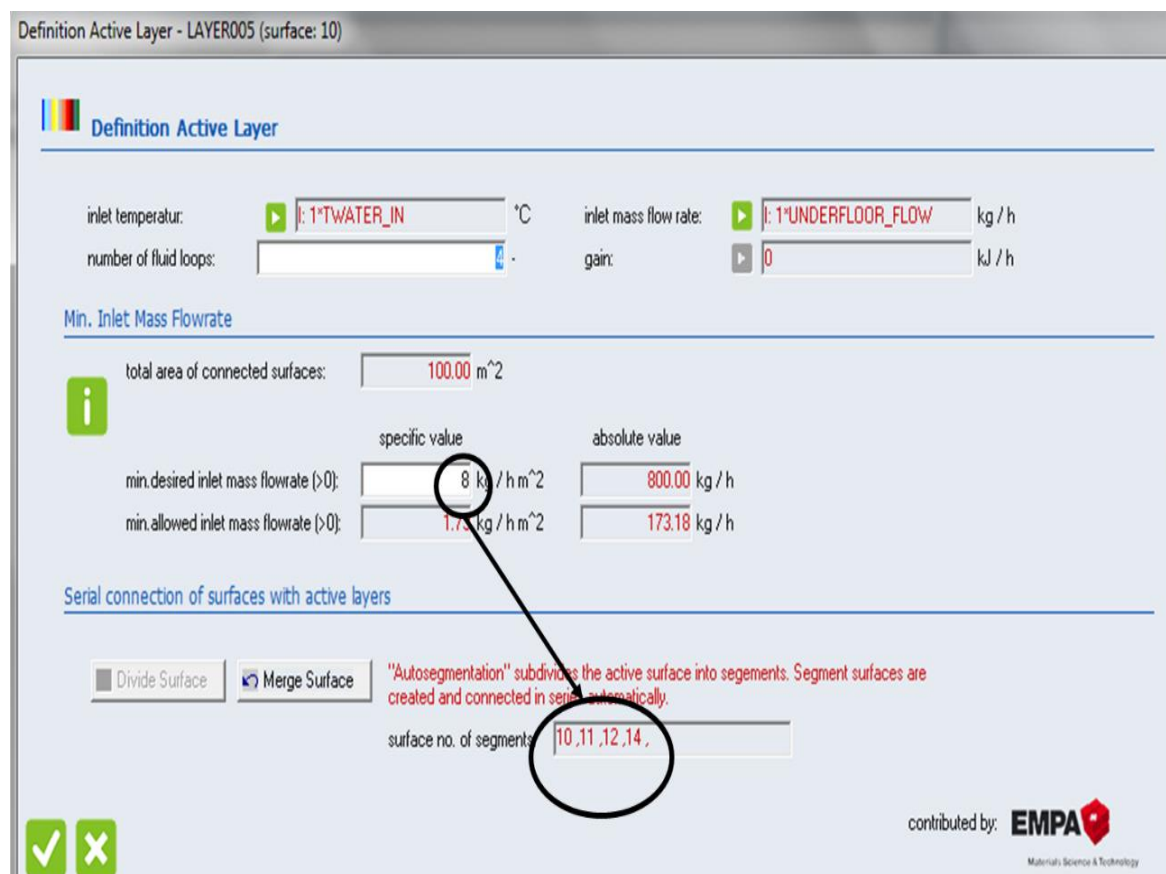
Η πρώτη διαφορά βρίσκεται στο PCM. Για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε το BioPCM, του επικυρωμένου Type 1270, με κωδικό προϊόντος M91 και με θερμοκρασία τήξης 29°C, δηλαδή κοντά στην θερμοκρασία τήξης του PCM του πειράματος. Τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου PCM (Q29/M91) δίνονται στον πίνακα 7.2.4.

Πίνακας 7.2.4: Ιδιότητες του PCM της προσομοίωσης [7.35].

<i>BioPCM</i>	<i>Q29/M91</i>
<i>Θερμοκρασία τήξης</i>	29°C
<i>Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης</i>	210 kJ/kg
<i>Ειδική θερμοχωρητικότητα</i>	2.2-4.5 kJ/kgK
<i>Θερμική αγωγιμότητα</i>	0.15-2.5W/mK
<i>Πάχος</i>	20 mm
<i>Θερμοκρασία στερεοποίησης</i>	25.5°C

Γενικά, για τη μοντελοποίηση μιας ενδοδαπέδιας θέρμανσης στο TRNSYS, προστίθεται στο δομικό στοιχείο-δάπεδο μία ενεργή στρώση (active layer). Αυτή η στρώση αποκαλείται ενεργή γιατί περιέχει σωληνώσεις πληρωμένες με ρευστό, οι οποίες είτε προσδίδουν είτε απορροφούν θερμότητα από την επιφάνεια. Γενικά, η διαδικασία καθορισμού μίας ενεργής στρώσης είναι όμοια με τη διαδικασία καθορισμού ενός οποιουδήποτε τοίχου. Έτσι, το στρώμα αυτό αποτελείται από τσιμέντο το οποίο περιέχει μέσα του τους σωλήνες του ζεστού νερού της ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Η ενεργή στρώση περιγράφεται με 5 παραμέτρους που είναι: η απόσταση των σωληνώσεων, η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα, το πάχος του στρώματος και η αγωγιμότητά του και η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού. Επιπλέον, μια σημαντική παράμετρος είναι ο αριθμός των κυκλωμάτων της ενδοδαπέδιας θέρμανσης τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο κτήριο. Μεγαλύτερος αριθμός κυκλωμάτων (loops) οδηγεί σε καλύτερη μετάδοση θερμότητας αλλά αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης. Ανάλογα τον καθορισμό των παραμέτρων της ενεργής στρώσης (διάμετρος σωλήνα, απόσταση σωληνίων, παροχή ρευστού, κλπ.) είναι πιθανόν να χρειάζεται να καθοριστούν διάφορα τμήματα (segments). Το πρώτο τμήμα θα έχει την υψηλότερη θερμοκρασία (άρα και υψηλότερη ροή θερμότητας στον χώρο), το δεύτερο τμήμα θα έχει λίγο μικρότερη ροή θερμότητας στον χώρο κλπ. Έτσι, ένα πρόσθετο λογισμικό της EMPA χωρίζει το δάπεδο σε τμήματα (segments) ανάλογα με την ελάχιστη παροχή που επιλέγεται από το χρήστη [7.36].

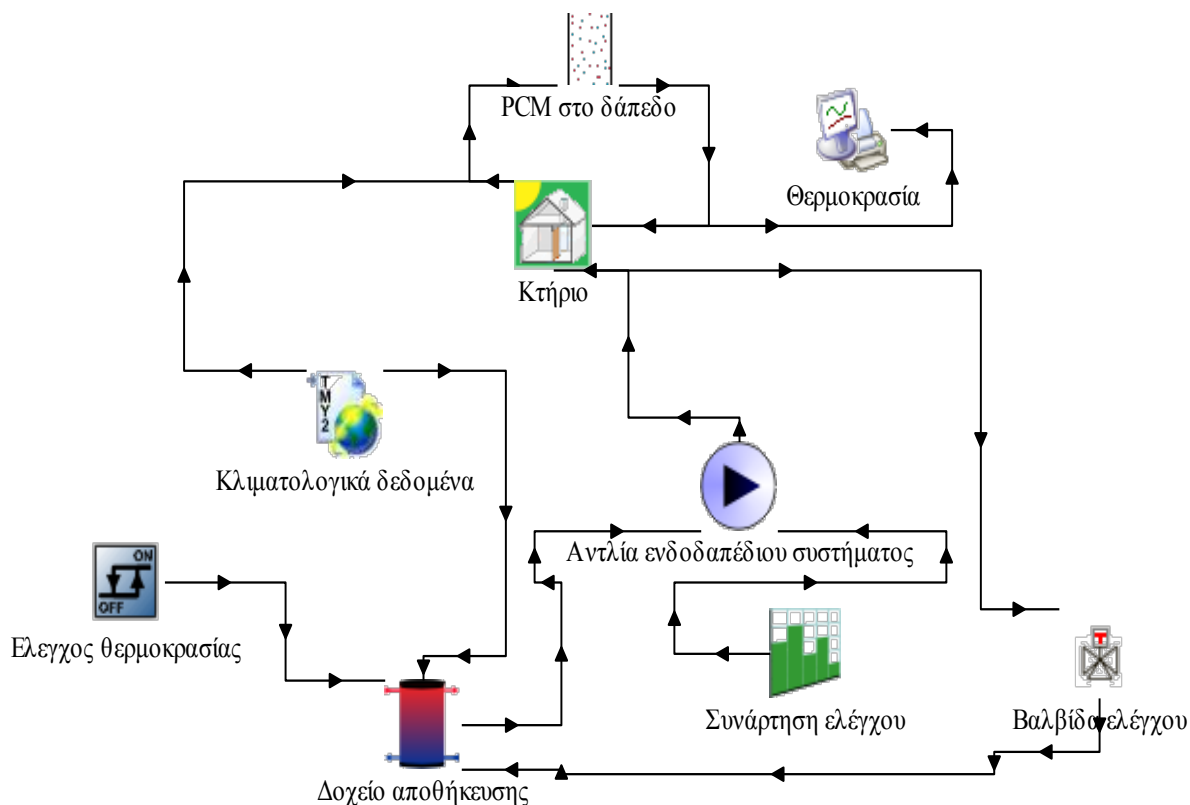
Στην επόμενη εικόνα 7.2.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα όπου ο χώρος χωρίζεται σε 4 κομμάτια όταν η ελάχιστη παροχή επιλέγεται στα 8 kg/hm².



Εικόνα 7.2.4: Διαχωρισμός σε τμήματα (segments) του ενδοδαπέδιου συστήματος με βάση την παροχή.

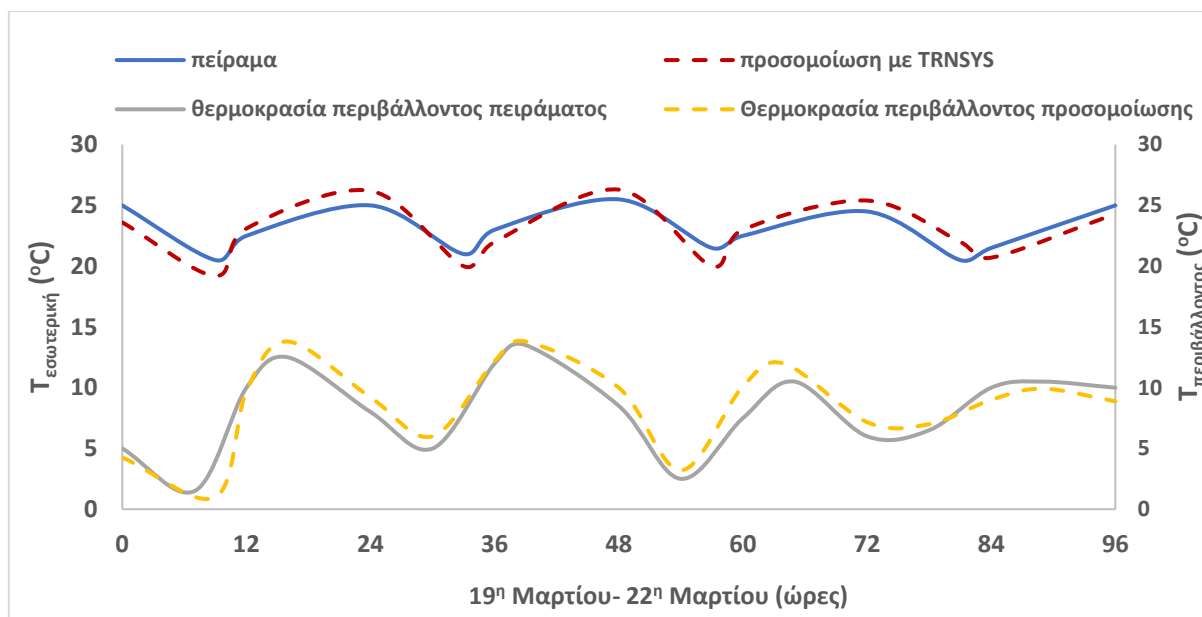
Η δεύτερη διαφορά από το πείραμα είναι ότι για την προσομοίωση της ενδοδαπέδιας θέρμανσης στο TRNSYS χρησιμοποιήθηκε ενεργό στρώμα από τσιμέντο (συνολικά 70 cm) το οποίο περιείχε μέσα του τους σωλήνες διαμέτρου 200mm του ζεστού νερού της ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Πιο συγκεκριμένα, το ενεργό στρώμα περιλαμβάνει χάλκινους σωλήνες με απόσταση 200 mm, οι οποίοι έχουν εξωτερική διάμετρο 2 cm και πάχος 2 mm και δε χρειάστηκε να καθοριστούν διάφορα τμήματα (segments) λόγω και του μικρού εμβαδού του δαπέδου. Επιπλέον, ο ρυθμός παροχής αέρα του κτηρίου επιλέχτηκε στις 0.8 εναλλαγές/ώρα. Ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης επιλέχτηκε να είναι 1 m³. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι όπως του πειράματος.

Στην εικόνα 7.2.5 φαίνεται η διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM και το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης στο TRNSYS.



Εικόνα 7.2.5: Η διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM και το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης στο TRNSYS.

Τα αποτελέσματα του πειράματος (διάγραμμα 7.2.3) δείχνουν ότι η μέση θερμοκρασία εσωτερικού χώρου είναι περίπου 23°C. Η διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα στον εξεταζόμενο χώρο με το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM είναι 4.9°C. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι 25.4°C και η ελάχιστη 20.5°C. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το TRNSYS (διάγραμμα 7.2.6) δείχνουν ότι η μέση θερμοκρασία εσωτερικού χώρου είναι περίπου 22.3°C. Η διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα στον εξεταζόμενο χώρο με το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με PCM είναι 7.1°C. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι 26.3°C και η ελάχιστη 19.2°C. Η μέση θερμοκρασιακή απόκλιση των εσωτερικών θερμοκρασιών είναι 0.8°C. Επιπλέον, η απόκλιση των θερμοκρασιών περιβάλλοντος συμβαδίζει με αυτή των εσωτερικών θερμοκρασιών. Η απόκλιση των θερμοκρασιών είναι αποδεκτή και λόγω των διαφορών μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης. Οπότε ένα απλό ηλιακό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης που προσομοιώθηκε με το TRNSYS μπορεί να ειπωθεί ότι λειτουργεί σωστά βάσει της σύγκρισής του με τον εξεταζόμενο πειραματικό χώρο.



**Διάγραμμα 7.2.6: Προφίλ θερμοκρασίας του πειραματικού χώρου και του εξωτερικού περιβάλλοντος για την περίοδο από 19^η - 22^η Μαρτίου στο Πεκίνο
α) από πείραμα, β) από προσομοίωση στο TRNSYS.**

7.3 Παραμετρική ανάλυση και βελτιστοποίηση ενός ηλιακά υποβοηθούμενου ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με στρώμα PCM στο δάπεδο κτηρίου.

7.3.1 Γενικά

Σε αυτή τη μελέτη εξετάζεται ένα ηλιακό υποβοηθούμενο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ενσωματωμένο στρώμα PCM. Η υπόθεση που εξετάζεται αφορά ένα κτήριο με εμβαδόν 100 m² για την τοποθεσία της Αθήνας (Ελλάδα). Το σύστημα θέρμανσης περιλαμβάνει επίπεδους συλλέκτες (FPC), δοχείο αποθήκευσης και βοηθητική πηγή θερμότητας για την παροχή πρόσθετης θέρμανσης όταν δεν υπάρχει επαρκές ηλιακό δυναμικό. Το στρώμα PCM χρησιμοποιείται στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα αποθήκευσης και να μειωθούν τα φορτία θέρμανσης. Οι περιπτώσεις με στρώμα PCM πάνω από τους ενδοδαπέδιους σωλήνες, κάτω από τους ενδοδαπέδιους σωλήνες και χωρίς PCM, διερευνώνται ενεργειακά και οικονομικά. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η εργασία παρουσιάζει την απόδοση του συλλέκτη, την απόδοση του συστήματος, τη βοηθητική κατανάλωση ενέργειας, την ηλιακή κάλυψη και το προφίλ εσωτερικής θερμοκρασίας.

Επιπλέον, διεξάγεται μια οικονομική ανάλυση προκειμένου να διερευνηθεί ποια περίπτωση είναι η πλέον κατάλληλη από οικονομική άποψη. Εξ όσων γνωρίζουμε, δεν υπάρχουν παρόμοιες μελέτες που διερευνούν ενεργειακά και οικονομικά τα ηλιακά υποβοηθούμενα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με διάφορα σενάρια PCM και συνεπώς αυτή η μελέτη παρουσιάζει σημαντική πρωτοτυπία.

Η προσομοίωση γίνεται και εδώ με το εμπορικό λογισμικό TRNSYS το οποίο εφαρμόζει ένα ενεργό στρώμα για την προσομοίωση του συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Το μοντέλο του PCM που χρησιμοποιείται είναι και εδώ το επικυρωμένο μοντέλο (Type 1270) της TESS [7.37] και συνδέεται με το Type 56 [7.36] για την προσομοίωση του κτηρίου.

7.3.2 Περιγραφή εξεταζόμενου κτηρίου και χρησιμοποιούμενου PCM

Ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης είναι η διερεύνηση της χρήσης του PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης που τροφοδοτείται από τον ηλιακό συλλέκτη. Το εξεταζόμενο κτήριο είναι το ίδιο με αυτό του κεφαλαίου 6 και συγκεκριμένα με της ενότητας 6.2.2.1. Σ' αυτή τη μελέτη θεωρείται ότι 7 άτομα εργάζονται μέσα στο κτήριο, το φορτίο του εξοπλισμού είναι ίσο με 350 W και το φορτίο φωτισμού είναι περίπου 500 W. Το μόνο που αλλάζει είναι η δομή του δαπέδου το οποίο αποτελείται από 0.01m πάτωμα δαπέδου, τσιμέντο 0.06 m, ενεργό στρώμα με τις σωληνώσεις του ενδοδαπέδιου συστήματος, μόνωση 0.05 m και μπετόν 0.20 m.

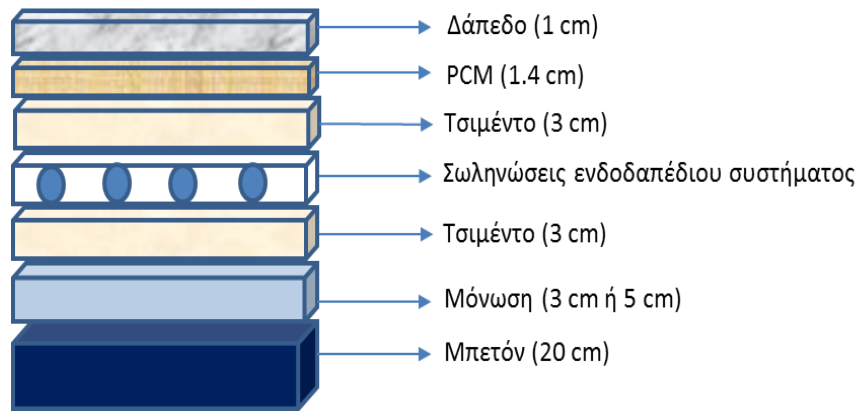
Για τη μοντελοποίηση της ενδοδαπέδιας θέρμανσης στο TRNSYS, όπως έχει λεχθεί προηγουμένως, προστέθηκε στο δάπεδο ένα ενεργό στρώμα (active layer). Αυτό το στρώμα αποκαλείται ενεργό γιατί περιέχει σωληνώσεις πληρωμένες με ρευστό, οι οποίες είτε προσδίδουν είτε απορροφούν θερμότητα από την επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, το ενεργό στρώμα περιλαμβάνει χάλκινους σωλήνες με απόσταση 10 cm, οι οποίοι έχουν εξωτερική διάμετρο 2 cm και πάχος 2 mm. Οι προηγούμενες παράμετροι επιλέγονται προκειμένου να προσομοιωθεί ένα τυπικό σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Η παροχή νερού και η θερμοκρασία στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης είναι δεδομένα εισόδου από άλλα components του συστήματος. Ο ρυθμός παροχής είναι μια βασική παράμετρος που καθορίζει την 'τμηματοποίηση' του δαπέδου σε

διαφορετικούς βρόχους προκειμένου να κατασκευαστεί ένα κατάλληλο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης.

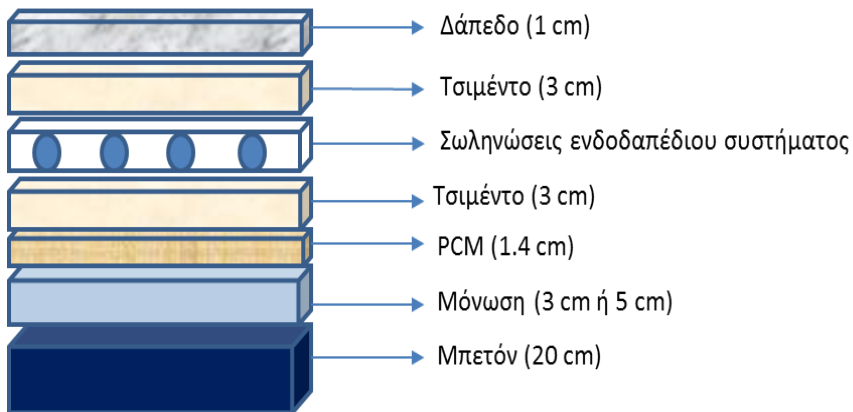
Σε αυτή τη μελέτη, η παροχή μάζας έχει επιλεγεί σε 8 kg/hm^2 , τιμή που οδηγεί σε 4 τμήματα στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης [5]. Συγκεκριμένα, υπάρχουν 4 διαφορετικοί βρόχοι και κάθε βρόχος είναι υπεύθυνος για την παροχή θέρμανσης στα 25 m^2 του εξεταζόμενου κτηρίου ($100\text{m}^2/4 = 25\text{m}^2$). Επιπλέον, στην παρούσα μελέτη, τα επίπεδα θερμοκρασίας του συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης και των στρωμάτων δαπέδου υπολογίζονται με το TRNSYS. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ του δαπέδου και του εσωτερικού αέρα υπολογίζεται επίσης σύμφωνα με τα επιλεγμένα επίπεδα θερμοκρασίας. Ένας θερμοστάτης προσπαθεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα πάνω από 22°C και τα θερμικά φορτία υπολογίστηκαν στα 2700 kWh ή 27 kWh/m^2 για το εξεταζόμενο κτήριο στην Αθήνα. Η τιμή για τα θερμικά φορτία είναι σχετικά χαμηλή, επειδή το εξεταζόμενο κτήριο είναι καλά μονωμένο: οι τοίχοι έχουν μόνωση πάχους 6 cm , η οροφή έχει πάχος μόνωσης 7 cm και το δάπεδο είναι επίσης καλά μονωμένο. Ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας (U) του κτηρίου είναι περίπου $0.573 \text{ W/m}^2\text{K}$, ενώ οι ελληνικοί κανονισμοί υποδηλώνουν ότι το μέγιστο όριο για την εξεταζόμενη περίπτωση είναι $0.73 \text{ W/m}^2\text{K}$. Επιπλέον αξίζει να προστεθεί ότι τα παράθυρα έχουν συνολικά επιφάνεια 12 m^2 που είναι το $1/8$ της επιφάνειας του δαπέδου.

Το PCM προσομοιώνεται με το επικυρωμένο Type 1270 που ανήκει στη βιβλιοθήκη TESS του TRNSYS. Εξετάζονται δύο κύριες περιπτώσεις: (α) το στρώμα PCM τοποθετείται πάνω από τις σωληνώσεις του συστήματος θέρμανσης και (β) το στρώμα PCM τοποθετείται κάτω από τις σωληνώσεις του συστήματος θέρμανσης όπως απεικονίζονται στην εικόνα 7.3.1. Το PCM που χρησιμοποιείται είναι της ίδιας εταιρείας με αυτή του προηγούμενου κεφαλαίου και είναι το BioPCM, οι ιδιότητες του οποίου φαίνονται στον πίνακα 7.3.1.

Στην παρούσα μελέτη, το ζεστό νερό του ενδοδαπέδιου συστήματος είναι περίπου 40°C , έτσι το σημείο τήξης των 29°C επιλέγεται ως η πλησιέστερη επιλογή στα επίπεδα θερμοκρασίας λειτουργίας. Ειδικότερα, το εξεταζόμενο PCM είναι το BioPCM Q29/M91.



(α)



(β)

Εικόνα 7.3.1: Στρώματα του δαπέδου του εξεταζόμενου συστήματος: (α) με PCM πάνω (πάνω από τις σωληνώσεις του συστήματος θέρμανσης) και (β) με PCM κάτω (κάτω από τις σωληνώσεις του συστήματος θέρμανσης).

Πίνακας 7.3.1: Ιδιότητες του PCM των προσομοιώσεων [7.35].

<i>BioPCM</i>	<i>Q29/M91</i>
Θερμοκρασία τήξης	29°C
Λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης	210 kJ/kg
Ειδική θερμοχωρητικότητα	2.2-4.5 kJ/kgK
Θερμική αγωγιμότητα	0.15-2.5W/mK
Πάχος	20 mm
Θερμοκρασία στερεοποίησης	25.5°C

7.3.3 Περιγραφή του εξεταζόμενου συστήματος

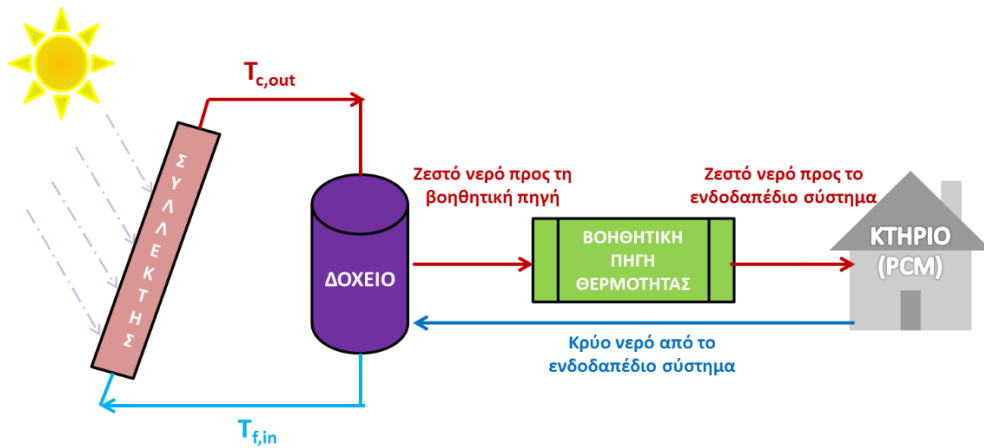
Η παρούσα μελέτη διεξάγεται με το λογισμικό TRNSYS που είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης που συνδέει διάφορα στοιχεία (τύπους) για να δημιουργήσει ένα συνολικό σύστημα. Η προσομοίωση του PCM διεξάγεται με το επικυρωμένο Type 1270. Η ανάλυση πραγματοποιείται με ένα χρονικό βήμα 5 λεπτών που έχει προσδιοριστεί μετά από ανάλυση. Η εξεταζόμενη περίοδος είναι η χειμερινή (Νοέμβριος-Απρίλιος) για την Αθήνα.

Η εικόνα 7.3.2 απεικονίζει το ηλιακά υποβοηθούμενο εξεταζόμενο σύστημα θέρμανσης και η εικόνα 7.3.3 απεικονίζει την απλή διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM και το ηλιακά υποβοηθούμενο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης στο TRNSYS. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Β, η εικόνα Β2 δείχνει την ολοκληρωμένη διαμόρφωση του συστήματος στο TRNSYS.

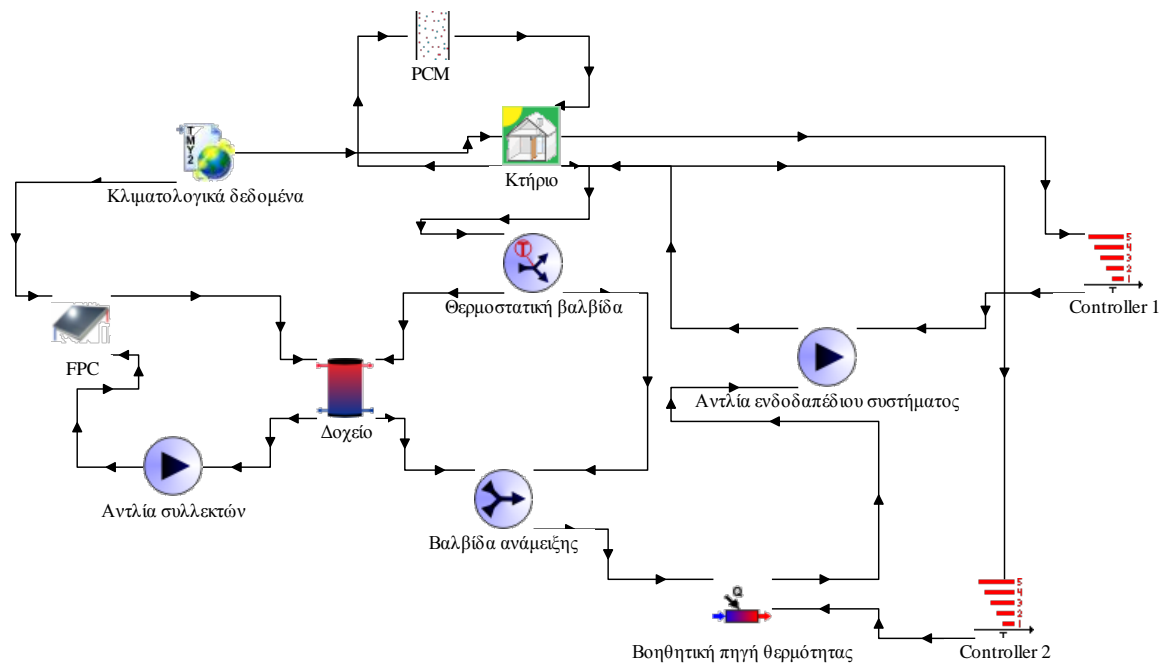
Οι επίπεδοι συλλέκτες εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία και η χρήσιμη θερμότητα αποθηκεύεται στο δοχείο αποθήκευσης. Η λειτουργία ηλιακού συλλέκτη επιλέγεται κατά τη διάρκεια της χειμερινής ημέρας και πιο συγκεκριμένα μεταξύ 6:00 και 18:00. Το δοχείο αποθήκευσης τροφοδοτεί το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Επιπλέον, χρησιμοποιείται μια βοηθητική πηγή θερμότητας για να βοηθηθούν οι ηλιακοί συλλέκτες ώστε να εξασφαλιστεί η κατάλληλη θέρμανση στο ενδοδαπέδιο σύστημα. Σημειώνεται ότι υπάρχει ένα σύστημα ελέγχου το οποίο διατηρεί την εσωτερική θερμοκρασία πάνω από 22°C. Η βοηθητική πηγή θερμότητας λειτουργεί όταν υπάρχουν περισσότερες ανάγκες θέρμανσης και η εσωτερική θερμοκρασία φτάνει τους 21°C. Έτσι, στην πράξη υπάρχει ένα σύστημα ελέγχου σε δύο στάδια. Ο πίνακας 7.3.2 περιλαμβάνει τις τιμές των κύριων παραμέτρων του συστήματος και ο πίνακας 7.3.3 περιλαμβάνει τα στοιχεία του συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν στο αναπτυγμένο μοντέλο TRNSYS.

Σε συνέχεια διεξάγεται μια παραμετρική μελέτη προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός του συστήματος. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλή κατανάλωση βοηθητικής θερμότητας (ή υψηλή ηλιακή κάλυψη) και να υπάρχει ένα οικονομικά βιώσιμο σύστημα. Επομένως, οι δύο εξεταζόμενοι παράμετροι είναι η εποχιακή βοηθητική κατανάλωση θερμότητας και το συνολικό κόστος του συστήματος (κόστος κεφαλαίου και λειτουργικό κόστος σε όλη τη διάρκεια ζωής του). Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθούν και οι δύο παράμετροι και να βρεθεί ο

σχεδιασμός που είναι πιο κοντά στο ιδανικό μέσω μιας πολύ-παραγοντικής διαδικασίας βελτιστοποίησης. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης είναι η συλλεκτική επιφάνεια (από 10 m² έως 40 m²), ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης (από 1.0 m³ έως 2.5 m³), το πάχος της μόνωσης και η θέση του στρώματος PCM. Συγκεκριμένα μελετώνται πέντε περιπτώσεις: μία περίπτωση χωρίς PCM, δύο περιπτώσεις με PCM πάνω από το σωλήνα (με μόνωση πάχους 3cm και 5cm) και δύο περιπτώσεις με PCM κάτω από το σωλήνα (με μόνωση πάχους 3cm και 5cm).



Εικόνα 7.3.2: Το ηλιακά υποβοηθούμενο εξεταζόμενο σύστημα θέρμανσης.



Εικόνα 7.3.3: Απλή διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM και το ηλιακά υποβοηθούμενο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης στο TRNSYS.

Πίνακας 7.3.2: Τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

Παράμετροι	Τιμές
Συλλεκτική επιφάνεια [A_c]	10 - 40 m ²
Κλίση του συλλέκτη [β]	45°
F_R (τ_a)	0.80
$F_R U_L$	3.61
Παροχή μάζας στο συλλέκτη [m_c]	1500 kg/h
Ειδική θερμοχωρητικότητα νερού [c_p]	4.19 kJ/kg K
Όγκος δοχείου [V]	1.0 – 2.5 m ³
Ισχύς βοηθητικής πηγής	3 kW
Θερμοκρασία θέρμανσης θερμοστάτη	21 / 22°C
Ωράριο λειτουργίας συλλέκτη	6:00-18:00

Πίνακας 7.3.3: Στοιχεία συστήματος και μοντέλα στο TRNSYS.

Στοιχεία συστήματος	Μοντέλα (Types) στο TRNSYS	Περιγραφή
Κτήριο	56	Προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του κτηρίου
PCM	1270	Προσομοίωση της αποθηκευμένης ενέργειας στο στρώμα του PCM
Επίπεδος συλλέκτης (FPC)	1b	Υπολογισμός της ωφέλιμης αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη
Βοηθητική πηγή θερμότητας	6	Δίνει extra θερμότητα στο ζεστό νερό πριν την είσοδό του στο ενδοδαπέδιο σύστημα
Αντλία νερού	3b	Προσομοιώνει την συμπεριφορά της αντλίας στη παραγωγή θερμότητας
Δοχείο αποθήκευσης	4b	Υπολογίζει την ενεργειακή ισορροπία του αποθηκευμένου νερού
Θερμοστατική βαλβίδα	11b	Ελέγχει τη διαδικασία ανάμειξης ελέγχοντας το επίπεδο της θερμοκρασίας
Βαλβίδα ανάμειξης Ρυθμιστής θερμοκρασίας (Controller)	11h	Χρησιμοποιείται για την ανάμειξη υγρών
	970	Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας

7.3.4 Μαθηματική μοντελοποίηση

Οι βασικές μαθηματικές εξισώσεις για τη μελέτη του συστήματος δίνονται σε αυτή την παράγραφο. Αυτές οι εξισώσεις αφορούν τις ενεργειακές ισορροπίες, τους ορισμούς των παραμέτρων και είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

A) Μοντελοποίηση του ηλιακού συστήματος

Το ηλιακό σύστημα περιλαμβάνει επίπεδο συλλέκτη και δοχείο αποθήκευσης. Η ωφέλιμη ισχύς που παράγεται από τον συλλέκτη υπολογίζεται από το ενεργειακό ισοζύγιο στον όγκο του ρευστού, χρησιμοποιώντας τη ροή μάζας στο συλλέκτη (m_c), την ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού (c_p) καθώς και τις θερμοκρασίες εισόδου ($T_{c,in}$) και εξόδου ($T_{c,out}$) αυτού από τον συλλέκτη. Συνεπώς ισχύει:

$$Q_u = m_c \cdot c_p \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (7.3.1)$$

Η διαθέσιμη ισχύς από την ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη (Q_s) υπολογίζεται ως το γινόμενο της συλλεκτικής επιφάνειας (A_c) και της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T):

$$Q_s = A_c \cdot G_T \quad (7.3.2)$$

Ο βαθμός απόδοσης του συλλέκτη (η_{th}) ορίζεται ο λόγος της ωφέλιμης θερμότητας (Q_u) προς τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη (Q_s):

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (7.3.3)$$

Το ισοζύγιο ενέργειας στο δοχείο αποθήκευσης και στη βοηθητική πηγή θερμότητας παρουσιάζεται στην εξίσωση 7.3.4:

$$Q_u + Q_{aux} = Q_{st} + Q_{load} + Q_{loss} \quad (7.3.4)$$

Συγκεκριμένα, η ενέργεια που δίνεται από τον ηλιακό συλλέκτη (Q_u) και τη βοηθητική πηγή (Q_{aux}) χωρίζεται σε αποθηκευμένη ενέργεια στο δοχείο (Q_{st}), στο θερμικό φορτίο που προσφέρεται στο ενδοδαπέδιο σύστημα (Q_{load}) και στις θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον (Q_{loss}). Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει εναλλάκτης θερμότητας μέσα στο δοχείο αποθήκευσης και το ζεστό νερό αναμειγνύεται απευθείας με το νερό του δοχείου αποθήκευσης.

B) Μοντελοποίηση της βοηθητικής πηγής θερμότητας

Η βοηθητική πηγή θερμότητας υπάρχει για να παρέχει επιπλέον θερμότητα στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί μια καθορισμένη θερμοκρασία στους 45°C, οπότε όταν η θερμοκρασία του νερού από το δοχείο είναι χαμηλότερη, τότε λειτουργεί η βοηθητική πηγή θερμότητας. Πρακτικά, η βοηθητική ενέργεια θέρμανσης (Q_{aux}) δίνεται παρακάτω για ($T_1 < T_{set}$), με το $T_{set} = 45^\circ\text{C}$ και το T_1 να είναι η θερμοκρασία φορτίου από το δοχείο αποθήκευσης:

$$Q_{aux} = m_{hs} \cdot c_p \cdot (T_{set} - T_1) \quad (7.3.5)$$

Το θερμικό φορτίο του κτηρίου (Q_h) υπολογίζεται ως:

$$Q_h = m_{hs} \cdot c_p \cdot (T_{in}^B - T_{out}^B) \quad (7.3.6)$$

όπου c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού, η οποία είναι ίση με 4.19 kJ/kgK και ο εκθέτης B συμβολίζει το επίπεδο θερμοκρασίας του ενδοδαπέδιου συστήματος. Η ηλιακή κάλυψη (f) ορίζεται έμμεσα ως:

$$f = 1 - \frac{Q_{aux}}{Q_h} \quad (7.3.7)$$

Η ενεργειακή απόδοση του συστήματος (η_{en}) υπολογίζεται ως:

$$\eta_{en} = \frac{Q_h}{Q_s + Q_{aux}} \quad (7.3.8)$$

Γ) Μοντελοποίηση του PCM (Type 1270)

Για τη μοντελοποίηση του PCM ισχύουν αυτά που έχουν ειπωθεί στην ενότητα 6.1.2.1. Οι δύο βασικές εξισώσεις είναι οι 7.3.9 και 7.3.10. Όταν το PCM έχει στερεοποιηθεί πλήρως, η θερμοκρασία στο τέλος του χρονικού βήματος δίνεται ως:

$$T_{final} = T_{initial} + \frac{q_1 + q_2}{m_{pcm} \cdot c_{p,solid}} \quad (7.3.9)$$

Όταν έχει επέλθει πλήρης τήξη του PCM, η τελική θερμοκρασία του δίνεται ως:

$$T_{final} = T_{initial} + \frac{q_1 + q_2}{m_{pcm} \cdot c_{p,liquid}} \quad (7.3.10)$$

όπου q_1 και q_2 είναι οι ποσότητες εισροής ενέργειας στο PCM από τα οριακά στρώματα τοιχώματος, m_{pcm} είναι η μάζα του PCM, $c_{p,solid}$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα στην στερεή κατάσταση του PCM και $c_{p,liquid}$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα στην υγρή κατάσταση του PCM.

Δ) Μοντελοποίηση οικονομικής ανάλυσης

Η οικονομική αξιολόγηση του εξεταζόμενου συστήματος διεξάγεται εφαρμόζοντας τον υπολογισμό του συνολικού κόστους του συστήματος (C_{total}). Ο δείκτης αυτός λαμβάνει υπόψη το κόστος επένδυσης (κεφαλαίου) του συστήματος ($C_{capital}$) και το μεταβλητό κόστος για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος ($C_{variable}$). Η εξίσωση 7.3.11 δίνει τον ορισμό του συνολικού κόστους που είναι το άθροισμα του κόστους κεφαλαίου και του μεταβλητού κόστους:

$$C_{total} = C_{capital} + C_{variable} \quad (7.3.11)$$

Το συνολικό κόστος κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης είναι διαφορετικό και έτσι ακολουθείται διαφορετική διαδικασία σε κάθε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, η εξίσωση 7.3.12 δείχνει ότι το κόστος του PCM λαμβάνεται υπόψη μόνο στις περιπτώσεις με PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Επιπλέον, τα διαφορετικά πάχη μόνωσης αντιστοιχούν σε διαφορετικό κόστος του συστήματος. Ο Πίνακας 7.3.4 περιλαμβάνει τα χρησιμοποιούμενα κόστη για την ανάλυση αυτή.

$$C_{capital} = \begin{cases} A_c \cdot C_c + V_t \cdot C_t + C_{aux} + C_{und} \\ A_c \cdot C_c + V_t \cdot C_t + C_{aux} + C_{und} + C_{pcm,i} \end{cases} \quad (7.3.12)$$

Η εξίσωση 7.3.13 δείχνει τον τρόπο που υπολογίζεται το μεταβλητό κόστος.

$$C_{variable} = Q_{aux} \cdot K_{aux} \cdot R + K_{O\&M} \quad (7.3.13)$$

όπου K_{aux} είναι το κόστος παραγωγής βοηθητικής θερμότητας σε [€/kWh] και $K_{O\&M}$ είναι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης που είναι ίσο με 0.01 του $C_{capital}$. Η παράμετρος R είναι τα ‘πραγματικά’ χρόνια της διάρκειας ζωής της επένδυσης που λαμβάνει υπόψη το επιτόκιο αναγωγής χρήματος, όπως δείχνει η παρακάτω εξίσωση:

$$R = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (7.3.14)$$

Πρακτικά, τα ‘πραγματικά’ χρόνια (R) είναι μικρότερα από τη διάρκεια ζωής της επένδυσης (N).

Η ετήσια παραγωγή θερμότητας του συστήματος δίνεται από τον τύπο:

$$Q_{aux} = \int_{November}^{April} q_{aux} dt \quad (7.3.15)$$

Επιπλέον, το βέλτιστο σύστημα προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μια πολύ-παραγοντική διαδικασία αξιολόγησης. Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης θερμότητας και η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους είναι οι δύο στόχοι αυτής της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο στόχος αυτής της μεθοδολογίας αξιολόγησης είναι η ελαχιστοποίηση της ακόλουθης συνάρτησης παραγόντων (F):

$$F = \sqrt{\left(\frac{Y-Y_{min}}{Y_{max}-Y_{min}}\right)^2 + \left(\frac{X-X_{min}}{X_{max}-X_{min}}\right)^2} \quad (7.3.16)$$

Έτσι, αυτή η συνάρτηση παραγόντων χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των βέλτιστων σημείων ενός Pareto κάθε φορά. Δηλαδή εκφράζει την αδιάστατη γεωμετρική απόσταση όλων των σημείων από το ιδεατό σημείο. Αυτό με τη μικρότερη απόσταση είναι το βέλτιστο σημείο.

Η παράμετρος Y είναι η κατανάλωση θερμότητας και το X είναι το συνολικό κόστος (C_{total}). Οι δείκτες "min" και "max" αντιστοιχούν στις ελάχιστες και μέγιστες κάθε φορά τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων αντίστοιχα. Η επιλεγμένη συνάρτηση αξιολογεί και τις δύο παραμέτρους (X και Y) με έναν αδιάστατο τρόπο λαμβάνοντας υπόψη τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές κάθε παραμέτρου μεταξύ των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Οι αδιάστατες παράμετροι αξιολογούνται με την ίδια βαρύτητα στην συνάρτηση παραγόντων και αυτή είναι μια εύλογη παραδοχή της ακολουθούμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Ο Πίνακας 7.3.4 περιλαμβάνει τα οικονομικά δεδομένα αυτής της μελέτης. Συγκεκριμένα, το επιτόκιο αναγωγής χρήματος (r) επιλέγεται στο 3%, η διάρκεια ζωής της επένδυσης (N) στα 25 έτη και το κόστος παραγωγής βοηθητικής θερμότητας (K_{aux}) σε 0.10 €/kWh. Τέλος, το κόστος των ηλιακών συλλεκτών έχει επιλεγεί στα 150 €/m² που είναι μια αντιπροσωπευτική τιμή για όλες τις εξεταζόμενες συλλεκτικές επιφάνειες από 10 m² έως 40 m².

Πίνακας 7.3.4: Οικονομικά δεδομένα της μελέτης.

<i>Παράμετροι</i>	<i>Τιμές</i>	<i>Αναφορές</i>
<i>Κόστος συλλέκτη (C_c)</i>	150 €/m ²	[7.38]
<i>Κόστος δοχείου αποθήκευσης (C_i)</i>	500 €/m ³	[7.38]
<i>Κόστος βοηθητικής πηγής (C_{aux})</i>	100 €	[7.39]
<i>Κόστος ενδοδαπέδιου συστήματος (C_{und})</i>	3000 €	[7.39]
<i>Κόστος PCM με μόνωση 0.05m ($C_{pcm,1}$)</i>	20-30 €/m ²	[7.40]
<i>Κόστος PCM με μόνωση 0.03m ($C_{pcm,2}$)</i>	15-25 €/m ²	[7.40]
<i>Επιτόκιο αναγωγής χρήματος (r)</i>	3%	[7.41]
<i>Διάρκεια ζωής επένδυσης (N)</i>	25 years	[7.38]
<i>Κόστος παραγωγής βοηθητικής θερμότητας (K_{aux})</i>	0.10 €/kWh	[7.42]
<i>Κόστος λειτουργίας και συντήρησης ($K_{O\&M}$)</i>	1% $C_{capital}$	[7.42]

7.3.5 Προσομοίωση και αποτελέσματα

A) Ενεργειακή αξιολόγηση του συστήματος

Τα διαγράμματα 7.3.4 έως 7.3.7 απεικονίζουν τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης σχετικά με την ωφέλιμη ισχύ των συλλεκτών, την καταναλισκόμενη ενέργεια από τη βοηθητική πηγή, την ενεργειακή απόδοση του συστήματος και την ηλιακή κάλυψη. Τα διαγράμματα 7.3.4α έως 7.3.4δ δείχνουν την ωφέλιμη ισχύ των συλλεκτών (Q_u) για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας (A_c) και για διαφορετικούς όγκους του δοχείου αποθήκευσης (V). Είναι προφανές ότι το μεγαλύτερο εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας αυξάνει την παραγωγή ωφέλιμης ισχύος αλλά με μειωμένο ρυθμό. Γενικά παρατηρείται ότι η χρήση PCM μειώνει την παραγωγή της ωφέλιμης ισχύος των συλλεκτών κατά περίπου 5% έως 9%. Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καλύτερη περίπτωση με τη μεγαλύτερη μείωση είναι όταν το στρώμα PCM βρίσκεται κάτω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων, σε σύγκριση με τη μόνωση που έχει πάχος 0.05 m και 0.03 m, είναι ανεπαίσθητη.

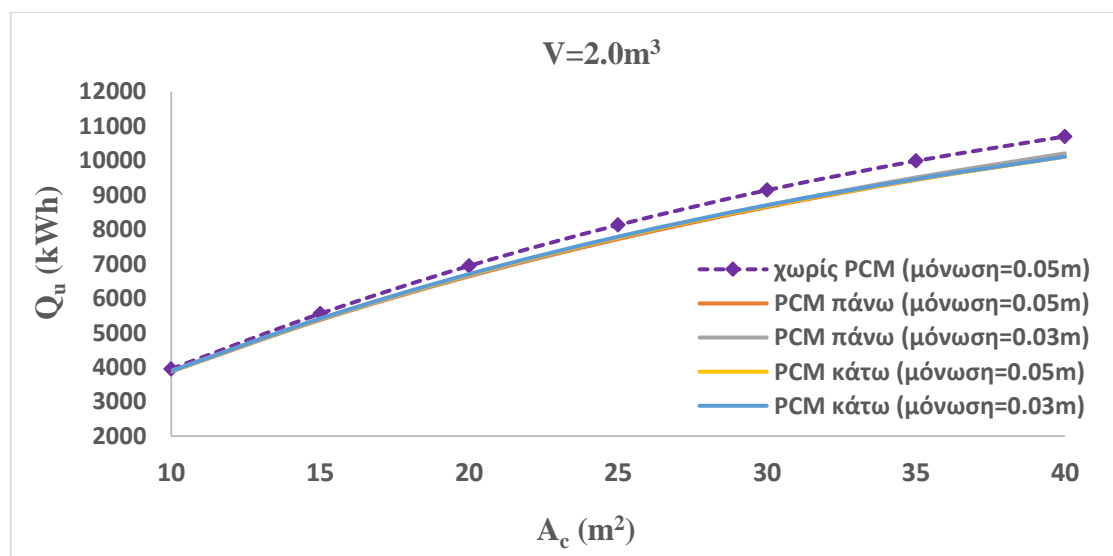
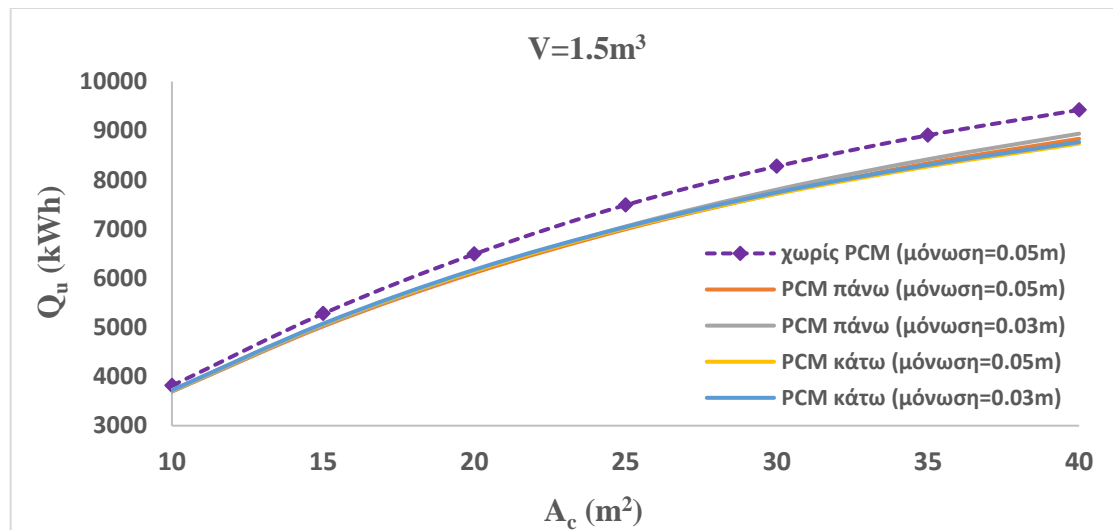
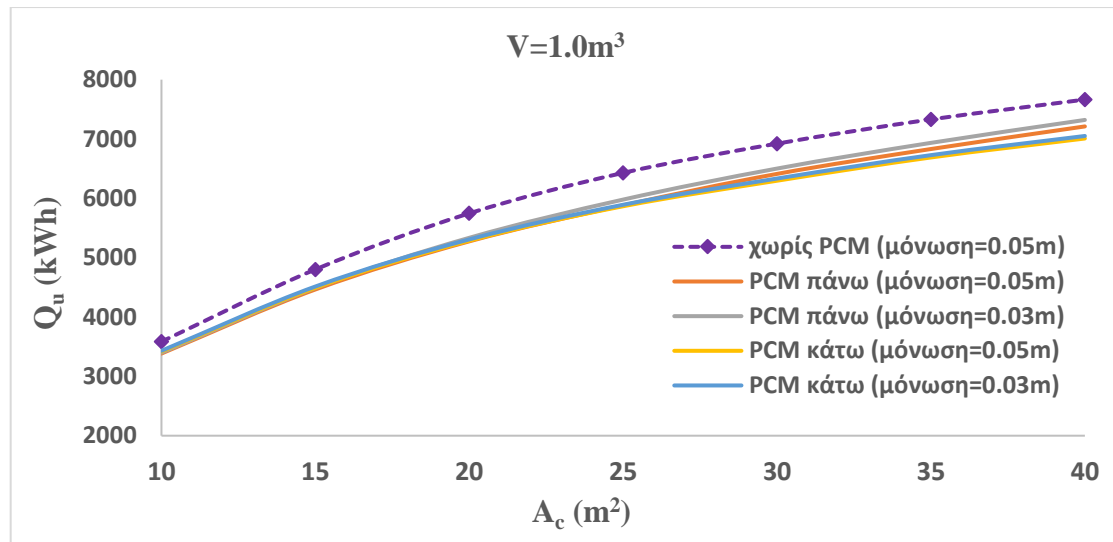
Τα διαγράμματα 7.3.5α έως 7.3.5δ δείχνουν την καταναλισκόμενη ενέργεια από τη βοηθητική πηγή (Q_{aux}) για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας και για διαφορετικούς όγκους του δοχείου αποθήκευσης. Μεγαλύτερο εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας λόγω της μεγαλύτερης παραγωγής χρήσιμης θερμότητας από το ηλιακό πεδίο. Είναι προφανές ότι ο μεγαλύτερος όγκος του δοχείου αποθήκευσης οδηγεί στη μεγαλύτερη ζήτηση βοηθητικής ενέργειας. Έτσι, φαίνεται ότι ο βέλτιστος σχεδιασμός είναι για τον ελάχιστο όγκο του δοχείου αποθήκευσης που είναι το 1.0 m³. Για αυτήν την περίπτωση του

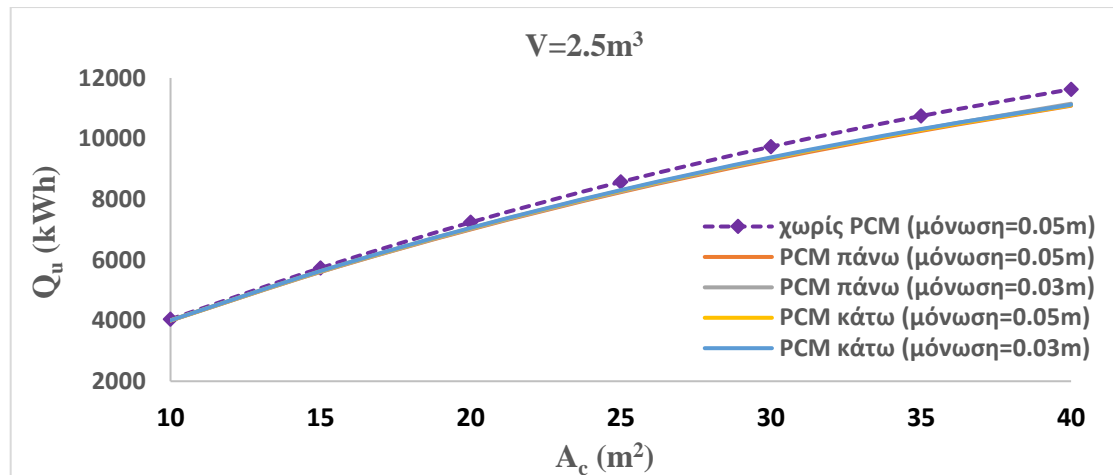
δοχείου αποθήκευσης, υπάρχει μείωση των βοηθητικών φορτίων με τη χρήση PCM σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς PCM. Η μείωση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 16% και 45% για το υπό εξέταση σενάριο. Μόνο η περίπτωση με τη χρήση του PCM και με μόνωση 3 cm παρουσιάζει τη μεγαλύτερη καταναλισκόμενη ενέργεια από τη βοηθητική πηγή για συλλεκτικές επιφάνειες με το μεγαλύτερο εμβαδόν. Η μεγαλύτερη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας από τη βοηθητική πηγή είναι 65% και παρατηρείται όταν το στρώμα PCM βρίσκεται κάτω από τη σωλήνωση με μόνωση 5 cm.

Γενικά, πρέπει να πούμε ότι η χρήση διαφορετικού πάχους μόνωσης δεν είναι τόσο σημαντική όσο οι διαφορετικές περιπτώσεις για PCM πάνω και κάτω από τις σωληνώσεις του ενδοδαπέδιου συστήματος. Γενικά, η χρήση PCM κάτω από τη σωλήνωση προτιμάται λόγω της χαμηλότερης ανάγκης για βοηθητική ενέργεια.

Τα διαγράμματα 7.3.6α έως 7.3.6δ δείχνουν την ενεργειακή απόδοση του συστήματος (η_{en}) και τα διαγράμματα 7.3.7α έως 7.3.7δ απεικονίζουν την ηλιακή κάλυψη (f) για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας και για διαφορετικούς όγκους του δοχείου αποθήκευσης. Η χρήση του PCM οδηγεί σε μείωση της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος λόγω της μικρότερης ζητούμενης ωφέλιμης ισχύος από τους συλλέκτες. Ωστόσο, η ηλιακή κάλυψη αυξάνεται λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών αναγκών του κτηρίου. Η χαμηλότερη θερμική απόδοση του ηλιακού συστήματος βασίζεται στη λειτουργία του συστήματος σε θερμοκρασιακά επίπεδα κοντά στο σημείο τήξης για κάποια περίοδο που το σύστημα χωρίς PCM λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και παρουσιάζει υψηλότερη θερμική απόδοση. Ωστόσο, διαπιστώνεται ότι αυτό το γεγονός δεν παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα, επειδή το PCM μειώνει την ανάγκη για βοηθητική ενέργεια και αυξάνει την ηλιακή κάλυψη.

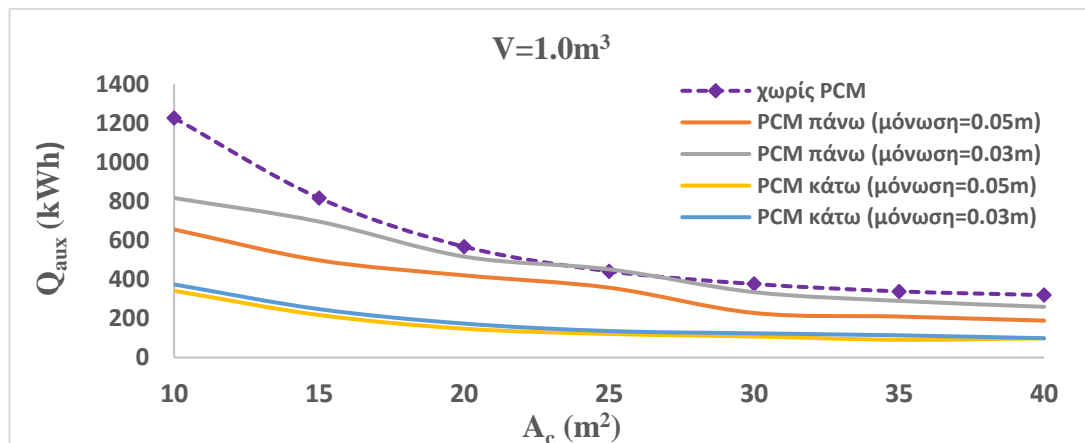
Η καλύτερη περίπτωση φαίνεται να είναι με το PCM κάτω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης και σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει αύξηση στην ηλιακή κάλυψη έως και 4% σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς PCM.



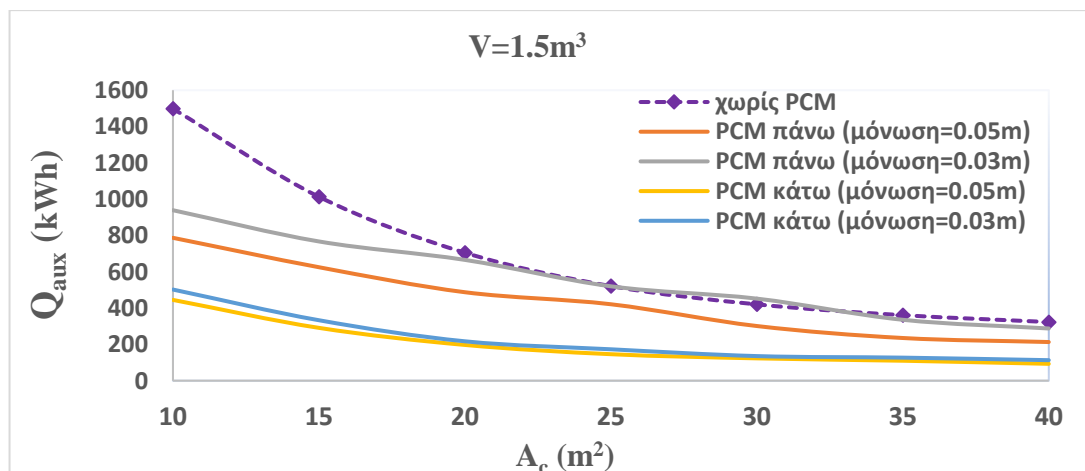


(δ)

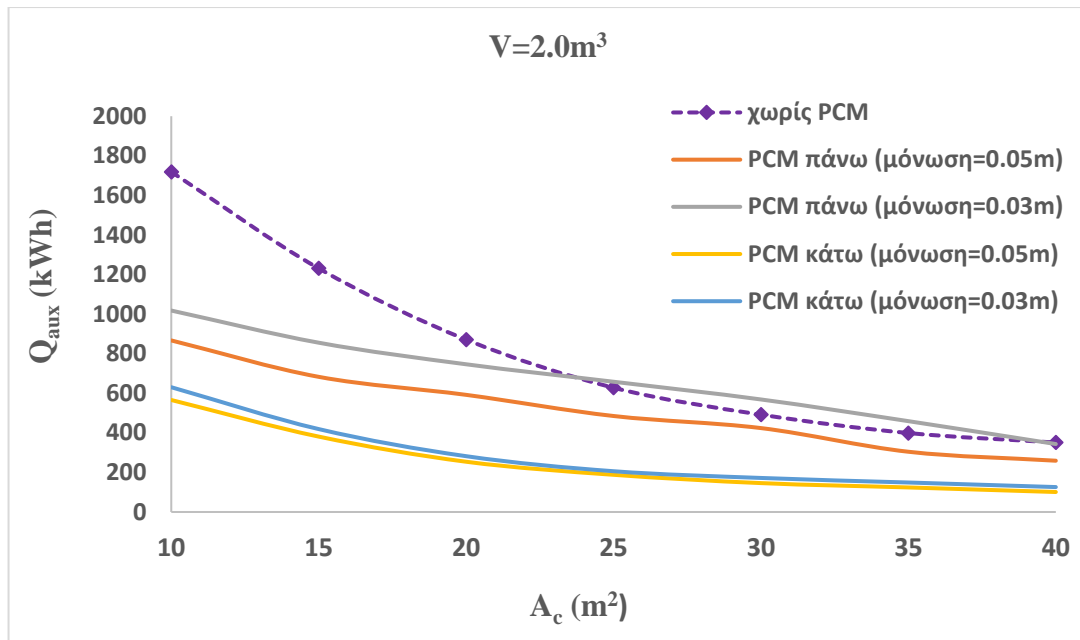
Διάγραμμα 7.3.4: Η ωφέλιμη ισχύς του συλλέκτη για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας: α) δοχείο αποθήκευσης όγκου 1.0 m³, β) δοχείο αποθήκευσης όγκου 1.5 m³, γ) δοχείο αποθήκευσης όγκου 2.0 m³, δ) δοχείο αποθήκευσης όγκου 2.5 m³.



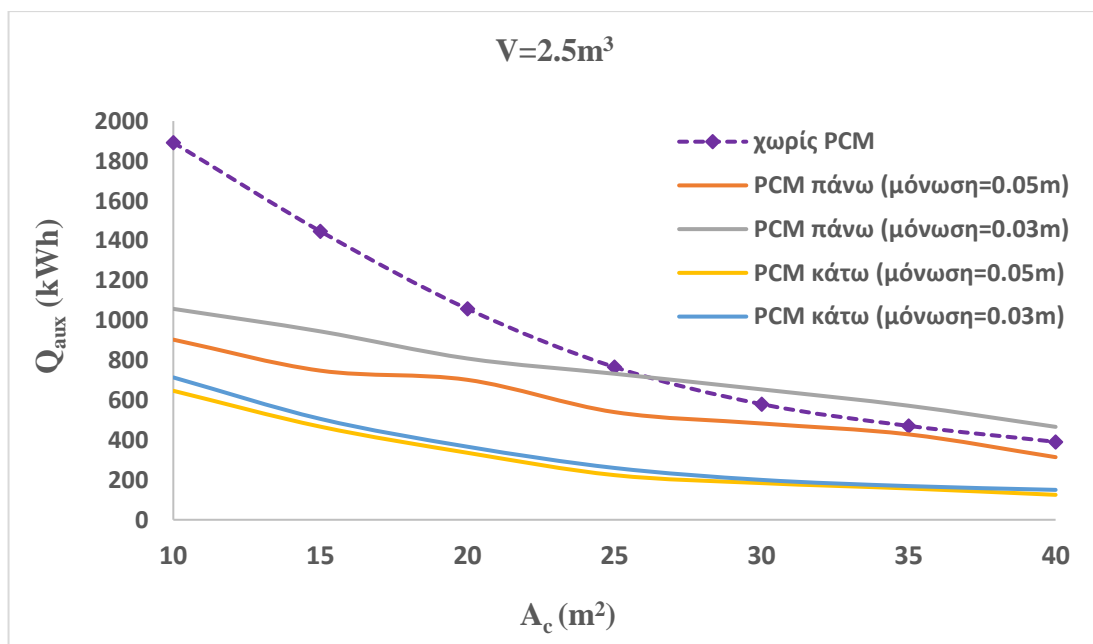
(α)



(β)

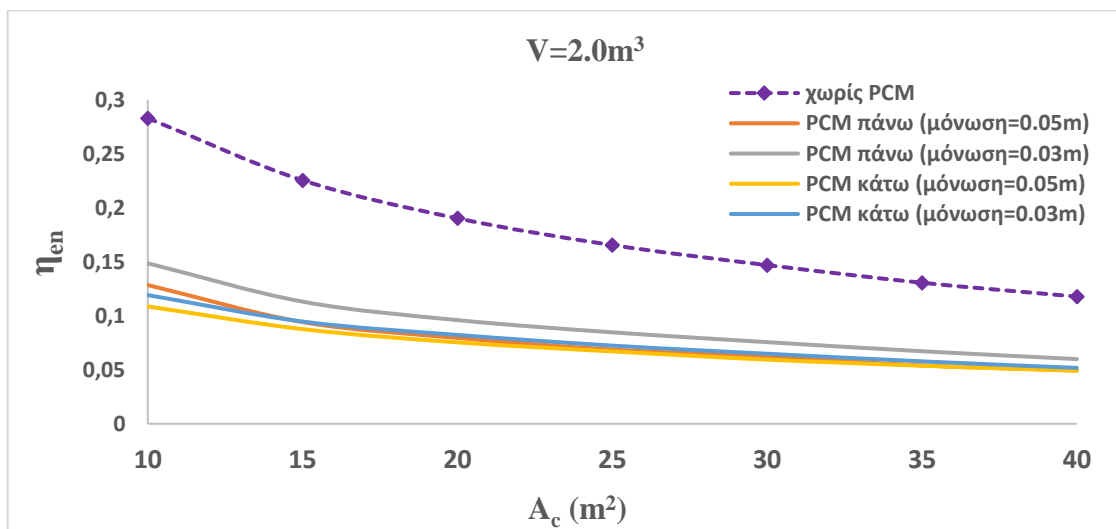
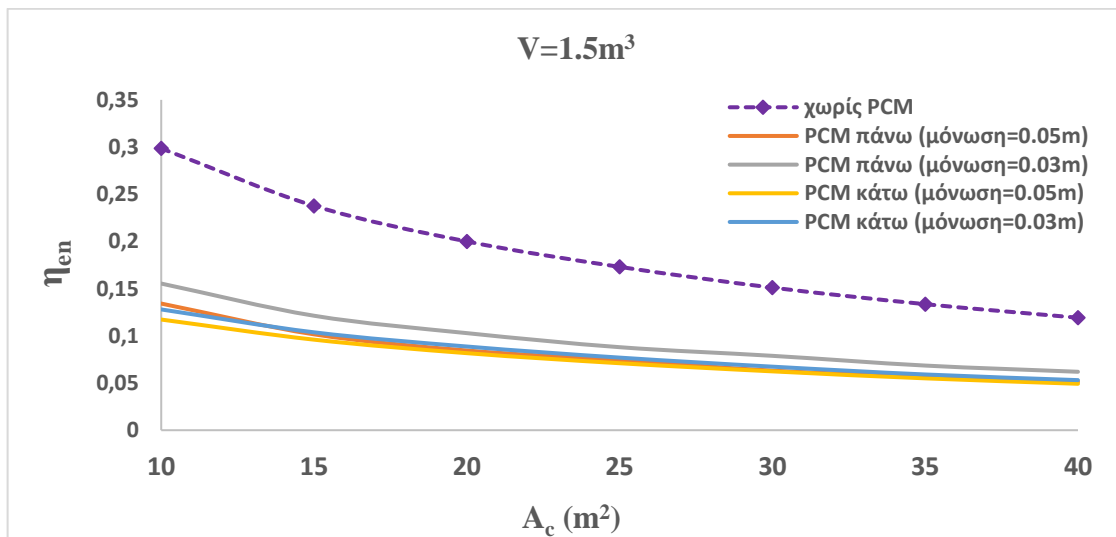
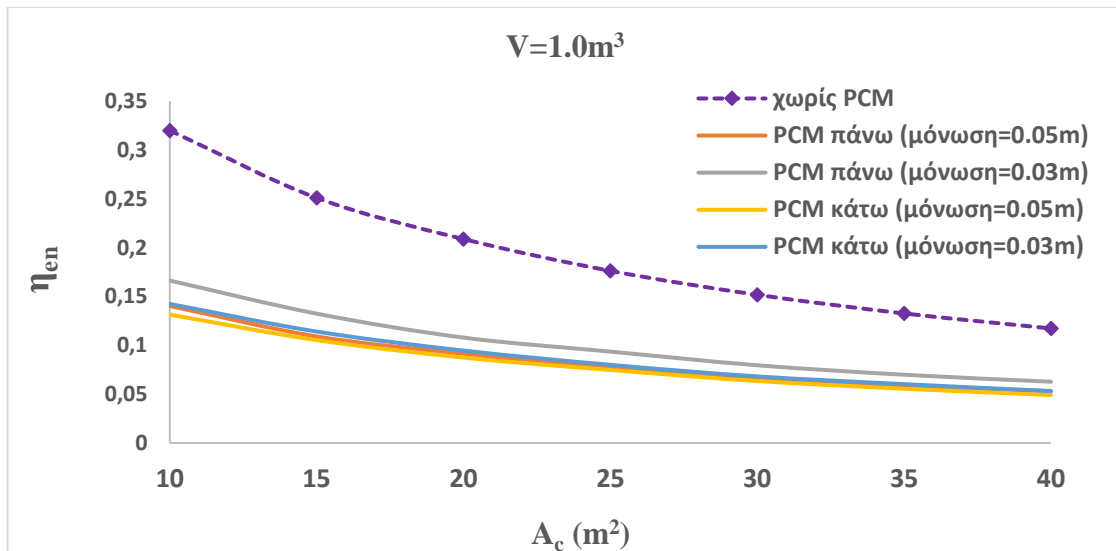


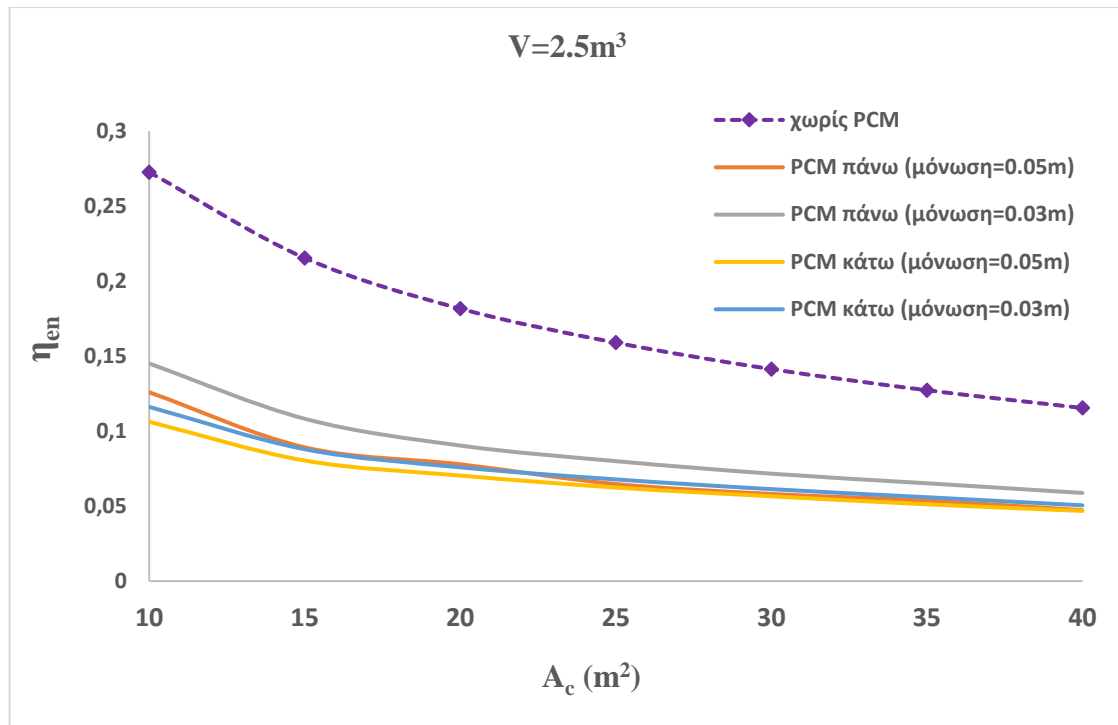
(γ)



(δ)

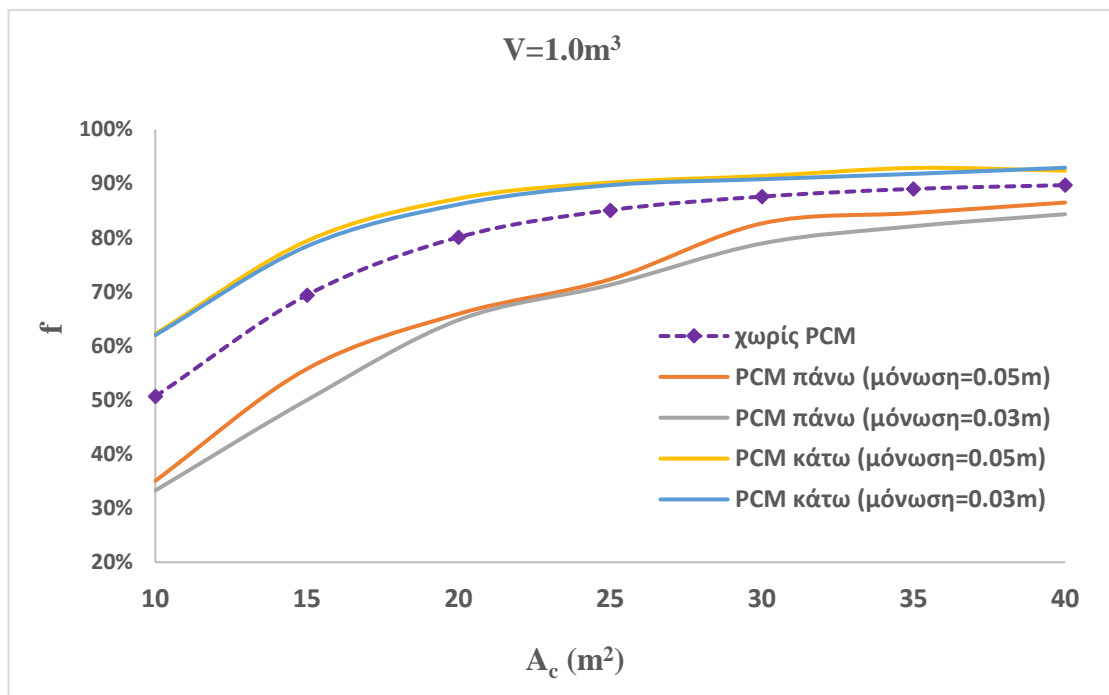
Διάγραμμα 7.3.5: Η καταναλισκόμενη ενέργεια από τη βοηθητική πηγή για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας: α) δοχείο αποθήκευσης όγκου 1.0 m³, β) δοχείο αποθήκευσης όγκου 1.5 m³, γ) δοχείο αποθήκευσης όγκου 2.0 m³, δ) δοχείο αποθήκευσης όγκου 2.5 m³.



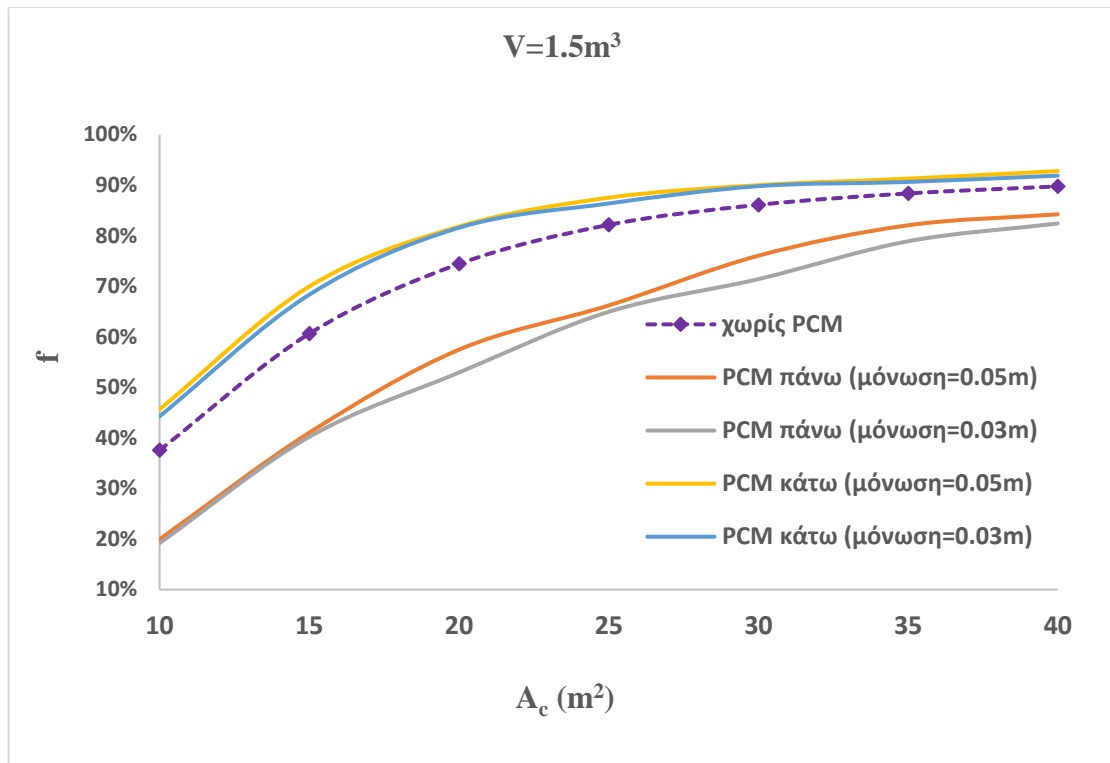


(δ)

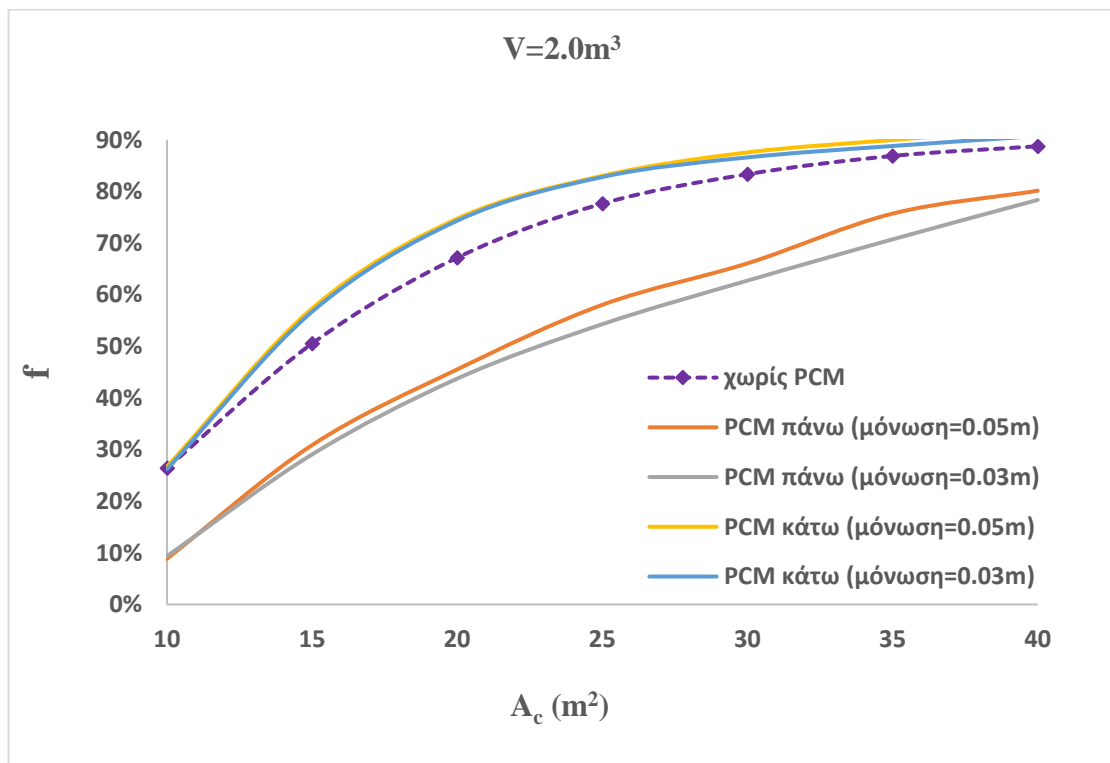
Διάγραμμα 7.3.6: Η ενεργειακή απόδοση του συστήματος για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας: α) δοχείο αποθήκευσης όγκου 1.0 m³, β) δοχείο αποθήκευσης όγκου 1.5 m³, γ) δοχείο αποθήκευσης όγκου 2.0 m³, δ) δοχείο αποθήκευσης όγκου 2.5 m³.



(α)

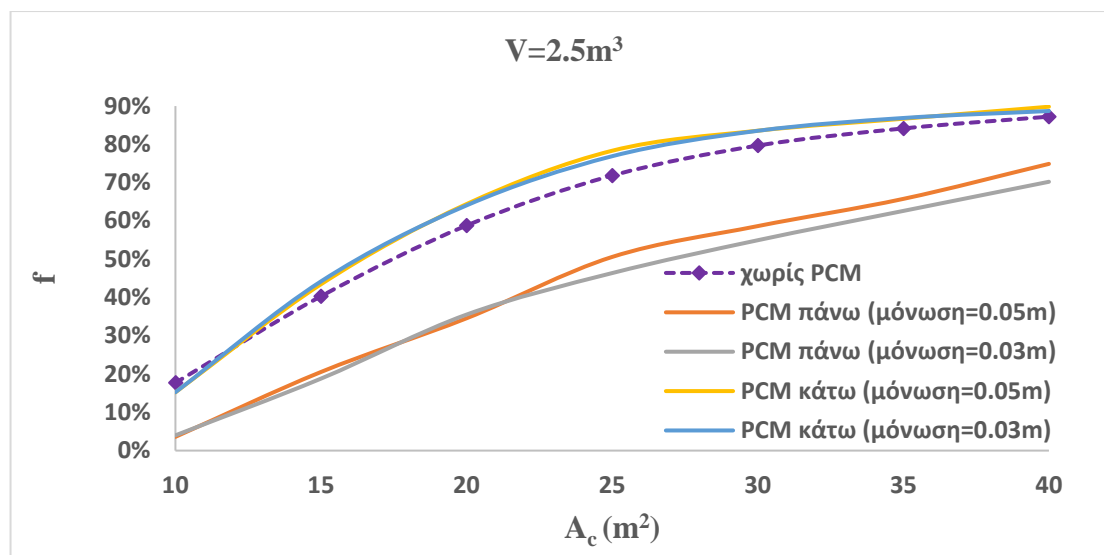


(β)



(γ)

Διάγραμμα 7.3.7: Η ηλιακή κάλυψη για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας: α) δοχείο αποθήκευσης όγκου 1.0 m³, β) δοχείο αποθήκευσης όγκου 1.5 m³, γ) δοχείο αποθήκευσης όγκου 2.0 m³.

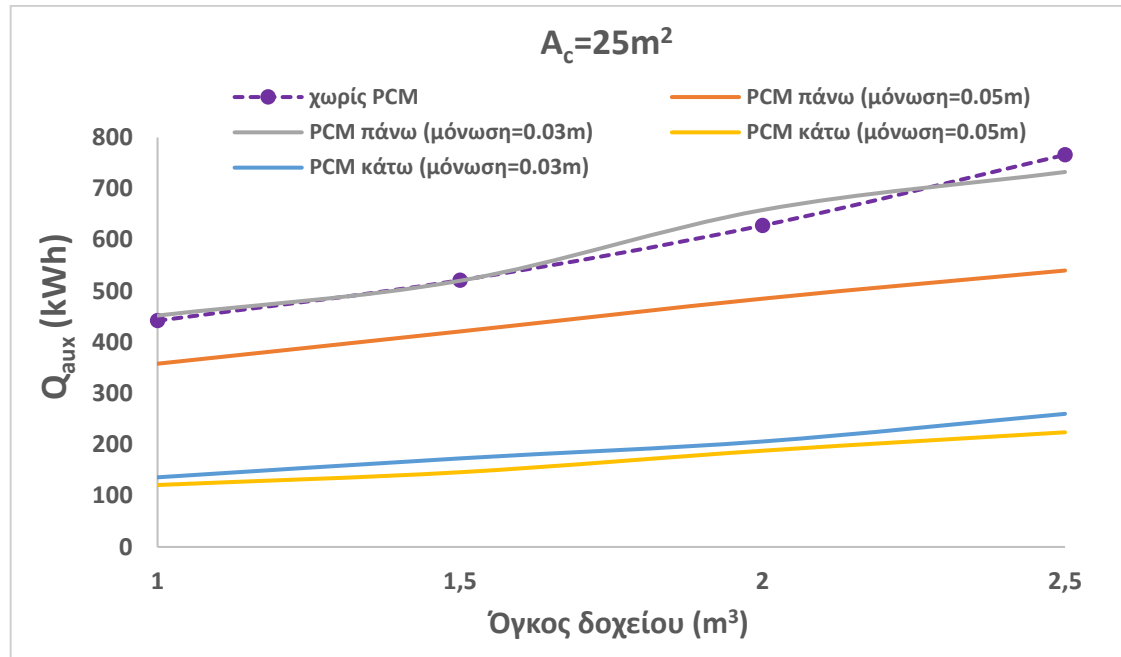


(δ)

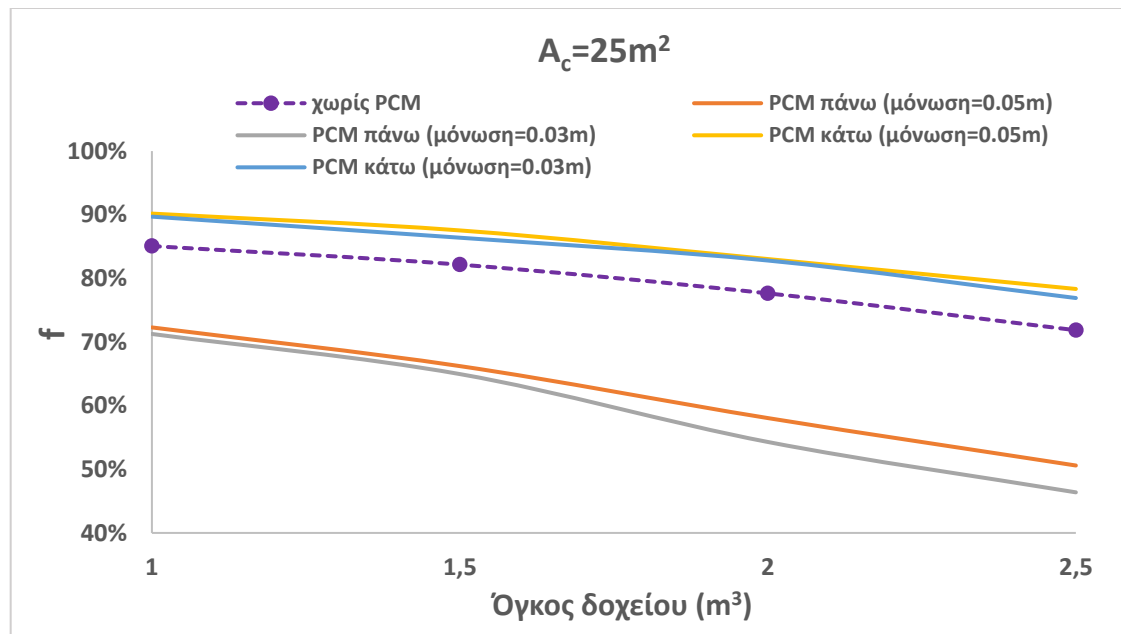
Διάγραμμα 7.3.7: Η ηλιακή κάλυψη για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας: δ) δοχείο αποθήκευσης όγκου 2.5m^3 .

Έτσι, τα αποτελέσματα αυτής της ενότητας υποδεικνύουν ότι η χρήση του PCM μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας θέρμανσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μια συλλεκτική επιφάνεια με μεγαλύτερο εμβαδόν οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από τη βοηθητική πηγή, αλλά μετά από τα 25m^2 , η μείωση της ενέργειας είναι σχετικά χαμηλή. Επιπλέον, όταν χρησιμοποιούμε μεγαλύτερη επιφάνεια συλλέκτη από τα 25m^2 , το στρώμα PCM βρίσκεται πάνω από το σύστημα θέρμανσης και η μόνωση είναι 0.03m , υπάρχει μια μικρή αύξηση της τάξεως του 1.8% των βοηθητικών φορτίων. Έτσι, ενεργειακά το καλύτερο εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας φαίνεται να είναι περίπου 25m^2 . Το διάγραμμα 7.3.8 απεικονίζει την καταναλισκόμενη ενέργεια από τη βοηθητική πηγή για εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας $A_c = 25\text{m}^2$ και για τους διάφορους όγκους δοχείου αποθήκευσης. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη βοηθητική ενέργεια. Επομένως, ο καταλληλότερος όγκος δοχείου αποθήκευσης είναι 1m^3 . Το διάγραμμα 7.3.9 απεικονίζει την ηλιακή κάλυψη για εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας $A_c = 25\text{m}^2$ και για διαφορετικούς όγκους του δοχείου αποθήκευσης. Η αύξηση του όγκου του δοχείου αποθήκευσης μειώνει την ηλιακή κάλυψη. Έτσι, ο βέλτιστος όγκος δοχείου αποθήκευσης είναι 1m^3 . Τα κύρια ενεργειακά αποτελέσματα αυτής της μελέτης για

διάφορες περιπτώσεις με εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας 25 m^2 συνοψίζονται στον πίνακα 7.3.5.



Διάγραμμα 7.3.8: Η καταναλισκόμενη ενέργεια από τη βοηθητική πηγή για εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας $A_c = 25 \text{ m}^2$ και για τους διαφορετικούς όγκους δοχείου αποθήκευσης.



Διάγραμμα 7.3.9: Η ηλιακή κάλυψη για εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας $A_c = 25 \text{ m}^2$ και για τους διαφορετικούς όγκους δοχείου αποθήκευσης.

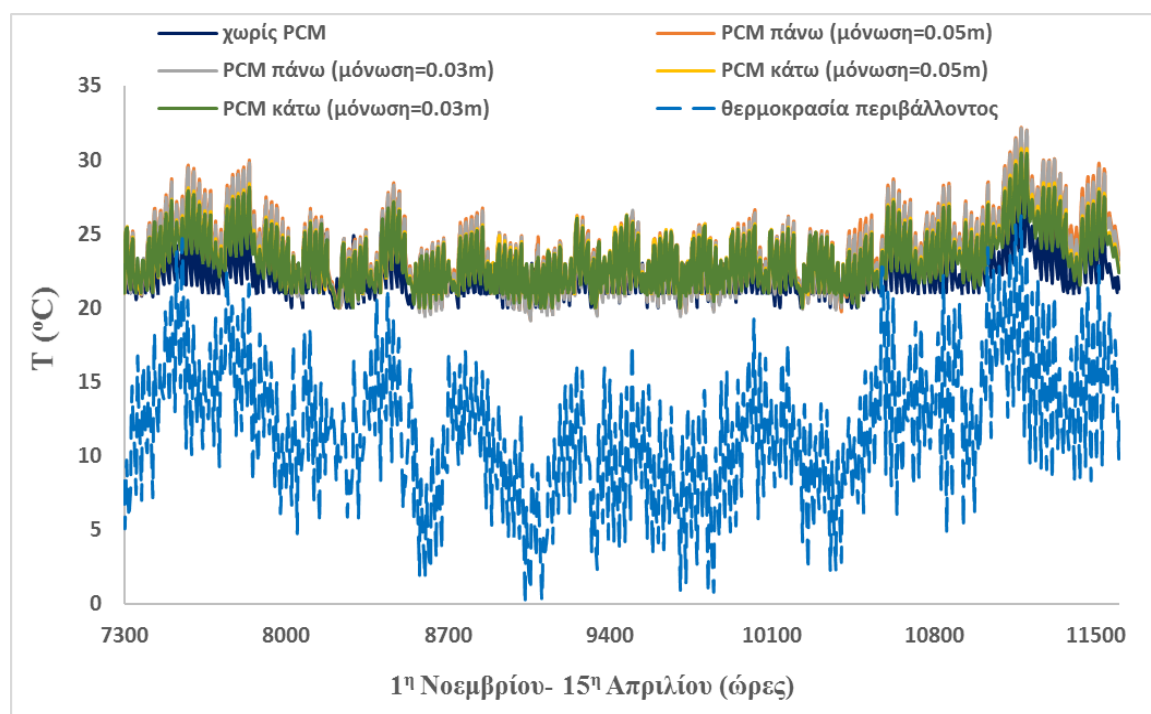
Πίνακας 7.3.5: Σύνοψη των βασικών αποτελεσμάτων για τις περιπτώσεις με συλλεκτική επιφάνεια 25 m².

Όγκος δοχείου (m ³)	Περιπτώσεις	Βοηθητικά φορτία Q _{aux} (kWh)	Ηλιακή κάλυψη f
1.0	χωρίς PCM	442	85%
	PCM πάνω (μόνωση=0.05m)	358	72%
	PCM πάνω (μόνωση=0.03m)	452	71%
	PCM κάτω (μόνωση=0.05m)	121	90%
	PCM κάτω (μόνωση=0.03m)	136	89%
1.5	χωρίς PCM	521	82%
	PCM πάνω (μόνωση=0.05m)	421	66%
	PCM πάνω (μόνωση=0.03m)	520	65%
	PCM κάτω (μόνωση=0.05m)	146	88%
	PCM κάτω (μόνωση=0.03m)	173	86%
2.0	χωρίς PCM	628	78%
	PCM πάνω (μόνωση=0.05m)	485	58%
	PCM πάνω (μόνωση=0.03m)	658	54%
	PCM κάτω (μόνωση=0.05m)	188	83%
	PCM κάτω (μόνωση=0.03m)	206	83%
2.5	χωρίς PCM	766	72%
	PCM πάνω (μόνωση=0.05m)	540	51%
	PCM πάνω (μόνωση=0.03m)	733	46%
	PCM κάτω (μόνωση=0.05m)	224	78%
	PCM κάτω (μόνωση=0.03m)	260	77%

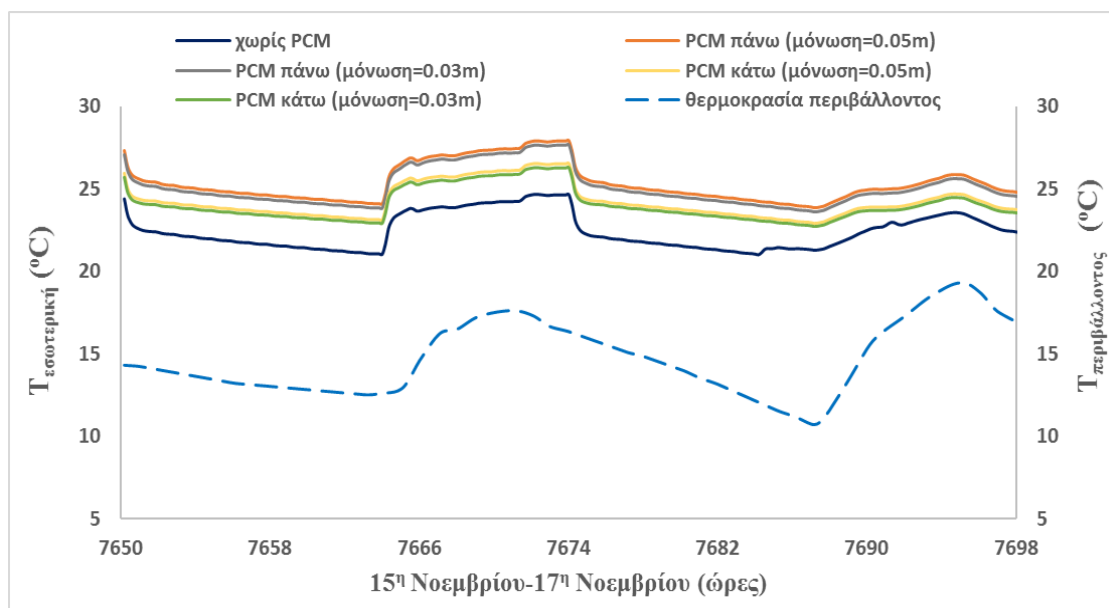
B) Διακύμανση εσωτερικών θερμοκρασιών

Το χειμώνα, η θερμοκρασία μέσα στο κτήριο (γραφείο) πρέπει να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κοντά στα όρια της θερμικής άνεσης. Το διάγραμμα 7.3.10 δείχνει τη διακύμανση της θερμοκρασίας για διάφορες περιπτώσεις από την 1^η Νοεμβρίου έως τις 15 Απριλίου. Είναι προφανές ότι η καλύτερη διακύμανση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με τη χρήση στρώματος PCM κάτω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης και με πάχος μόνωσης 0.03 m (η πράσινη γραμμή). Στην περίπτωση αυτή, η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 21°C κατά το μεγαλύτερο μέρος της χειμερινής περιόδου και όχι μεγαλύτερη από 26°C, όπως στην περίπτωση της οποίας το PCM βρίσκεται πάνω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με το πάχος μόνωσης 0.05 m και 0.03 m είναι ανεπαίσθητη.

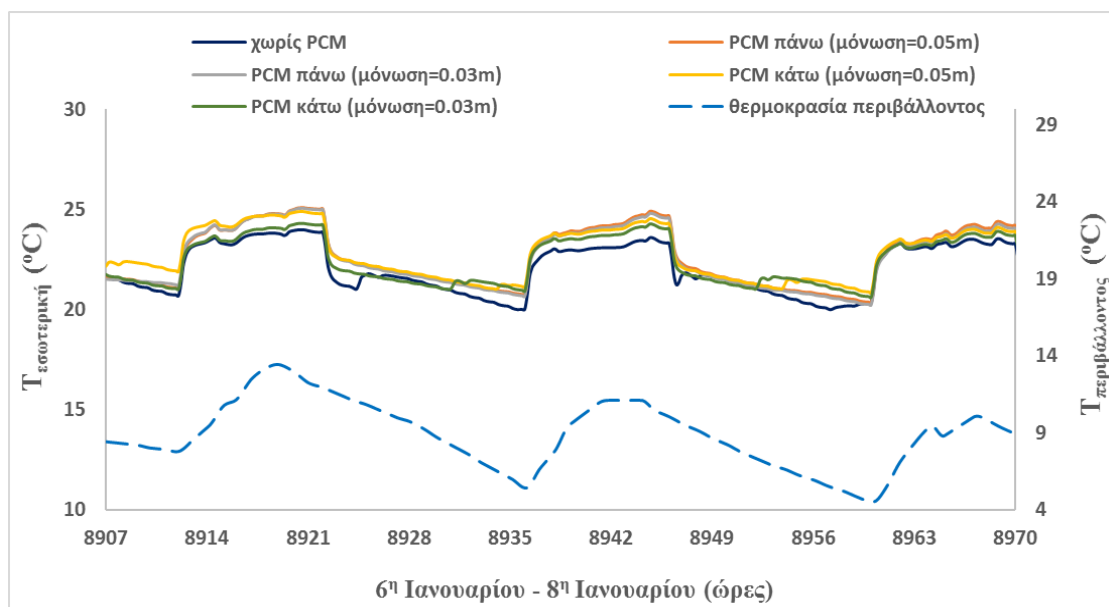
Τα αποτελέσματα είναι πιο ορατά στο διάγραμμα 7.3.11 το οποίο απεικονίζει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας για το εξεταζόμενο σύστημα με και χωρίς τη χρήση στρώματος PCM σε σύγκριση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ειδικότερα, το διάγραμμα 7.3.11α απεικονίζει αποτελέσματα για την περίοδο από 15 Νοεμβρίου έως 17 Νοεμβρίου και το διάγραμμα 7.3.11β από 6 Ιανουαρίου έως 8 Ιανουαρίου. Τα αποτελέσματα στο διάγραμμα 7.3.11α αφορούν μια σχετικά θερμή περίοδο, ενώ τα αποτελέσματα στο διάγραμμα 7.3.11β αφορούν μια ψυχρή περίοδο. Είναι προφανές ότι οι περιπτώσεις με PCM οδηγούν σε υψηλότερα επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς PCM. Στη θερμή περίοδο του διαγράμματος 7.3.11α, η περίπτωση χωρίς PCM οδηγεί σε ανεκτά επίπεδα θερμοκρασίας εντός του κτηρίου, αλλά στη ψυχρή περίοδο του διαγράμματος 7.3.11β, η περίπτωση χωρίς PCM οδηγεί σε επίπεδα θερμοκρασίας κάτω από το επιθυμητό σημείο ρύθμισης των 22°C για πολλές ώρες. Ένα άλλο σημαντικό θέμα αφορά την παρουσίαση της υπερθέρμανσης με τις περιπτώσεις PCM στη ζεστή περίοδο (διάγραμμα 7.3.11α). Αυτή η υπερθέρμανση δημιουργείται κυρίως κατά τις ώρες όπου υπάρχουν υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας που αυξάνουν την εσωτερική θερμοκρασία.



Διάγραμμα 7.3.10: Διακύμανση θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις κατά τη χειμερινή περίοδο στην Αθήνα.



(α)



(β)

Διάγραμμα 7.3.11: Διακύμανση θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις κατά την περίοδο α) 15 - 17 Νοεμβρίου, β) 6- 8 Ιανουαρίου.

Ο Πίνακας 7.3.6 παρουσιάζει τις μέσες θερμοκρασίες για όλες τις περιπτώσεις κατά τη διάρκεια της 15^{ης} έως 17^{ης} Νοεμβρίου και της 6^{ης} έως 8^{ης} Ιανουαρίου στην Αθήνα. Είναι προφανές ότι η χρήση του στρώματος PCM πάνω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, κατά τη σχετικά ζεστή περίοδο (15-17 Νοεμβρίου), μπορεί να δώσει υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία περίπου 3°C σε σύγκριση με το σύστημα χωρίς

PCM και η χρήση του στρώματος PCM κάτω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης μπορεί να δώσει περίπου 2°C υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία. Στη ψυχρή περίοδο, η χρήση του PCM οδηγεί σε υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς PCM σε όλες τις περιπτώσεις και η αύξηση της θερμοκρασίας είναι περίπου 0.6~0.8°C. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση PCM κάτω από τη σωλήνωση οδηγεί και σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από τη βοηθητική πηγή και έτσι μπορεί να ειπωθεί ότι και οι δύο περιπτώσεις (PCM πάνω ή PCM κάτω από τις σωληνώσεις) παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα. Σε κάθε περίπτωση, η χρήση του PCM είναι ευεργετική για το σύστημα.

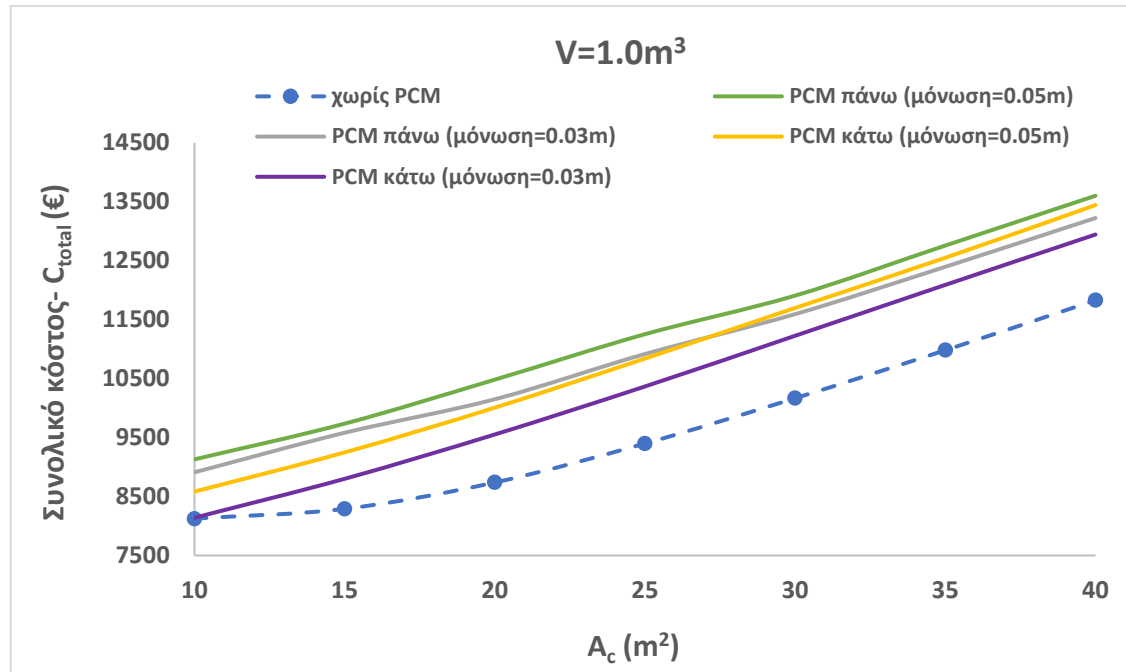
Πίνακας 7.3.6: Μέσος όρος θερμοκρασιών των εξεταζόμενων περιόδων του διαγράμματος 7.3.11.

Περιπτώσεις	$T_{average}$ (°C)	
	15 - 17 Νοεμβρίου	6 - 8 Ιανουαρίου
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	14.71	8.90
χωρίς PCM	22.42	22.01
PCM πάνω (μόνωση=0.05m)	25.32	22.67
PCM πάνω (μόνωση=0.03m)	25.05	22.61
PCM κάτω (μόνωση=0.05m)	24.21	22.80
PCM κάτω (μόνωση=0.03m)	24.00	22.45

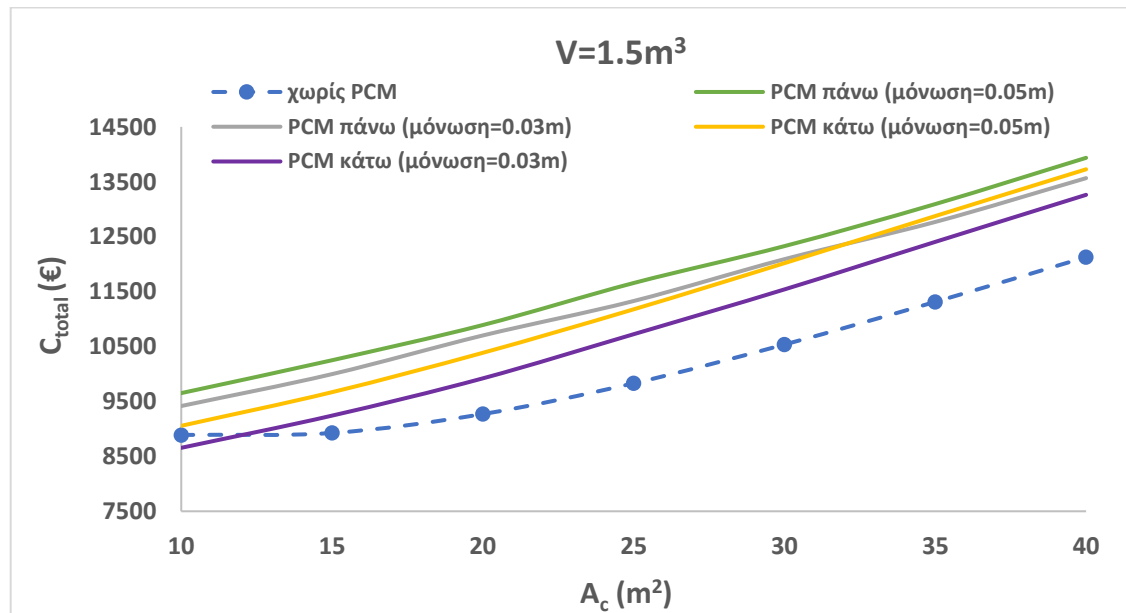
Γ) Οικονομική αξιολόγηση του συστήματος

Η οικονομική αξιολόγηση του συστήματος για διάφορες περιπτώσεις αναλύεται παρακάτω. Τα διαγράμματα 7.3.12 έως 7.3.15 δείχνουν τη σύγκριση του συνολικού κόστους (C_{total}) του συστήματος για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας και για διαφορετικούς όγκους του δοχείου αποθήκευσης. Είναι προφανές ότι υπάρχει αύξηση του συνολικού κόστους με τη χρήση του στρώματος PCM. Η μεγαλύτερη αύξηση του συνολικού κόστους, περίπου 18%, επιτυγχάνεται όταν το στρώμα PCM βρίσκεται πάνω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Η καλύτερη περίπτωση με PCM είναι όταν το στρώμα PCM βρίσκεται κάτω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με πάχος μόνωσης 0.03 m. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται η μικρότερη αύξηση του συνολικού κόστους (περίπου 9% σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς PCM) και για τους όγκους του δοχείου αποθήκευσης $V = 2.0\sim 2.5 \text{ m}^3$ και για εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας $A_c = 10\sim 15 \text{ m}^2$ υπάρχει μείωση του συνολικού κόστους περίπου 6%. Ο Πίνακας 7.3.7 συνοψίζει τα οικονομικά αποτελέσματα του συστήματος για όλες

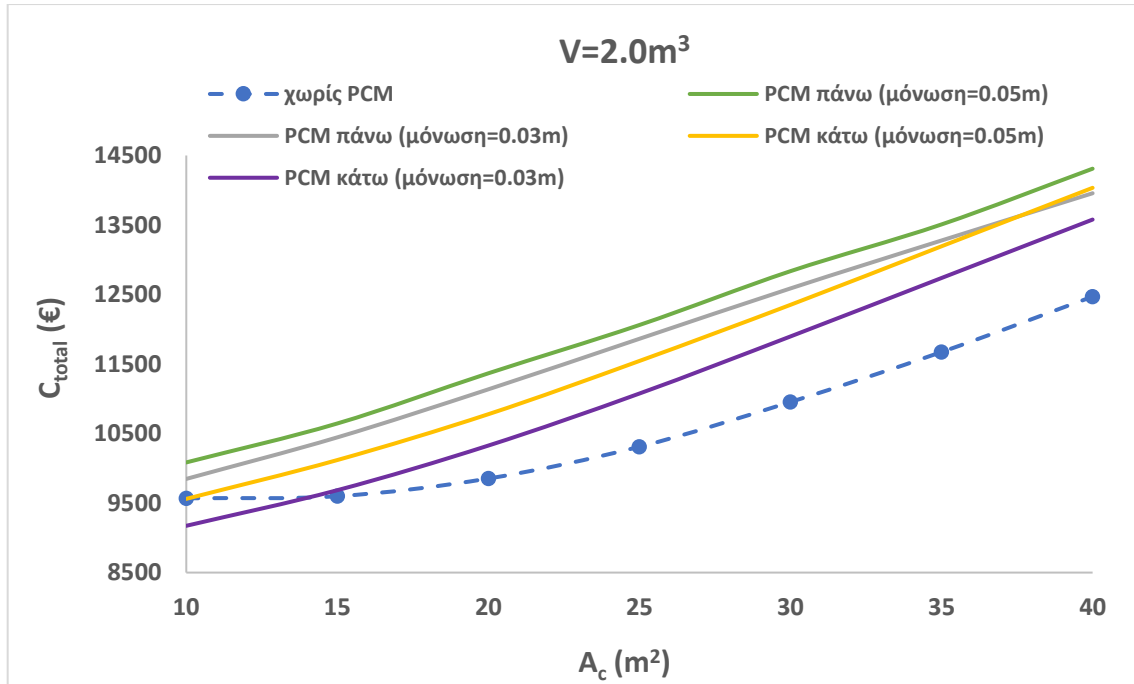
τις περιπτώσεις. Έτσι λοιπόν η χρήση PCM οδηγεί σε μεγαλύτερο συνολικό κόστος του συστήματος αλλά μειώνει τα βοηθητικά φορτία θέρμανσης.



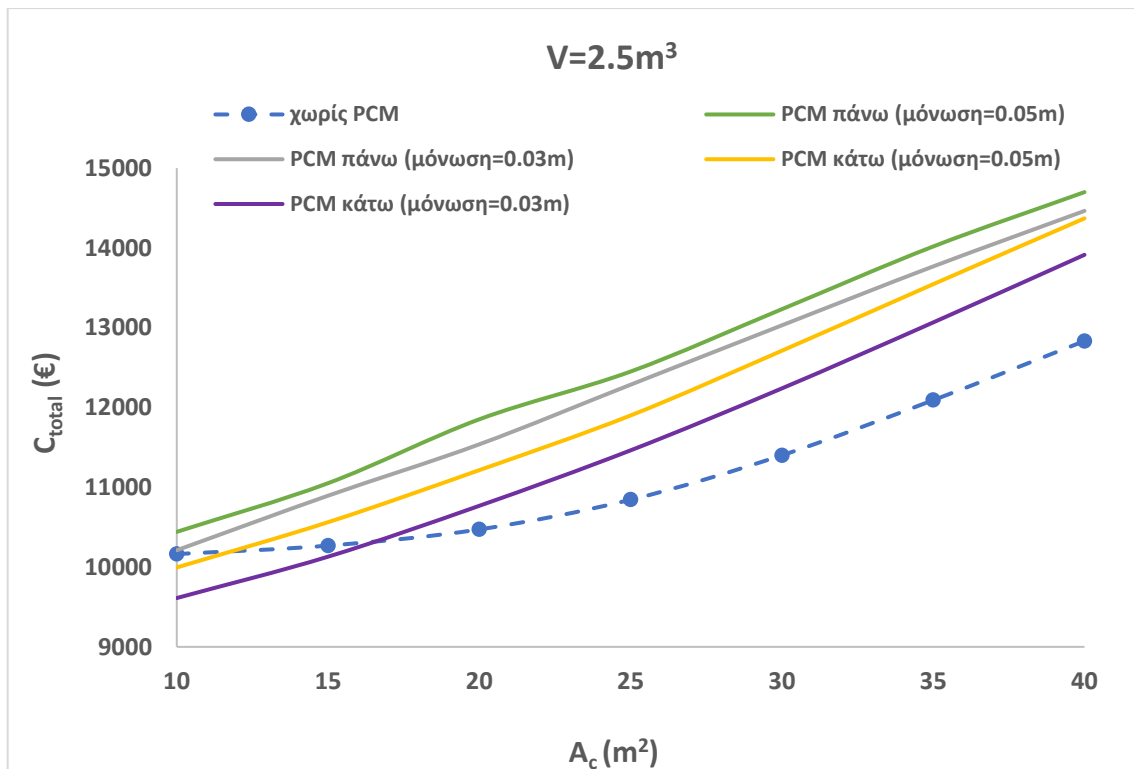
Διάγραμμα 7.3.12: Σύγκριση συνολικού κόστους (C_{total}) του συστήματος για όγκο δοχείου αποθήκευσης $V=1.0 \text{ m}^3$.



Διάγραμμα 7.3.13: Σύγκριση συνολικού κόστους (C_{total}) του συστήματος για όγκο δοχείου αποθήκευσης $V=1.5 \text{ m}^3$.



Διάγραμμα 7.3.14: Σύγκριση συνολικού κόστους (C_{total}) του συστήματος για όγκο δοχείου αποθήκευσης $V=2.0 \text{ m}^3$.



Διάγραμμα 7.3.15: Σύγκριση συνολικού κόστους (C_{total}) του συστήματος για όγκο δοχείου αποθήκευσης $V=2.5 \text{ m}^3$.

Πίνακας 7.3.7: Σύνοψη των οικονομικών αποτελεσμάτων.

Όγκος δοχείου (m ³)	A _c (m ²)	Q _{aux} (kWh)	C _{total} χωρίς PCM (€)	C _{total} με PCM πάνω (μόν=0.05m) (€)	C _{total} με PCM πάνω (μόν=0.03m) (€)	C _{total} με PCM κάτω (μόν=0.05m) (€)	C _{total} με PCM κάτω (μόν=0.03m) (€)
1.0	10	1227	8125	9130	8910	8583	8141
	15	817	8291	9735	9581	9248	8801
	20	568	8738	10482	10149	10007	9552
	25	442	9400	11253	10916	10840	10367
	30	377	10167	11908	11593	11698	11226
	35	339	10981	12756	12396	12549	12089
	40	320	11829	13601	13224	13443	12944
1.5	10	1498	8890	9652	9416	9056	8656
	15	1013	8926	10250	9997	9668	9242
	20	705	9270	10891	10701	10385	9921
	25	521	9831	11656	11329	11177	10724
	30	421	10536	12328	12091	12018	11539
	35	361	11313	13094	12768	12876	12405
	40	323	12127	13936	13566	13727	13262
2.0	10	1719	9568	10085	9847	9561	9173
	15	1231	9599	10645	10445	10119	9685
	20	871	9853	11367	11136	10778	10327
	25	628	10310	12061	11863	11544	11075
	30	492	10954	12835	12587	12351	11897
	35	399	11672	13508	13277	13194	12737
	40	351	12469	14309	13956	14035	13578
2.5	10	1892	10163	10442	10211	9995	9612
	15	1447	10268	11052	10894	10562	10130
	20	1058	10472	11852	11538	11215	10768
	25	766	10844	12451	12286	11900	11463
	30	580	11401	13232	13029	12711	12239
	35	471	12091	14017	13768	13545	13065
	40	391	12833	14699	14463	14370	13913

Δ) Πολύ-παραγοντική αξιολόγηση του εξεταζόμενου συστήματος

Σε αυτή την παράγραφο διεξάγεται μια πολύ-παραγοντική αξιολόγηση του εξεταζόμενου συστήματος προκειμένου να αξιολογηθεί η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας της βοηθητικής πηγής με τη χρήση του PCM έναντι της αύξησης του συνολικού κόστους του συστήματος με PCM. Τα διαγράμματα 7.3.16 έως 7.3.19 απεικονίζουν την πολλαπλή αντικειμενική αξιολόγηση του συστήματος χωρίς και με

PCM χρησιμοποιώντας τα κριτήρια της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση (Q_{aux}) και του συνολικού κόστους (C_{total}) για διαφορετικό εμβαδόν συλλεκτικής επιφάνειας (10 m^2 , 15 m^2 , 20 m^2 , 25 m^2 , 30 m^2 , 35 m^2 , 40 m^2) και για διαφορετικούς όγκους του δοχείου αποθήκευσης. Για κάθε περίπτωση, δίνονται πολλές πολύ-παραγοντικές απεικονίσεις για να παρουσιαστεί η κατάσταση. Είναι προφανές ότι οι βέλτιστες περιπτώσεις αφορούν τη χρήση του PCM κάτω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Αυτές οι περιπτώσεις οδηγούν ταυτόχρονα σε χαμηλότερο κόστος και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Σε αυτό το σημείο, μπορεί να ειπωθεί ότι ένας εναλλακτικός στόχος θα μπορούσε να είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια της ζωής αντί της ετήσιας βοηθητικής κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο, η βέλτιστη περίπτωση θα ήταν η ίδια και με αυτόν τον εναλλακτικό στόχο.

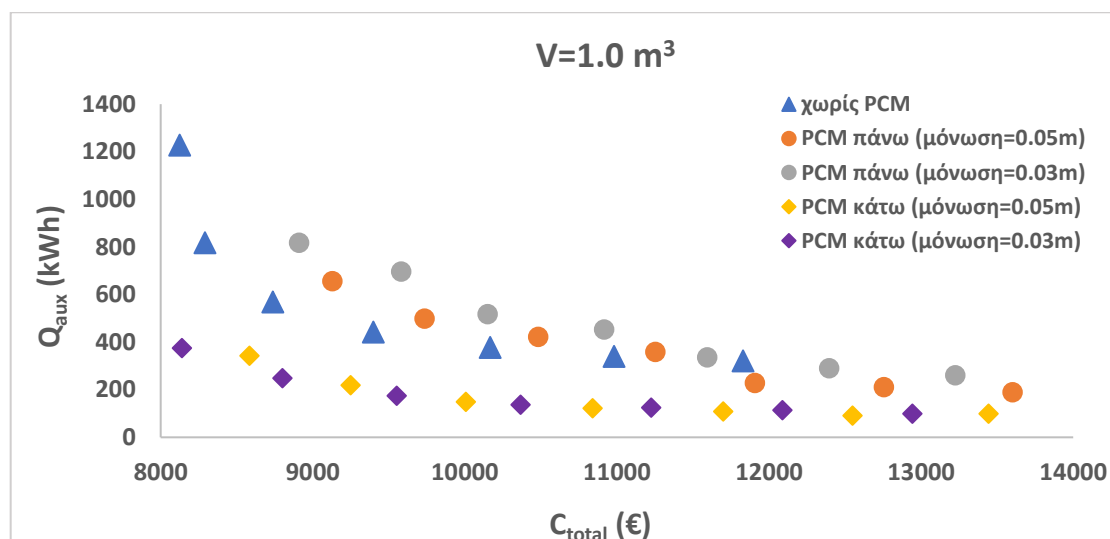
Προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη περίπτωση, το διάγραμμα 7.3.20 απεικονίζει όλα τα εξεταζόμενα σενάρια για όλους τους όγκους του δοχείου αποθήκευσης και για όλες τις συλλεκτικές επιφάνειες. Πρακτικά, το διάγραμμα 7.3.20 περιλαμβάνει όλα τα σημεία των διαγραμμάτων 7.3.16 έως 7.3.19 προκειμένου να παρουσιαστεί μια συνολική αξιολόγηση. Η αδιάστατη συνάρτηση παραγόντων (F) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης περίπτωσης. Ο ορισμός αυτής της παραμέτρου δίνεται στην εξίσωση 7.3.16 της παραγράφου 7.3.4. Χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες τιμές για την ελάχιστη και τη μέγιστη παράμετρο σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, η εξίσωση 7.3.16 μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$F = \sqrt{\left(\frac{Q_{aux}-91}{1892-91}\right)^2 + \left(\frac{C_{total}-8140}{14699-8140}\right)^2} \quad (7.3.17)$$

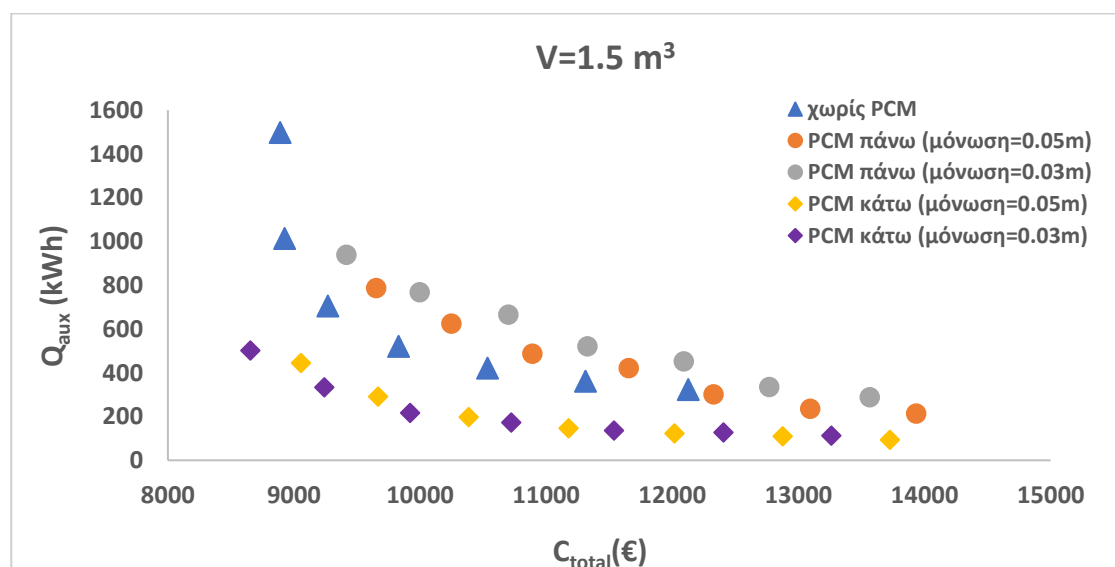
Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι οι χρησιμοποιούμενες τιμές στην εξίσωση 7.3.17 είναι οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές των μεταβλητών βελτιστοποίησης της μορφής Pareto, σύμφωνα με τα εικονιζόμενα αποτελέσματα στο διάγραμμα 7.3.20. Πρακτικά αυτές οι τιμές επιλέγονται μετά τον προσδιορισμό όλων των πιθανών βέλτιστων λύσεων (Μορφή Pareto) στο διάγραμμα 7.3.20.

Στην ιδανική περίπτωση, η συνάρτηση (F) έχει την ελάχιστη τιμή 0.1662 που λαμβάνεται για την περίπτωση με όγκο δοχείου αποθήκευσης 1 m^3 , συλλεκτική επιφάνεια 20 m^2 και στρώμα PCM κάτω από την ενδοδαπέδια σωλήνωση με μόνωση

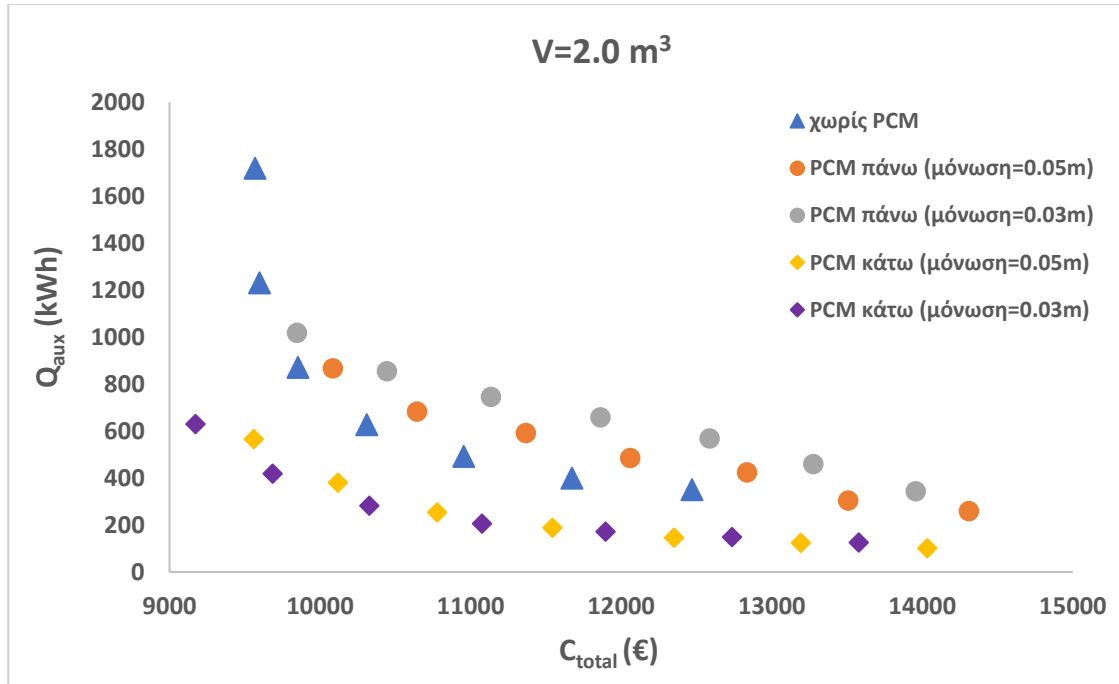
πάχους 0.03 m. Στην περίπτωση αυτή, το συνολικό κόστος είναι 9552€ και η κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας είναι 174 kWh. Έτσι λοιπόν, η πολύ-παραγοντική διαδικασία βελτιστοποίησης δείχνει ότι αυτός ο σχεδιασμός μπορεί να υιοθετηθεί ως βέλτιστος.



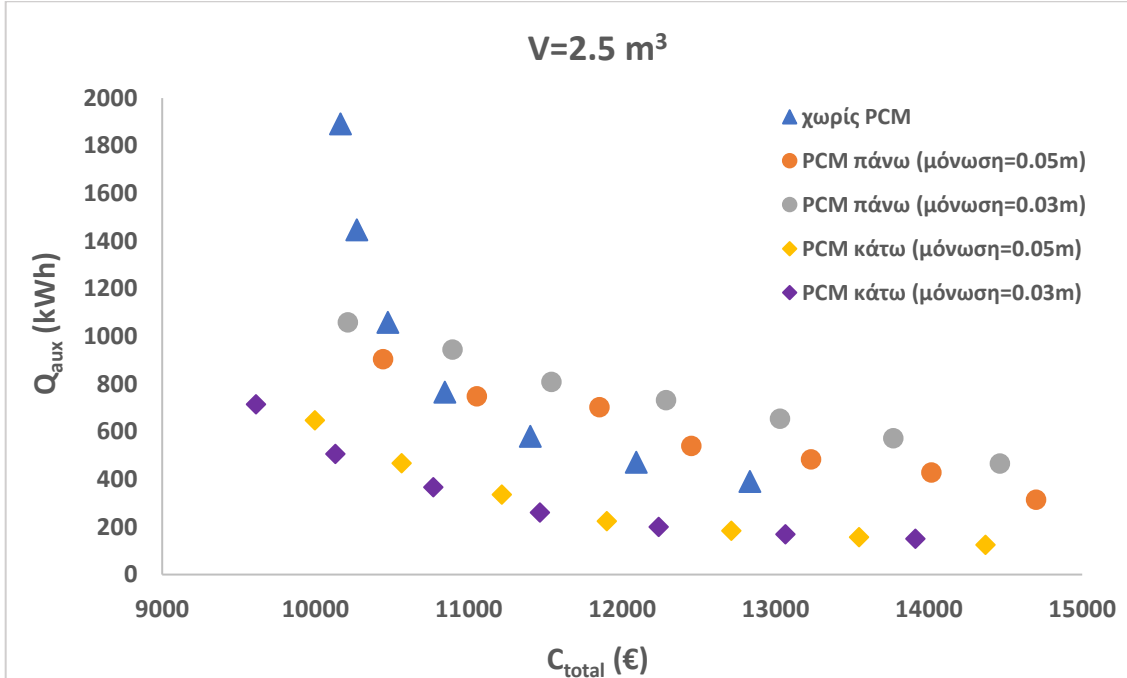
Διάγραμμα 7.3.16: Πολύ-παραγοντική αξιολόγηση του συστήματος χωρίς και με PCM χρησιμοποιώντας τα κριτήρια της καταναλισκόμενης ενέργειας και του συνολικού κόστους για όγκο δοχείου αποθήκευσης $V=1.0 \text{ m}^3$.



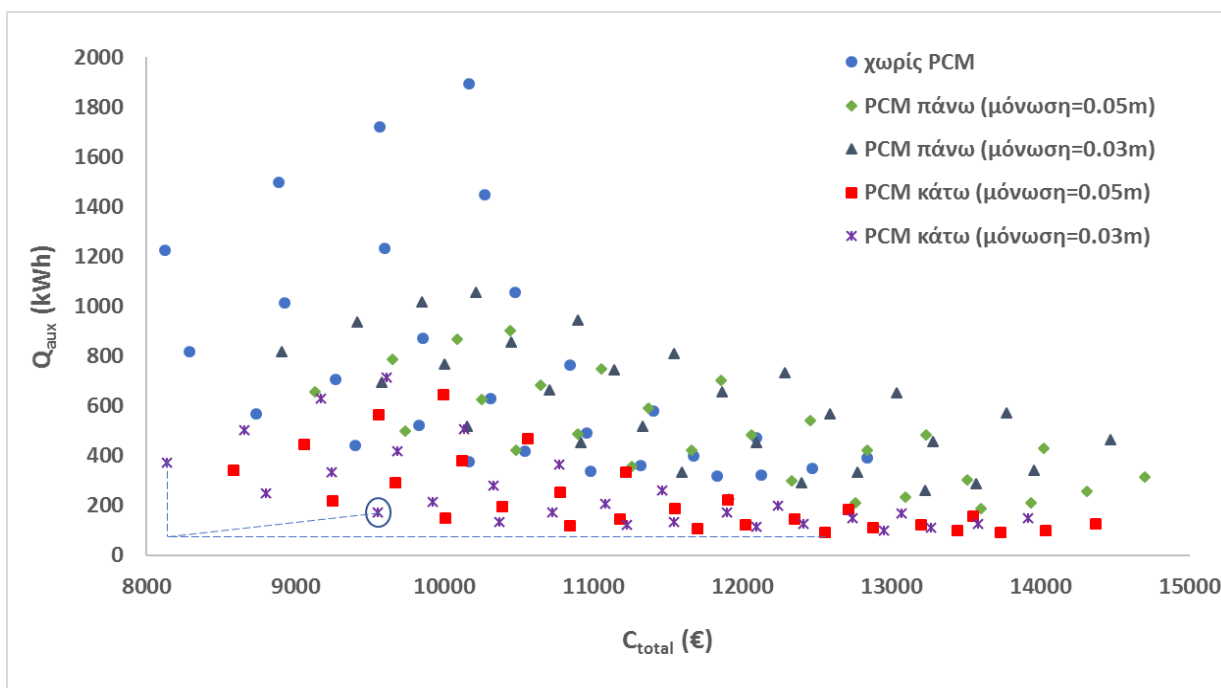
Διάγραμμα 7.3.17: Πολύ-παραγοντική αξιολόγηση του συστήματος χωρίς και με PCM χρησιμοποιώντας τα κριτήρια της καταναλισκόμενης ενέργειας και του συνολικού κόστους για όγκο δοχείου αποθήκευσης $V=1.5 \text{ m}^3$.



Διάγραμμα 7.3.18: Πολύ-παραγοντική αξιολόγηση του συστήματος χωρίς και με PCM χρησιμοποιώντας τα κριτήρια της καταναλισκόμενης ενέργειας και του συνολικού κόστους για όγκο δοχείου αποθήκευσης $V=2.0 \text{ m}^3$.



Διάγραμμα 7.3.19: Πολύ-παραγοντική αξιολόγηση του συστήματος χωρίς και με PCM χρησιμοποιώντας τα κριτήρια της καταναλισκόμενης ενέργειας και του συνολικού κόστους για όγκο δοχείου αποθήκευσης $V=2.5 \text{ m}^3$.



Διάγραμμα 7.3.20: Βέλτιστο σημείο της καταναλισκόμενης ενέργειας συναρτήσει του συνολικού κόστους για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις του συστήματος.

7.3.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων

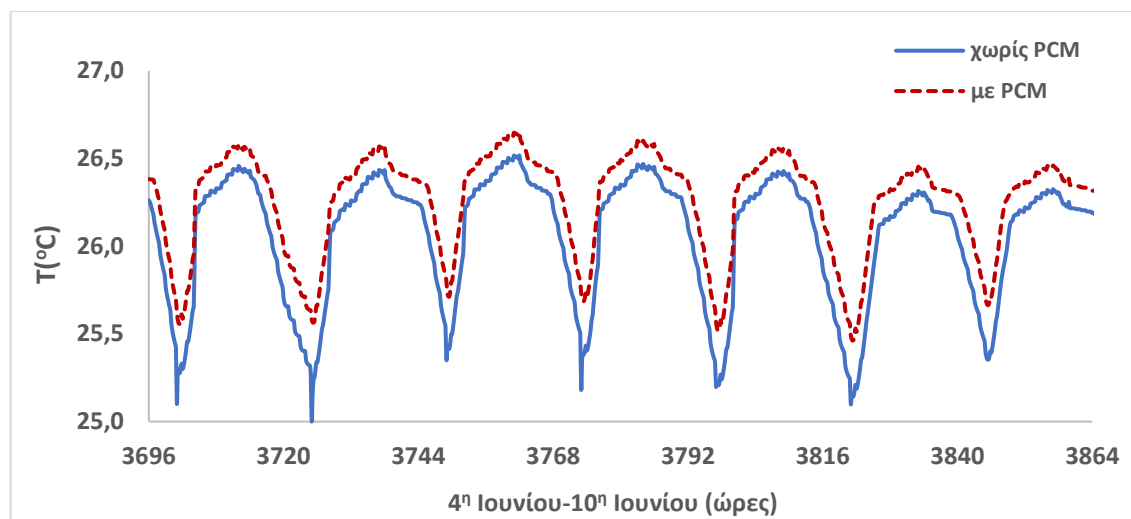
Σε αυτή τη μελέτη, η χρήση PCM σε ηλιακό υποβοηθούμενο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης διερευνήθηκε ενεργειακά και οικονομικά. Το εξεταζόμενο κτήριο παρουσιάζει σχετικά χαμηλά φορτία θέρμανσης λόγω της κατάλληλης μόνωσης σε όλα τα εξωτερικά δομικά στοιχεία. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης υποδεικνύουν ότι η χρήση του PCM είναι ικανή να οδηγήσει σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας της βοηθητικής πηγής. Τα αποτελέσματα της παραγράφου 7.3.5(1) δείχνουν ότι μια συλλεκτική επιφάνεια με μεγαλύτερο εμβαδόν οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας από τη βοηθητική πηγή, αλλά μετά από τα 25 m², η μείωση της ενέργειας είναι σχετικά χαμηλή. Έτσι ενεργειακά, η βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια είναι τα 25 m². Σχετικά με τον όγκο του δοχείου αποθήκευσης, διαπιστώθηκε ότι τα μικρότερα δοχεία αποθήκευσης οδηγούν σε χαμηλότερη κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας και ότι ο όγκος των 1.0 m³ φαίνεται να είναι η καλύτερη περίπτωση ενεργειακά. Η οικονομική ανάλυση της παραγράφου 7.3.5(3) αποδεικνύει ότι η χρήση PCM αυξάνει το συνολικό κόστος του συστήματος.

Η παράγραφος 7.3.5(4) παρουσιάζει μια πολύ-παραγοντική διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία αξιολογεί όλους τους πιθανούς συνδυασμούς συλλεκτικής επιφάνειας και όγκων δοχείων αποθήκευσης για τα πέντε διαφορετικά συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Τέλος, η βέλτιστη περίπτωση, η οποία συνδυάζει χαμηλό κόστος και χαμηλή κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας, είναι αυτή με συλλεκτική επιφάνεια 20 m², όγκο δοχείου αποθήκευσης 1 m³ και PCM κάτω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με μόνωση 3 cm. Επομένως, το PCM είναι μια τεχνολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης προκειμένου να μειωθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια για θέρμανση και να αυξηθεί η μέση εσωτερική θερμοκρασία. Ωστόσο, πρόκειται για μια τεχνολογία με αυξημένο κόστος που εξηγείται από το υψηλό επενδυτικό κόστος. Το λειτουργικό κόστος είναι χαμηλότερο με τη χρήση του PCM, αλλά αυτή η μείωση δεν είναι αρκετή για να αντισταθμίσει το υψηλότερο επενδυτικό κόστος. Όμως, το κόστος θέρμανσης παρουσιάζει αυξανόμενες τάσεις στην αγορά και έτσι στο μέλλον το PCM θα είναι μια ανταγωνιστική τεχνολογία όχι μόνο από άποψη ενεργειακής απόδοσης, αλλά και από οικονομικής. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του PCM οδηγεί σε καλύτερες συνθήκες θερμικής άνεσης επειδή δημιουργούνται υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας του εσωτερικού χώρου. Κατά τη διάρκεια των κρύων χειμωνιάτικων ημερών, η χρήση του PCM είναι σε θέση να αυξήσει την εσωτερική θερμοκρασία περίπου 1°C.

Τέλος, πρέπει να ειπωθεί ότι απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός προκειμένου να ενσωματωθεί σωστά το στρώμα PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης και να αποφευχθούν προβλήματα όπως η διαρροή.

7.3.7 Ετήσια λειτουργία του συστήματος

Το εξεταζόμενο σύστημα λειτουργεί μόνο το χειμώνα. Την περίοδο του καλοκαιριού το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης είναι κλειστό αλλά στο δάπεδο υπάρχει το στρώμα PCM. Το διάγραμμα 7.3.21 δείχνει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου όταν δεν υπάρχει PCM στο δάπεδο και όταν υπάρχει. Σημειώνεται ότι ο θερμοστάτης του χώρου για το καλοκαίρι είναι στους 26-27°C. Η σύγκριση των δύο διακυμάνσεων δείχνει ότι με τη χρήση του PCM στο δάπεδο η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι ομαλότερη και η χαμηλότερη θερμοκρασία είναι αυξημένη κατά 0.5°C.



Διάγραμμα 7.3.21: Διακύμανση εσωτερικής θερμοκρασίας κτηρίου στην Αθήνα με και χωρίς PCM στο δάπεδο για την περίοδο μιας εβδομάδας (4^η-10^η Ιουνίου).

7.3.8 Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα εξετάστηκε ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης με σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης για ένα κτήριο στην Αθήνα. Αυτό το σύστημα περιλαμβάνει ένα στρώμα PCM στο ενδοδαπέδιο σύστημα και εξετάστηκε η βέλτιστη θέση του στρώματος PCM (πάνω ή κάτω από τις σωληνώσεις θέρμανσης). Το ηλιακό σύστημα περιλαμβάνει επίπεδους συλλέκτες, δοχείο αποθήκευσης και βοηθητική πηγή θερμότητας. Το συνολικό σύστημα εξετάστηκε παραμετρικά και βελτιστοποιήθηκε με ενεργειακά και οικονομικά κριτήρια. Μια πολύ-παραγοντική διαδικασία ακολουθήθηκε για τη σωστή βελτιστοποίηση. Η ανάλυση έγινε με το λογισμικό TRNSYS για τη χειμερινή περίοδο. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της μελέτης έχουν δημοσιευθεί από τη συγγραφέα [7.43]. Τα βασικά συμπεράσματα παρατίθενται παρακάτω:

- Η ενεργειακή ανάλυση έδειξε ότι η βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια είναι περίπου 25m² επειδή οι μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες οδηγούν σε εξαιρετικά μικρή μείωση της βοηθητικής κατανάλωσης ενέργειας, δηλαδή η ποσοστιαία μείωση της βοηθητικής κατανάλωσης ενέργειας λόγω PCM μικραίνει σε συλλεκτικές επιφάνειες πάνω από 25m².
- Ένας μεγαλύτερος όγκος δοχείου αποθήκευσης καθιστά τη ζήτηση ενέργειας υψηλότερη και έτσι ο βέλτιστος, ενεργειακά, όγκος δοχείου είναι 1.0 m³.

- Γενικά, διαπιστώθηκε ότι η χρήση ενός στρώματος PCM κάτω από την ενδοδαπέδια σωλήνωση με πάχος μόνωσης 0.03m είναι το βέλτιστο σενάριο.
- Η οικονομική σύγκριση έδειξε ότι υπάρχει αύξηση του συνολικού κόστους με τη χρήση του στρώματος PCM περίπου 18%.
- Κατά τη διάρκεια των κρύων χειμωνιάτικων ημερών, η χρήση του PCM είναι σε θέση να αυξήσει το επίπεδο θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα περίπου κατά 1°C.
- Η πολύ-παραγοντική διαδικασία βελτιστοποίησης απέδειξε ότι η βέλτιστη περίπτωση επιτυγχάνεται με όγκο δοχείου αποθήκευσης 1.0 m³, συλλεκτική επιφάνεια 20 m² και στρώμα PCM στο δάπεδο κάτω από το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης με μόνωση πάχους 0.03 m.

Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η χρήση του PCM είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της βοηθητικής κατανάλωσης ενέργειας στο σύστημα και δημιουργίας καλύτερων συνθηκών θερμικής άνεσης μέσα στο κτήριο. Ωστόσο, το επενδυτικό κόστος του PCM είναι υψηλό και δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από το μειωμένο λειτουργικό κόστος λόγω της χαμηλότερης ζήτησης βοηθητικής ενέργειας. Στο μέλλον, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την εύρεση PCM με χαμηλότερο κόστος προκειμένου να καταστεί η εξεταζόμενη τεχνολογία πιο ελκυστική από οικονομικής άποψης.

7.4 Οικονομική και ενεργειακή αξιολόγηση ενδοδαπέδιων συστημάτων θέρμανσης με PCM και με ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας νερού.

7.4.1 Γενικά

Στην παρούσα εργασία μελετώνται ενεργειακά και οικονομικά, για ένα τυπικό κτήριο στην Αθήνα, τρία διαφορετικά συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας με και χωρίς τη χρήση στρώματος PCM στο δάπεδο. Οι ηλιακοί συλλέκτες όπως ο επίπεδος συλλέκτης (FPC), ο θερμοφωτοβολταϊκός συλλέκτης (PVT) και ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης (PV) είναι οι εξεταζόμενες ηλιακές τεχνολογίες για την τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας με θερμότητα και ηλεκτρισμό. Η πρωτοτυπία αυτής της μελέτης βασίζεται στον συνδυασμό ηλιακής υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας με την ενσωμάτωση ενός στρώματος PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης που αποτελεί μια ενδιαφέρουσα ιδέα για τη

μείωση της ζήτησης φορτίων θέρμανσης του κτηρίου. Με άλλα λόγια, αυτή η μελέτη ερευνά το ζεστό νερό από μια ηλιακή υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας ως πηγή θερμότητας για το PCM σε ένα σύστημα θέρμανσης δαπέδου. Από όσο γνωρίζουμε, δεν υπάρχει άλλη μελέτη που να εξετάζει και να συγκρίνει ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης με τη χρήση ηλιακά υποβοηθούμενων αντλιών θερμότητας με στρώμα PCM στο δάπεδο, το οποίο χρησιμοποιείται για την αύξηση της χωρητικότητας αποθήκευσης και την αποφυγή της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας κατά τη διάρκεια της περιόδου της μέγιστης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, δοκιμάζονται διαφορετικά είδη ηλιακών συλλεκτών για να προσδιοριστεί η βέλτιστη επιλογή, κάτι που είναι καινούργιο για τις μελέτες της βιβλιογραφίας. Επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα κάθε συστήματος είναι μια αποφασιστική παράμετρος και γι' αυτό το λόγο παρουσιάζεται μια βασική οικονομική αξιολόγηση σε αυτή τη μελέτη. Η σύγκριση των βέλτιστων περιπτώσεων είναι το τελικό αποτέλεσμα αυτής της μελέτης και εξάγονται γενικά συμπεράσματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή ενός στρώματος PCM σε συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης αντλιών θερμότητας με την υποβοήθηση της ηλιακής ενέργειας. Η προσομοίωση εκτελείται και εδώ με το λογισμικό TRNSYS όπως και στις προηγούμενες ενότητες.

7.4.2 Εξεταζόμενες περιπτώσεις και θεωρία

Εξεταζόμενο κτήριο

Το εξεταζόμενο κτήριο όπως και το χρησιμοποιούμενο PCM είναι τα ίδια με αυτά της προηγούμενης ενότητας. Επιπλέον, επειδή διαπιστώθηκε από την προηγούμενη μελέτη ότι η χρήση ενός στρώματος PCM κάτω από την ενδοδαπέδια σωλήνωση δίνει το βέλτιστο σενάριο, γι' αυτή τη μελέτη η θέση του στρώματος PCM είναι μόνο κάτω απ' την ενδοδαπέδια σωλήνωση. Για τη μοντελοποίηση της ενδοδαπέδιας θέρμανσης χρησιμοποιείται ένα 'active layer' με τα ίδια χαρακτηριστικά όπως και στην προηγούμενη ενότητα. Και σε αυτή τη μελέτη, η παροχή μάζας έχει επιλεγεί σε 8 kg/hm^2 , τιμή που οδηγεί σε 4 τμήματα στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης [7.44]. Συγκεκριμένα, υπάρχουν 4 διαφορετικοί βρόχοι και κάθε βρόχος είναι υπεύθυνος για την παροχή θέρμανσης στα 25 m^2 του εξεταζόμενου κτηρίου. Επιπλέον, προκειμένου

να δημιουργηθούν συνθήκες άνεσης, χρησιμοποιήθηκε ένας θερμοστάτης για τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης. Η επιθυμητή θερμοκρασία του θερμοστάτη έχει επιλεγεί στους 22°C το χειμώνα [7.44]. Στο τέλος σημειώνεται ότι το φορτίο θέρμανσης του κτιρίου χωρίς PCM υπολογίζεται σε 27 kWh/m² από το TRNSYS. Επιπλέον, αυτός ο υπολογισμός έχει πραγματοποιηθεί και με τη χρήση του PCM και έχει βρεθεί ότι η ζήτηση θέρμανσης μπορεί να μειωθεί κατά περίπου 40%. Η μείωση αυτή είναι εύλογη σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία, επειδή η αναφορά [7.32] έχει βρει την εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ 18.8% και 28.7%, ενώ η αναφορά [7.33] έχει δηλώσει 47.7% εξοικονόμηση ενέργειας με PCM. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη κατανάλωση θέρμανσης είναι περίπου 16 kWh/m² με μόνωση πάχους 3 cm και PCM στο πάτωμα, ενώ είναι 15.5 kWh /m² με μόνωση πάχους 5 cm και PCM στο πάτωμα. Η χρήση του PCM αυξάνει τη θερμοχωρητικότητα του χώρου και έτσι αυξάνει την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας με αποτέλεσμα τη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή τη μείωση της ζήτησης θέρμανσης και αυτό είναι το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης του PCM.

Τα εξεταζόμενα συστήματα ηλιακής θέρμανσης

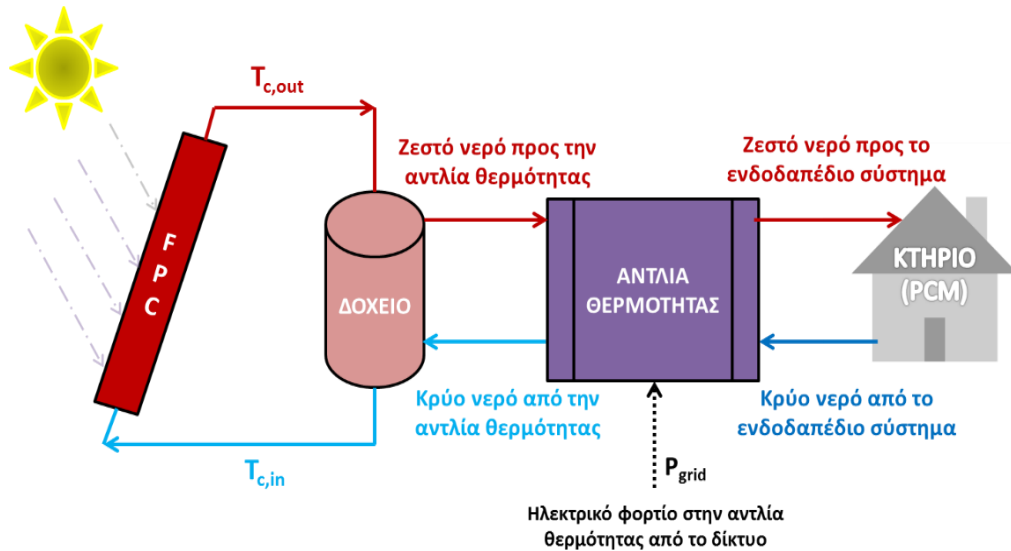
Τα εξεταζόμενα συστήματα ηλιακής θέρμανσης περιγράφονται σε αυτή την ενότητα. Συνολικά, τρία διαφορετικά ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης με ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας με και χωρίς τη χρήση στρώματος υλικού αλλαγής φάσης (PCM) στο δάπεδο συγκρίνονται ενεργειακά και οικονομικά προκειμένου να προσδιοριστεί η πιο εφικτή λύση. Η εξεταζόμενη περίπτωση μελέτης αφορά ένα τυπικό γραφείο με επιφάνεια δαπέδου 100 m² με σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Το βήμα χρόνου προσομοίωσης επιλέχθηκε σε 5 λεπτά αφού διεξήχθη μια απλή ανάλυση ευαισθησίας. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τη χειμερινή περίοδο (Νοέμβριος - Απρίλιος) όταν υπάρχει ζήτηση θέρμανσης για την Αθήνα. Επιπλέον, είναι αξιοσημείωτο ότι διάφορες παράμετροι όπως οι παροχές μάζας στα διάφορα κυκλώματα έχουν εξεταστεί παραμετρικά προκειμένου να βρεθούν αξιόπιστες τιμές που οδηγούν στις κατάλληλες θερμικές συνθήκες εσωτερικού χώρου και σε λογική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην αντλία θερμότητας νερού. Μια κρίσιμη παράμετρος είναι ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης που έχει επιλεγεί σε 1 m³ σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτή η τιμή οδηγεί σε αποδεκτά αποτελέσματα σχετικά με τα επίπεδα εσωτερικής θερμοκρασίας και τα επίπεδα θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοχείου αποθήκευσης

και έτσι έχει επιλεγεί μετά από μια απλή ανάλυση ευαισθησίας. Επιπλέον, είναι χρήσιμο να ειπωθεί ότι όταν μειώνεται η ηλιακή ακτινοβολία, τότε ο COP της αντλίας θερμότητας είναι χαμηλότερος και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται στην αντλία θερμότητας για να καλύψει την αντίστοιχη ζήτηση θέρμανσης στο κτήριο. Κατά τη διάρκεια των συννεφιασμένων ή βροχερών ημερών, η χρήσιμη ηλιακή ενέργεια είναι πολύ χαμηλή ή αμελητέα. Αυτές τις μέρες, το σύστημα λειτουργεί όπως μια αντλία θερμότητας αέρα περιβάλλοντος με μειωμένο COP και έτσι μεγαλύτερες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνονται κατά τη διάρκεια αυτών των ημερών.

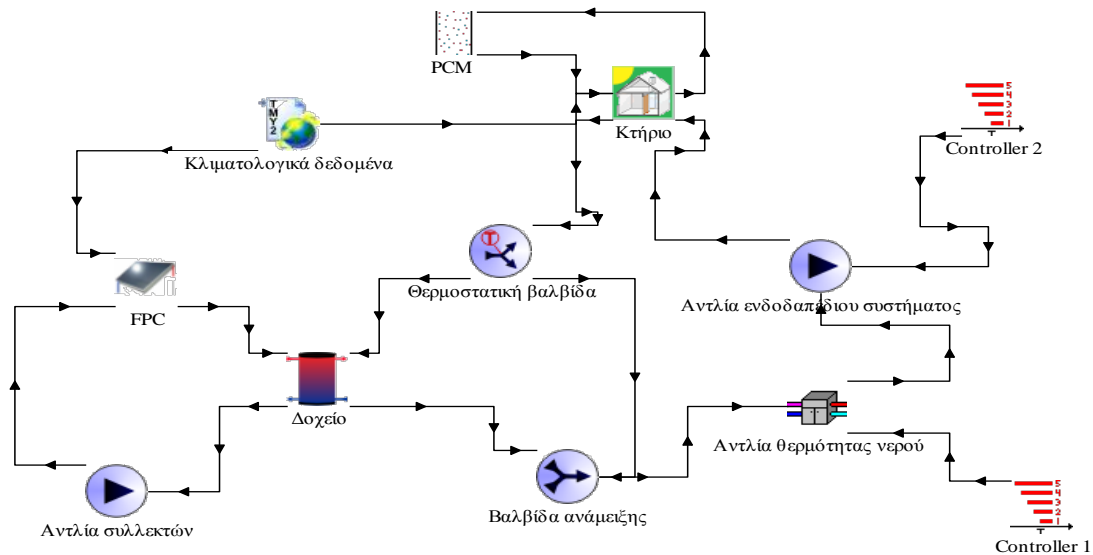
A) Σύστημα θέρμανσης με ηλιακούς συλλέκτες (FPC) συνδεδεμένους με αντλία θερμότητας νερού.

Το πρώτο εξεταζόμενο σύστημα που αναπτύχθηκε και προσομοιώθηκε είναι ένα ηλιακό σύστημα θέρμανσης με αντλία θερμότητας που συνδέεται με επίπεδους συλλέκτες (FPC). Ο FPC παράγει χρήσιμη θερμότητα που αποθηκεύεται στο δοχείο αποθήκευσης. Το δοχείο αποθήκευσης τροφοδοτεί την αντλία θερμότητας νερού με τη κατάλληλη εισαγωγή θερμότητας. Η αντλία θερμότητας καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο για να αυξήσει τη θερμοκρασία του νερού εισόδου. Το ζεστό νερό εισέρχεται στους σωλήνες του συστήματος ενδοδαπέδιας θέρμανσης για να καλύψει τη ζήτηση θερμότητας στον εσωτερικό χώρο. Η εικόνα 7.4.1 απεικονίζει το εξεταζόμενο σύστημα με FPC και η εικόνα 7.4.2 την απλή διαμόρφωση του μοντέλου του συστήματος στο TRNSYS. Επιπλέον, είναι χρήσιμο να ειπωθεί ότι το παρόν σύστημα έχει σχετικά υψηλό COP επειδή το ηλιακό πεδίο παρέχει ζεστό νερό στην αντλία θερμότητας που είναι γενικά σε υψηλότερη θερμοκρασία από το περιβάλλον. Η συλλεκτική επιφάνεια του FPC είναι μια σημαντική παράμετρος αυτής της μελέτης και διερευνάται από 10 m² έως 25 m². Το στρώμα PCM τοποθετείται κάτω από τις σωληνώσεις της ενδοδαπέδιας θέρμανσης για να αποθηκεύει θερμότητα από το ζεστό νερό και να απελευθερωθεί στον εσωτερικό χώρο με σχετικά σταθερό και ελεγχόμενο τρόπο. Η χρήση του PCM αυξάνει την ικανότητα αποθήκευσης και έτσι η αντλία λειτουργεί για μικρότερο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ένα κατάλληλο σύστημα ελέγχου χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης καθώς και για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του νερού μέχρι τους 45°C για λόγους ασφαλείας. Υψηλότερες θερμοκρασίες νερού μπορούν να καταστρέψουν το σύστημα σωληνώσεων

του ενδοδαπέδιου συστήματος. Ειδικότερα, η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία επιλέχθηκε στους 22°C και η αντλία θερμότητας λειτουργεί όταν η εσωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από 21°C για να μειωθεί η βοηθητική ηλεκτρική ενέργεια [7.44]. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Β, η εικόνα Β3 δείχνει την ολοκληρωμένη διαμόρφωση του συστήματος στο TRNSYS.



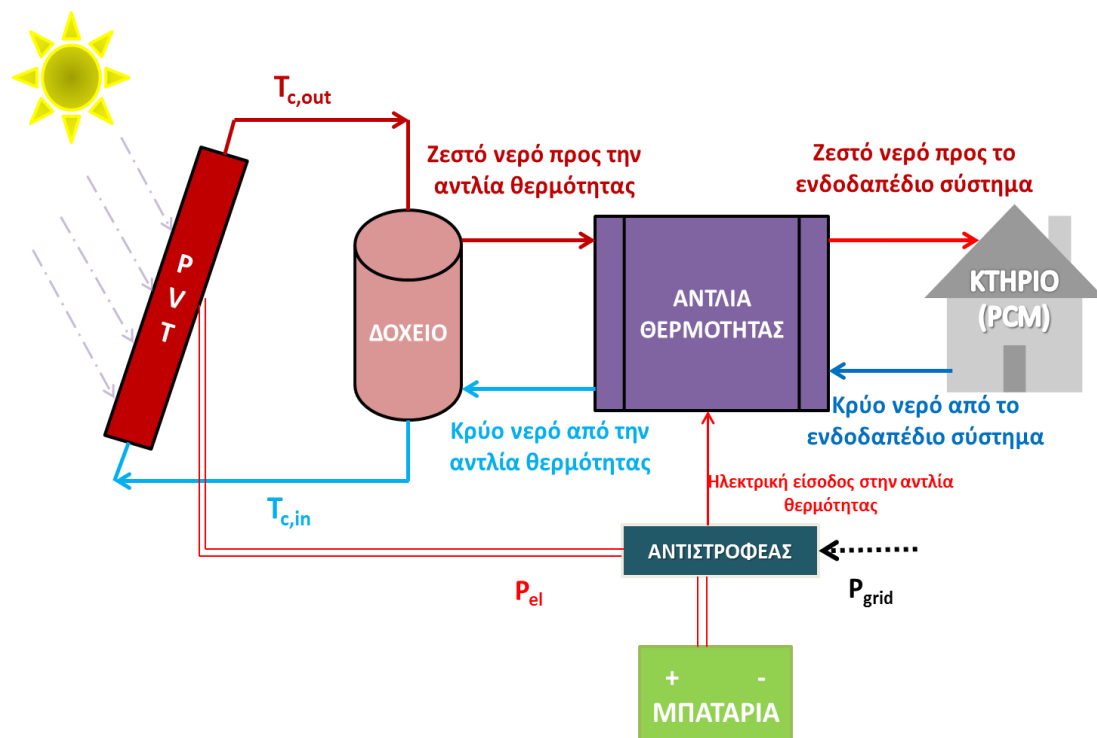
Εικόνα 7.4.1: Εξεταζόμενο σύστημα υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από επίπεδους συλλέκτες (FPC) για ενδοδαπέδια θέρμανση.



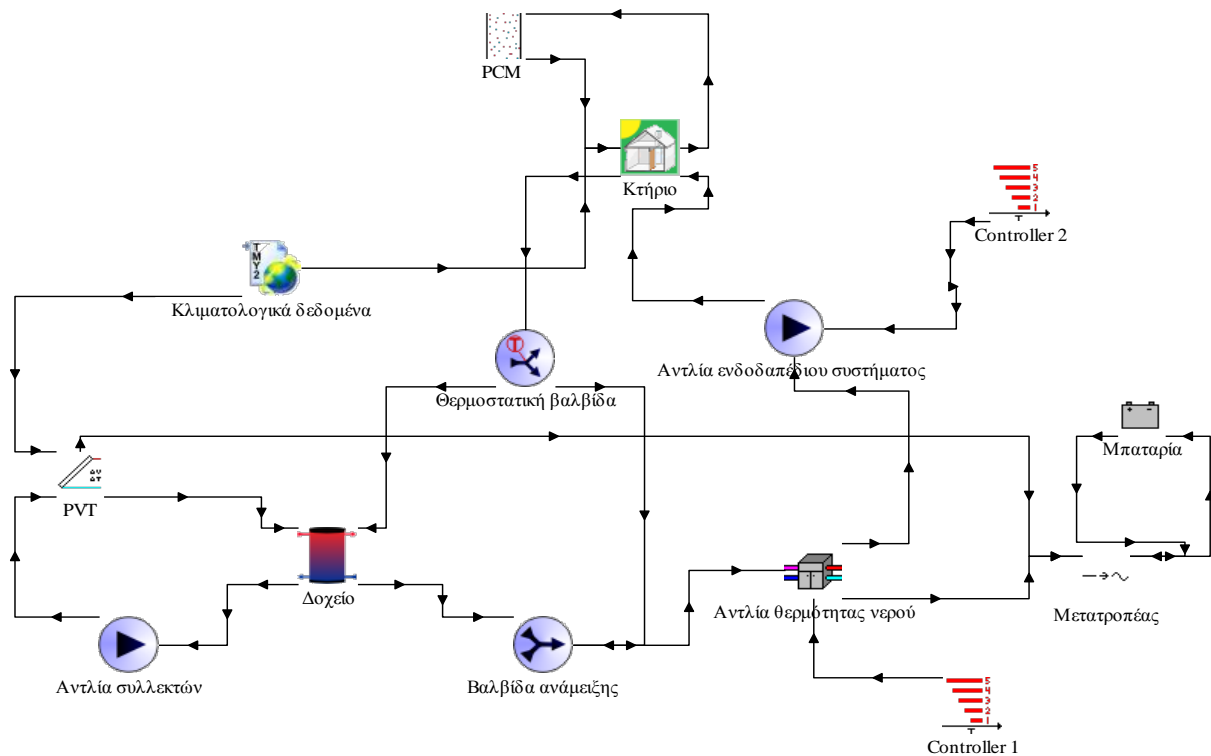
Εικόνα 7.4.2: Απλή διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM και εξεταζόμενο σύστημα υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από επίπεδους συλλέκτες (FPC) για ενδοδαπέδια θέρμανση στο TRNSYS.

Β) Σύστημα θέρμανσης με θερμο-φωτοβολταϊκούς συλλέκτες (PVT) συνδεδεμένους με αντλία θερμότητας νερού.

Το δεύτερο σύστημα που αναπτύχθηκε, προσομοιώθηκε και ερευνήθηκε είναι το σύστημα με θερμο-φωτοβολταϊκούς συλλέκτες (PVT) και απεικονίζεται στην εικόνα 7.4.3. Επιπλέον, η εικόνα 7.4.4 απεικονίζει την ανάπτυξη του μοντέλου του συστήματος στο TRNSYS. Οι θερμο-φωτοβολταϊκοί συλλέκτες τροφοδοτούν την αντλία θερμότητας νερού τόσο με χρήσιμη θερμότητα όσο και με ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διαμόρφωση παρουσιάζει υψηλή συμβατότητα επειδή τα PVT παρέχουν τις ενεργειακές απαιτήσεις της αντλίας θερμότητας. Έτσι, το τελικό σύστημα παρουσιάζει χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Γενικά, το συνολικό σύστημα είναι παρόμοιο με το προηγούμενως περιγραφόμενο σύστημα στην παράγραφο 7.4.2Α και έτσι δεν εξηγείται ξανά. Η μόνη διαφορά αφορά τη χρήση μπαταρίας και μετατροπέα για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Β, η εικόνα Β4 δείχνει την ολοκληρωμένη διαμόρφωση του συστήματος στο TRNSYS.



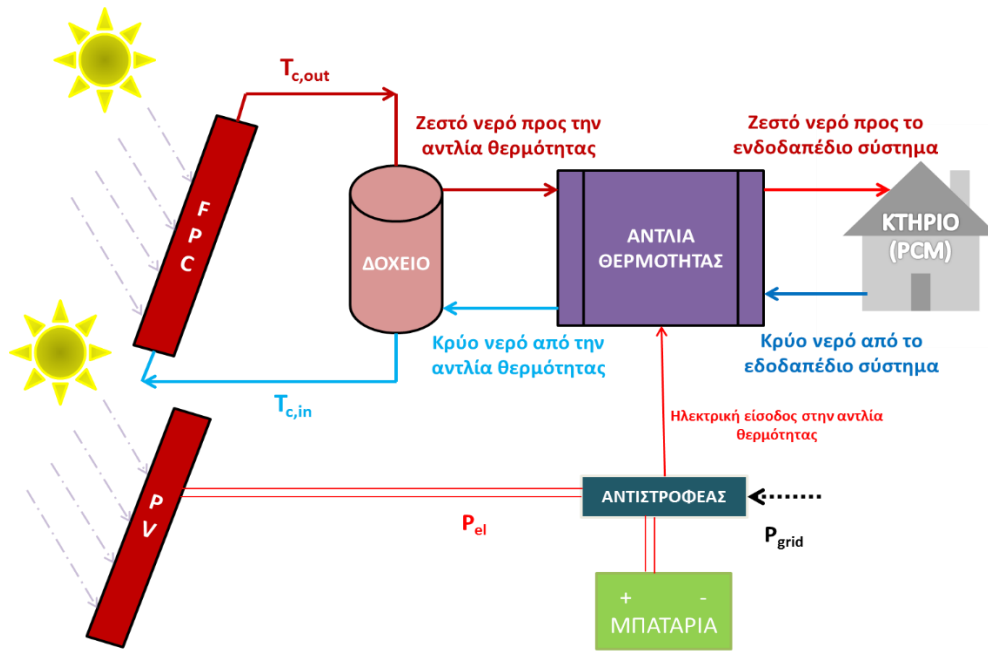
Εικόνα 7.4.3: Εξεταζόμενο σύστημα υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από θερμοφωτοβολταϊκούς συλλέκτες (PVT) για ενδοδαπέδια θέρμανση.



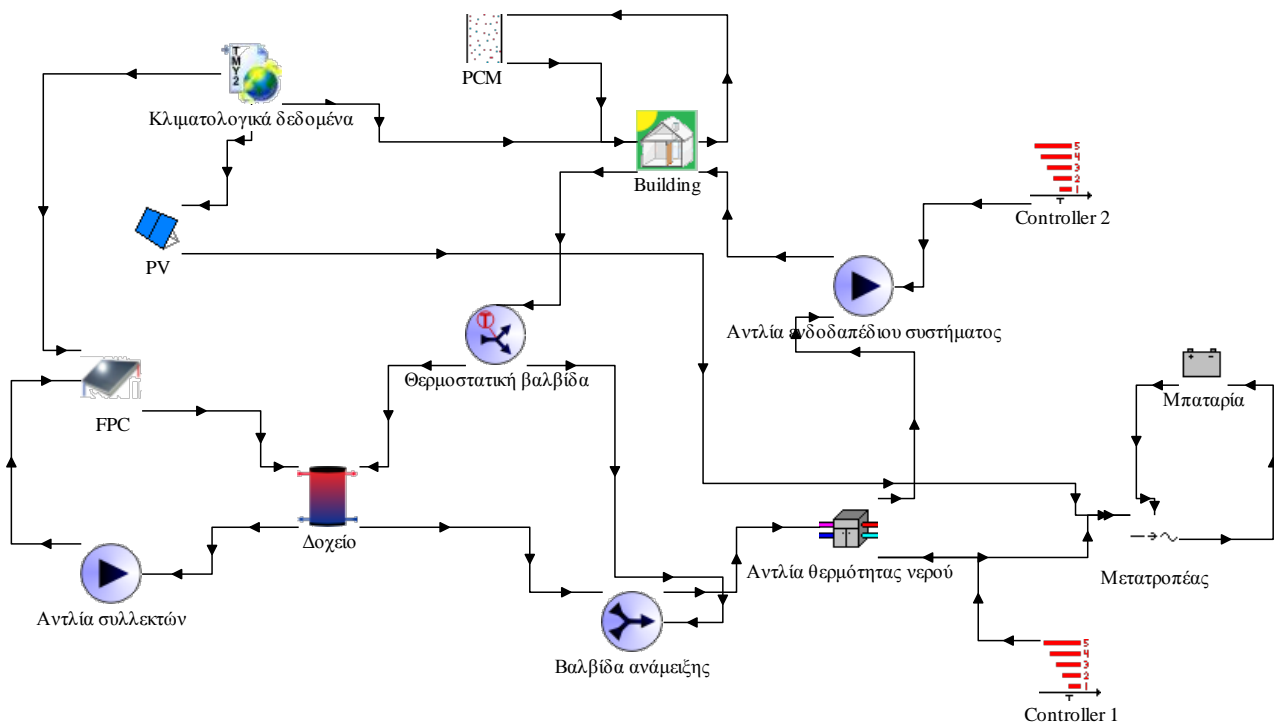
Εικόνα: 7.4.4: Απλή διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM και εξεταζόμενο σύστημα υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από θερμοφωτοβολταϊκούς συλλέκτες (PVT) για ενδοδαπέδια θέρμανση στο TRNSYS.

Γ) Σύστημα θέρμανσης με επίπεδους συλλέκτες και φωτοβολταϊκά (FPC-PV) συνδεδεμένα με αντλία θερμότητας νερού.

Το τελευταίο σύστημα που αναπτύχθηκε, προσομοιώθηκε και ερευνήθηκε περιλαμβάνει τους επίπεδους συλλέκτες (FPC) και τα Φ/Β (PV) που κινούν μαζί την αντλία θερμότητας νερού. Πιο συγκεκριμένα, οι FPC παρέχουν την ωφέλιμη θερμότητα στην αντλία θερμότητας και τα Φ/Β πάνελ παρέχουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η εικόνα 7.4.5 απεικονίζει το εξεταζόμενο σύστημα και επιπλέον η εικόνα 7.4.6 απεικονίζει την ανάπτυξη του μοντέλου του συστήματος στο TRNSYS. Για όλες τις περιπτώσεις, το εμβαδόν του PV επιλέγεται στα 10 m², ενώ η συλλεκτική επιφάνεια των επίπεδων συλλεκτών κυμαίνεται από 10 m² έως 25 m². Το επιλεγμένο εμβαδόν των Φ/Β πάνελ είναι γενικά επαρκές για την παροχή σημαντικών ποσών ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα και έχει επαληθευτεί από τα τελικά αποτελέσματα προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Β, η εικόνα Β5 δείχνει την ολοκληρωμένη διαμόρφωση του συστήματος στο TRNSYS.



Εικόνα 7.4.5: Εξεταζόμενο σύστημα υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από επίπεδους συλλέκτες και φωτοβολταϊκά (FPC-PV) για ενδοδαπέδια θέρμανση.



Εικόνα 7.4.6: Απλή διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου με το PCM και το εξεταζόμενο σύστημα υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας από επίπεδους συλλέκτες και φωτοβολταϊκά (FPC-PV) για ενδοδαπέδια θέρμανση στο TRNSYS.

7.4.3 Τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία (components) στο TRNSYS

Οι πληροφορίες για τα εξεταζόμενα στοιχεία των συστημάτων βρίσκονται σε αυτή την ενότητα. Συνολικά, χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί τύποι συλλεκτών: επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες, φωτοβολταϊκά, και θερμοφωτοβολταϊκοί συλλέκτες. Πολλές τιμές των επιλεγόμενων παραμέτρων προέρχονται από τη βάση δεδομένων του TRNSYS έτσι ώστε να εξετασθούν τυπικοί τύποι συλλεκτών. Όταν χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές, αυτές αναφέρονται όπως και οι λόγοι της αλλαγής τους.

A) Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης (FPC)

Η πρώτη εξεταζόμενη ηλιακή τεχνολογία είναι ένας επίπεδος συλλέκτης, ο οποίος παράγει χρήσιμη θερμότητα. Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση της ηλιακής ενέργειας το χειμώνα, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται να είναι 45° , η οποία είναι μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας. Ο Πίνακας 7.4.1 δίνει τις κύριες τιμές των παραμέτρων του εξεταζόμενου FPC όπως αυτές χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

B) Θερμοφωτοβολταϊκός συλλέκτης (PVT)

Η δεύτερη εξεταζόμενη ηλιακή τεχνολογία είναι ένας θερμοφωτοβολταϊκός συλλέκτης ο οποίος παράγει ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια και χρήσιμη θερμότητα. Οι παράμετροι του PVT παρατίθενται στον πίνακα 7.4.1.

Γ) Φωτοβολταϊκός συλλέκτης (PV)

Είναι γνωστό ότι οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες χρησιμοποιούν ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τιμές των παραμέτρων είναι γενικά οι προκαθορισμένες τιμές του στοιχείου στο TRNSYS. Η συλλεκτική επιφάνεια του PV επιλέχθηκε να είναι 10 m^2 . Επιπλέον, ο Πίνακας 7.4.1 δίνει τις παραμέτρους της εξεταζόμενης φωτοβολταϊκής μονάδας.

Δ) Αντλία θερμότητας νερού-νερού

Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιείται μια αντλία θερμότητας νερού- νερού. Αυτή η συσκευή χρησιμοποιεί την παραγωγή χρήσιμης θερμότητας του ηλιακού πεδίου και ηλεκτρικής ενέργειας από έναν ηλιακό συλλέκτη ή/και το δίκτυο για να παράγει την εισερχόμενη θερμότητα στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Οι παράμετροι της αντλίας θερμότητας δίνονται στον Πίνακα 7.4.1. Αυτή η αντλία θερμότητας λειτουργεί

με το R134a ως ψυκτικό και παρουσιάζει αυξημένο COP σε σύγκριση με τις συμβατικές αντλίες θερμότητας αέρα. Υπάρχουν οι κατάλληλοι εναλλάκτες θερμότητας για τις ταχύτητες μεταφοράς θερμότητας. Μέσα στο εργαλείο προσομοίωσης υπάρχουν δεδομένα από τους καταλόγους κατασκευαστών προκειμένου να ληφθεί υπόψη η λειτουργία των μερικών φορτίων.

E) Μπαταρίες

Οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται στη προσομοίωση για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις μονάδες PVT και PV. Η χωρητικότητα αποθήκευσης των μπαταριών εξαρτάται από την εγκατεστημένη ισχύ σε όλες τις περιπτώσεις. Ο Πίνακας 7.4.1 δίνει τις κύριες παραμέτρους της χρησιμοποιούμενης μπαταρίας στα εξεταζόμενα συστήματα.

ΣΤ) Αντιστροφέας

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο, το οποίο χρησιμοποιείται στο σύστημα, είναι ο αντιστροφέας, επειδή καθορίζει την ισχύ που καταναλώνεται από το δίκτυο. Ο πίνακας 7.4.1 δίνει τις κύριες παραμέτρους του χρησιμοποιούμενου αντιστροφέα στα εξεταζόμενα συστήματα.

Z) Δοχείο αποθήκευσης

Το δοχείο αποθήκευσης χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ζεστού νερού από τα ηλιακά στοιχεία. Ο Πίνακας 7.4.1 δίνει τις κύριες παραμέτρους του χρησιμοποιούμενου δοχείου αποθήκευσης.

H) Άλλα στοιχεία των εξεταζόμενων συστημάτων

Υπάρχουν επιπλέον στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη. Μια αντλία νερού (Μοντέλο (Type) 3b στο TRNSYS), μία θερμοστατική βαλβίδα (Type 11b στο TRNSYS), μια βαλβίδα ανάμειξης (Type 11h στο TRNSYS) και ένας ελεγκτής-controller (Type 970 στο TRNSYS). Οι τιμές των παραμέτρων έχουν επιλεγεί κατάλληλα για τη σωστή λειτουργία των συστημάτων.

Πίνακας 7.4.1: Παράμετροι των στοιχείων.

Στοιχεία	Παράμετροι	Τιμές
<i>FPC</i> (Type 1b στο TRNSYS)	Συλλεκτική επιφάνεια (A_c)	10-25 m ²
	F_R (τα)	0.80
	Κλίση συλλέκτη (β)	45°
	Συντελεστής θερμικών απωλειών [$F_R U_L$]	3.61 W/m ² K
	Παροχή μάζας νερού (m_c)	720-1800 kg/h
	Ειδική θερμότητα νερού (c_p)	4.19 kJ/kgK
<i>PVT</i> (Type 50b στο TRNSYS)	Συλλεκτική επιφάνεια (A_c)	10-25 m ²
	Απορροφητικότητα (α)	0.92
	Διαπερατότητα καλύμματος (τ)	0.90
	Συντελεστής εκπομπής απορροφητήρα (ϵ_p)	0.09
	Κλίση συλλέκτη	45°
	Συντελεστής πλευρικών θερμικών απωλειών και συντελεστής θερμικών απωλειών πυθμένα ($U_e + U_b$)	0.31 W/m ² K
	Μέγιστη αποδοτικότητα κελιού σε συνθήκες αναφοράς	15%
	Θερμοκρασία για απόδοση αναφοράς στοιχείου	25°C
	Συντελεστής θερμοκρασίας την απόδοσης στοιχείου (b)	0.0032 K ⁻¹
<i>PV</i> (Type 94a στο TRNSYS)	Αριθμός πλαισίων	10
	Μέγιστο ρεύμα αναφοράς (I_{max})	6.5 A
	Ρεύμα αναφοράς στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης IV (I_{mp})	5.9 A
	Μέγιστη τάση αναφοράς (V_{max})	21.6 V
	Τάση αναφοράς στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης IV (V_{mp})	17 V
	Θερμοκρασία αναφοράς T_{ref}	25 °C
	Επιφάνεια πλαισίου A_{pv} (1 module)	1 m ²
	Ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου αναφοράς ($G_{T,ref}$)	1000 W/m ²
<i>Αντλία θερμότητας</i> (Type 927 στο TRNSYS)	Ισχύς θέρμανσης	3 kW
	Έλεγχος σήματος για θέρμανση	1
<i>Μπαταρία</i> (Type 47b στο TRNSYS)	Χωρητικότητα μπαταρίας	30- 80 Ah
	Στοιχεία σε σειρά	6
	Στοιχεία παράλληλα	1
	Απόδοση φόρτισης	0.9
	Μέγιστο ρεύμα ανά στοιχείο φόρτισης	3.33 A
	Μέγιστο ρεύμα ανά στοιχείο εκφόρτισης	-3.33 A
	Μέγιστη τάση ανά στοιχείο	2.5 V
<i>Αντιστροφέας</i> (Type 48b στο TRNSYS)	Ισχύς	1.5-3 kW
	Απόδοση	0.96
<i>Δοχείο αποθήκευσης</i> (Type 4b στο TRNSYS)	Όγκος δοχείου	1 m ³
	Συντελεστής θερμικών απωλειών δοχείου	0.833 W/m ² K

7.4.4 Μαθηματική μοντελοποίηση συστημάτων

Οι βασικές μαθηματικές εξισώσεις για τη μελέτη των συστημάτων δίνονται σε αυτή την παράγραφο. Αυτές οι εξισώσεις αφορούν τις ενεργειακές ισορροπίες, τους ορισμούς των παραμέτρων και είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

A) Μοντελοποίηση του επίπεδου συλλέκτη

Οι εξισώσεις για τον επίπεδο συλλέκτη είναι οι ίδιες με την ενότητα 7.3.4. Επομένως ισχύουν οι εξισώσεις της προηγούμενης ενότητας 7.3.4 για τον επίπεδο συλλέκτη.

$$Q_u = m_c \cdot c_p \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (7.4.1)$$

$$Q_s = A_c \cdot G_T \quad (7.4.2)$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (7.4.3)$$

B) Μοντελοποίηση του δοχείου αποθήκευσης

Η αποθηκευμένη ενέργεια στο δοχείο αποθήκευσης (Q_{stored}) υπολογίζεται από την ωφέλιμη ενέργεια από τους συλλέκτες (Q_u), το θερμικό φορτίο προς την αντλία θερμότητας (Q_{hp}) και τις απώλειες του δοχείου (Q_{loss}).

Έτσι, η εξίσωση που δίνει το ενεργειακό ισοζύγιο στο δοχείο αποθήκευσης δίνεται παρακάτω:

$$Q_{stored} = Q_u - Q_{hp} - Q_{loss} \quad (7.4.4)$$

Γ) Μοντελοποίηση της αντλίας θερμότητας νερού-νερού

Η αποδοτικότητα της αντλίας θερμότητας καθορίζεται από τον συντελεστή συμπεριφοράς (COP). COP είναι το πηλίκο της παραγόμενης θερμότητας για το ενδοδαπέδιο σύστημα (Q_{load}) προς τη συνολική ηλεκτρική κατανάλωση (P_{tot}):

$$COP = \frac{Q_{load}}{P_{tot}} \quad (7.4.5)$$

Η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση (P_{tot}) είναι το άθροισμα της ηλεκτρικής ενέργειας από τους συλλέκτες (P_{el}) και από το δίκτυο (P_{grid}):

$$P_{tot} = P_{grid} + P_{el} \quad (7.4.6)$$

Δ) Μοντελοποίηση Φ/Β (PV)

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (η_{el}) του φωτοβολταϊκού (PV) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{Q_s} \quad (7.4.7)$$

Ε) Μοντελοποίηση θερμοφωτοβολταϊκού συλλέκτη (PVT)

Η ηλεκτρική και η θερμική ενέργεια παρέχεται από τους PVT συλλέκτες. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη είναι ίσος με το άθροισμα των δύο ενεργειών προς την διαθέσιμη ισχύ από την ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη και δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta_{tot} = \frac{Q_u + P_{el}}{Q_s} \quad (7.4.8)$$

Επιπλέον, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του PVT μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξίσωση 7.4.3 και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης σύμφωνα με την εξίσωση 7.4.7.

ΣΤ) Ενεργειακή ζήτηση του κτηρίου

Το θερμικό φορτίο του κτηρίου δίνεται προσεγγιστικά από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_{load} = m_{und} \cdot c_p \cdot (T_{und,out} - T_{und,in}) \quad (7.4.9)$$

Ζ) Αξιολόγηση των συστημάτων

Η ηλεκτρική ηλιακή κάλυψη (f) είναι μια σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση των συστημάτων. Αυτή η παράμετρος δείχνει την συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας στις ανάγκες για ηλεκτρισμό των συστημάτων και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική κατανάλωση από το δίκτυο (P_{grid}) και την συνολική ηλεκτρική κατανάλωση (P_{tot}), όπως δείχνει η παρακάτω εξίσωση:

$$f = 1 - \frac{P_{grid}}{P_{tot}} \quad (7.4.10)$$

Για την περίπτωση του συστήματος με FPC, ο παρονομαστής είναι ίσος με την κατανάλωση ενέργειας ενός συστήματος χωρίς ηλιακούς συλλέκτες και με μια αντλία θερμότητας αέρα. Έτσι, για το σύστημα FPC, ο παρονομαστής έχει μια σταθερή υψηλή τιμή, ενώ το (P_{grid}) έχει μια χαμηλή τιμή εξαιτίας του αυξανόμενου COP. Αυτά τα δεδομένα κάνουν την παράμετρο (f) για το σύστημα FPC να έχει θετική τιμή.

Η) Μοντελοποίηση του PCM (Type 1270)

Για τη μοντελοποίηση του PCM ισχύουν αυτά που έχουν ειπωθεί στις προηγούμενες ενότητες και οι δύο βασικές εξισώσεις είναι οι 7.3.9 και 7.3.10 της ενότητας 7.3.4.

Θ) Μοντελοποίηση οικονομικής ανάλυσης

Η οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων διεξάγεται εφαρμόζοντας τον υπολογισμό του συνολικού κόστους των συστημάτων (C_{total}) όπως στην προηγούμενη ενότητα 7.3.4. Επομένως και εδώ ισχύει η εξίσωση 7.3.11 της προηγούμενης ενότητας.

$$C_{total} = C_{capital} + C_{variable} \quad (7.4.11)$$

Το συνολικό κόστος κάθε εξεταζόμενου συστήματος είναι διαφορετικό και έτσι ακολουθείται διαφορετική διαδικασία σε κάθε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, η εξίσωση 7.4.12 δείχνει ότι για το σύστημα με FPC λαμβάνεται υπόψη το κόστος του επίπεδου συλλέκτη, του δοχείου αποθήκευσης, της αντλίας θερμότητας και το κόστος του ενδοδαπέδιου συστήματος. Για το σύστημα FPC+PCM λαμβάνεται υπόψη το προηγούμενο κόστος συν το κόστος του PCM. Ο Πίνακας 7.4.2 περιλαμβάνει τα χρησιμοποιούμενα κόστη για την ανάλυση αυτή.

$$C_{capital} = \begin{cases} A_c \cdot C_c + V_t \cdot C_t + C_{hp} + C_{und} \\ A_c \cdot C_c + V_t \cdot C_t + C_{hp} + C_{und} + C_{pcm} \end{cases} \quad (7.4.12)$$

Η εξίσωση 7.4.13 δείχνει τον τρόπο που υπολογίζεται το μεταβλητό κόστος που βασικά είναι το κόστος της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

$$C_{variable} = E_{el} \cdot K_{el} \cdot R + K_{O\&M} \quad (7.4.13)$$

όπου K_{el} είναι το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε [€/kWh] και $K_{O\&M}$ είναι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης που είναι ίσο με 0.01 του $C_{capital}$. Η παράμετρος R είναι τα ‘πραγματικά’ χρόνια της διάρκειας ζωής της επένδυσης που λαμβάνει υπόψη το επιτόκιο αναγωγής χρήματος, όπως δείχνει η παρακάτω εξίσωση:

$$R = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (7.4.14)$$

Πρακτικά, τα ‘πραγματικά’ χρόνια (R) είναι μικρότερα από τη διάρκεια ζωής της επένδυσης (N).

Η ετήσια ηλεκτρική παραγωγή ορίζεται από την εξίσωση 7.4.15. Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι η περίοδος θέρμανσης στην Αθήνα είναι μεταξύ του Νοεμβρίου και Απριλίου και έτσι αυτή η περίοδος λαμβάνεται υπόψη στην εξίσωση 7.4.15.

$$E_{el} = \int_{November}^{April} P_{el} dt \quad (7.4.15)$$

Επιπλέον, το βέλτιστο σύστημα προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μια πολύ-παραγοντική διαδικασία αξιολόγησης ακριβώς όπως στην προηγούμενη ενότητα 7.3.4. Εδώ, η ελαχιστοποίηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης και η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους είναι οι δύο στόχοι αυτής της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο στόχος αυτής της μεθοδολογίας αξιολόγησης είναι η ελαχιστοποίηση της ακόλουθης συνάρτησης παραγόντων (F):

$$F = \sqrt{\left(\frac{Y-Y_{min}}{Y_{max}-Y_{min}}\right)^2 + \left(\frac{X-X_{min}}{X_{max}-X_{min}}\right)^2} \quad (7.4.16)$$

Η παράμετρος Y εδώ είναι η ηλεκτρική κατανάλωση από το δίκτυο και το X είναι το συνολικό κόστος (C_{total}). Η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την απλή περίοδο αποπληρωμής (simple payback period -SPP). Αυτή η παράμετρος λαμβάνει υπόψη το επιπλέον κόστος επένδυσης για κάθε σύστημα (ΔC) σε σύγκριση με το κόστος επένδυσης αναφοράς ενός συστήματος με λέβητα (C_0). Επιπλέον, η SPP λαμβάνει υπόψη το κέρδος των χρηματοροών (ΔCF) με τη χρήση οποιουδήποτε συστήματος σε σύγκριση με το σύστημα αναφοράς. Εάν το κόστος επένδυσης ενός συστήματος (για παράδειγμα, FPC με PCM και μόνωση 0.03 m) είναι "C" και η χρηματοροή που πληρώνεται για τη θέρμανση του κτηρίου είναι "CF", μπορεί να γραφτεί ως [7.41]:

$$SPP = \frac{\Delta C}{\Delta CF} = \frac{C-C_0}{CF_0-CF} \quad (7.4.17)$$

Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι ο δείκτης "ο" αναφέρεται στην περίπτωση αναφοράς που είναι το σύστημα με τον λέβητα. Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει διαφορά μεταξύ του "C" και του "CF" βασίζεται στο υψηλότερο κόστος επένδυσης των εξεταζόμενων συστημάτων και στη χαμηλότερη ετήσια χρηματοροή των συστημάτων αυτών σε σύγκριση με το σύστημα αναφοράς. Ο Πίνακας 7.4.2 περιλαμβάνει τα οικονομικά δεδομένα αυτής της μελέτης. Συγκεκριμένα, το επιτόκιο αναγωγής χρήματος (r) επιλέγεται στο 3% λόγω της οικονομικής κρίσης των τελευταίων ετών στην Ελλάδα. Το

κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ορίστηκε σε 0.20€/kWh γιατί είναι η πιο αντιπροσωπευτική τιμή αυτή την περίοδο. Τέλος, το κόστος του συστήματος ελέγχου δεν ελήφθη υπόψη σε αυτή τη μελέτη.

Πίνακας 7.4.2. Οικονομικά δεδομένα της μελέτης.

<i>Παράμετροι</i>	<i>Τιμές</i>	<i>Αναφορές</i>
<i>Κόστος συλλέκτη FPC (C_c)</i>	150 €/m ²	[7.38]
<i>Κόστος συλλέκτη PVT (C_{pvt})</i>	200 €/m ²	[7.38]
<i>Κόστος συλλέκτη PV (C_{pv})</i>	150 €/m ²	[7.38]
<i>Κόστος δοχείου αποθήκευσης (C_t)</i>	500 €/m ³	[7.38]
<i>Κόστος PCM με μόνωση 0.05m (C_{pcm1})</i>	3000 €	[7.40]
<i>Κόστος PCM με μόνωση 0.03m (C_{pcm2})</i>	2500 €	[7.40]
<i>Κόστος ενδοδαπέδιου συστήματος (C_{und})</i>	30 €/m ²	[7.39]
<i>Κόστος αντιστροφέα (C_{inv})</i>	1000 €	[7.38]
<i>Κόστος μπαταρίας (C_{bat})</i>	1 €/Ah	[7.38]
<i>Κόστος αντλίας θερμότητας (C_{hp})</i>	2500 €/per ton	[7.39]
<i>Επιτόκιο αναγωγής χρήματος (r)</i>	3%	[7.41]
<i>Διάρκεια ζωής επένδυσης (N)</i>	25 years	[7.38]
<i>Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (K_{el})</i>	0.20 €/kWh	[7.41]
<i>Κόστος λέβητα (C_{boiler})</i>	3000 €	[7.45]
<i>Κόστος θέρμανσης (K_{heat})</i>	0.12 €/kWh	[7.46]
<i>Κόστος λειτουργίας και συντήρησης ($K_{O\&M}$)</i>	1% $C_{capital}$	[7.42]

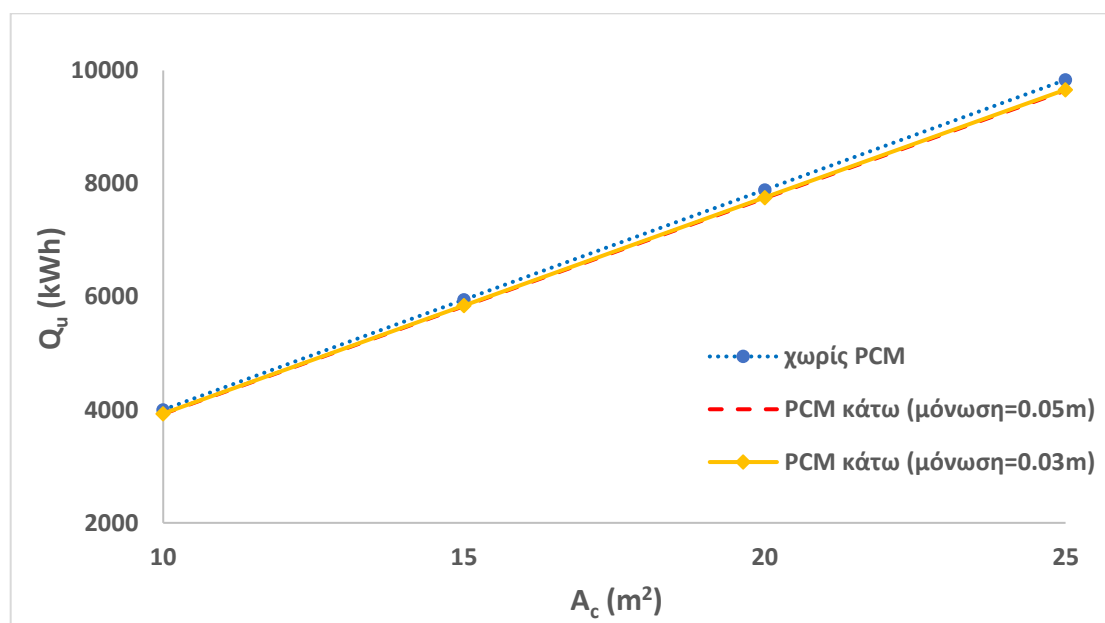
7.4.5 Προσομοίωση και αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα. Η εξεταζόμενη παράμετρος είναι η συλλεκτική επιφάνεια και μελετάται από 10 m² έως 25 m². Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα εξεταζόμενα κτήρια είναι αυτά χωρίς στρώμα PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης και δύο κτήρια με την προσθήκη ενός στρώματος PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Τα δύο τελευταία κτήρια με το στρώμα PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης έχουν μόνωση δαπέδου πάχους 5 cm και 3 cm. Η εξέταση των δύο διαφορετικών περιπτώσεων πάχους μόνωσης βασίζεται στην γενική αρχή σχεδιασμού με PCM που δείχνει ότι η εφαρμογή του PCM στο περίβλημα του κτηρίου είναι σε θέση να μειώσει το πάχος της μόνωσης.

A) Ενεργειακή αξιολόγηση του συστήματος με FPC

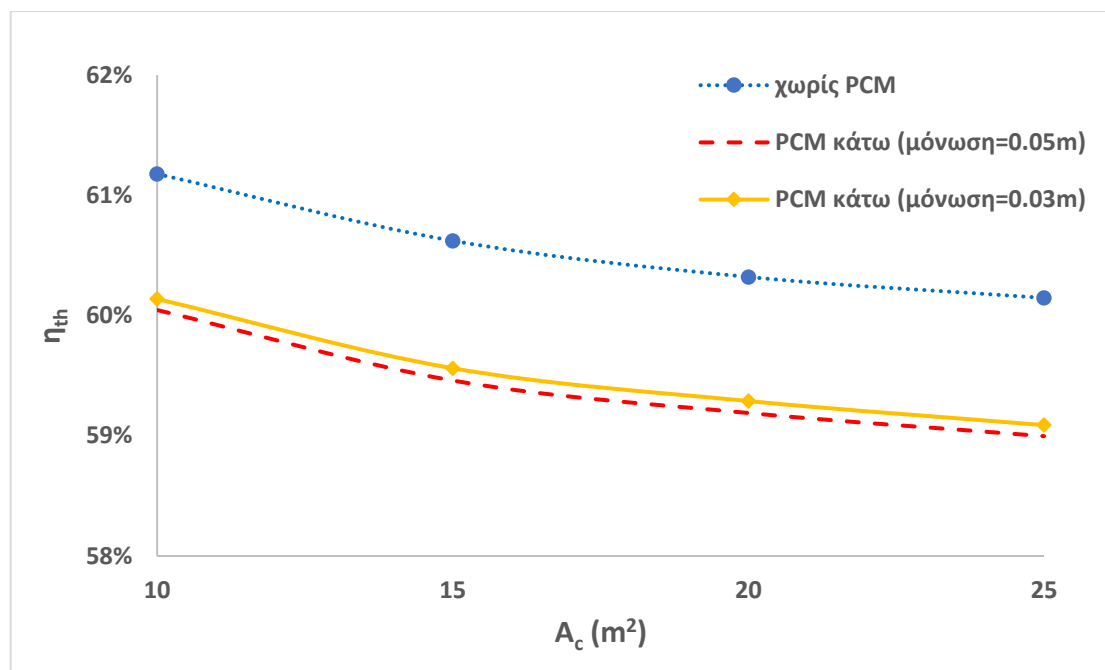
Αυτή η ενότητα δίνει τα αποτελέσματα για το σύστημα με τον επίπεδο συλλέκτη (FPC). Η βασική παράμετρος αυτής της ανάλυσης είναι η συλλεκτική επιφάνεια του FPC. Η παραγωγή ωφέλιμης αποδιδόμενης ισχύος για διάφορες εξεταζόμενες συλλεκτικές

επιφάνειες και διαφορετικά περιβλήματα κτηρίων (με και χωρίς PCM) απεικονίζεται στο διάγραμμα 7.4.7α. Το διάγραμμα 7.4.7α δείχνει ότι η παραγωγή ωφέλιμης αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη έχει αυξημένο ρυθμό. Επιπλέον, οι καμπύλες είναι περίπου γραμμικές και αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την κατά προσέγγιση σταθερή θερμική απόδοση του FPC κατά περίπου 60%, όπως δείχνει το διάγραμμα 7.4.7β. Επιπλέον, οι περιπτώσεις με το PCM έχουν λίγο χαμηλότερη θερμική παραγωγή με μείωση του 1.5 ~ 2.0% και αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τη χαμηλότερη θερμική απόδοση του ηλιακού συλλέκτη, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.4.7β. Μπορούμε να πούμε ότι η χρησιμότητα του PCM είναι ότι μπορεί να κρατήσει ζεστό το ενδοδαπέδιο σύστημα και, έτσι και το κτήριο, για περισσότερο χρόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αντλία θερμότητας να λειτουργεί λιγότερες ώρες και αυτό σημαίνει ότι το δοχείο αποθήκευσης αποθηκεύει χρήσιμη θερμότητα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς PCM. Έτσι, το αποτέλεσμα είναι ότι τα επίπεδα θερμοκρασίας είναι υψηλότερα στις περιπτώσεις με το PCM. Αυτός είναι ο λόγος για τη χαμηλότερη παραγωγή ωφέλιμης θερμότητας στις περιπτώσεις με την εφαρμογή PCM. Είναι επίσης σημαντικό να ειπωθεί ότι οι δύο περιπτώσεις με PCM (με μόνωση 5 cm και 3 cm) έχουν περίπου τα ίδια αποτελέσματα για την παραγωγή ωφέλιμης θερμότητας στον ηλιακό συλλέκτη.



(α)

Διάγραμμα 7.4.7: α) Ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με FPC.



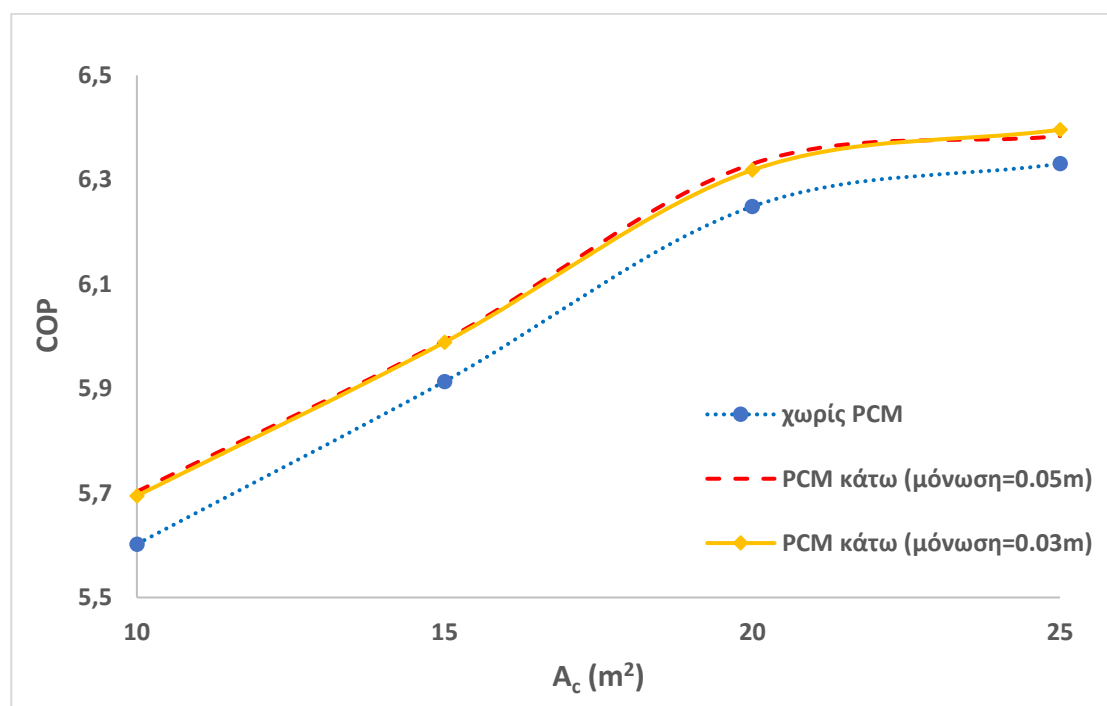
(β)

Διάγραμμα 7.4.7: β) Βαθμός απόδοσης επίπεδου συλλέκτη για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με FPC.

Επιπροσθέτως, το διάγραμμα 7.4.7β δείχνει ότι για μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες αυξάνεται η θερμοκρασία μέσα στο δοχείο αποθήκευσης και αυτό το αποτέλεσμα οδηγεί σε χαμηλότερη θερμική απόδοση συλλέκτη. Ωστόσο, από το διάγραμμα 7.4.8α είναι σαφές ότι τα υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας αυξάνουν τον COP της αντλίας θερμότητας. Ο COP κυμαίνεται από 5.6 έως 6.4. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο COP έχει αυξητικές τάσεις για συλλεκτικές επιφάνειες έως 20 m². Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες δεν έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος. Οι σχετικά υψηλές τιμές του COP δικαιολογούνται από την υψηλή θερμοκρασία της εισροής θερμότητας λόγω της ύπαρξης του ηλιακού συλλέκτη. Είναι σαφές ότι η χρήση του PCM οδηγεί σε υψηλότερο COP περίπου 0.1. Αυτό είναι ένα σημαντικό αποτέλεσμα που δείχνει ότι το σύστημα με PCM είναι ωφέλιμο. Επιπλέον, το διάγραμμα 7.4.8β δείχνει ότι η μικρή αύξηση του COP είναι σε θέση να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (P_{grid}) με υψηλό ρυθμό. Η ικανότητα του PCM να αποθηκεύει υψηλές ποσότητες θερμικής ενέργειας κάνει το σύστημα να λειτουργεί λιγότερες ώρες την ημέρα. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα χωρίς PCM πρέπει να λειτουργεί περισσότερες ώρες την ημέρα και ειδικά τις ώρες μετά το ηλιοβασίλεμα όταν το νερό αποθήκευσης είναι σχετικά κρύο και ο COP

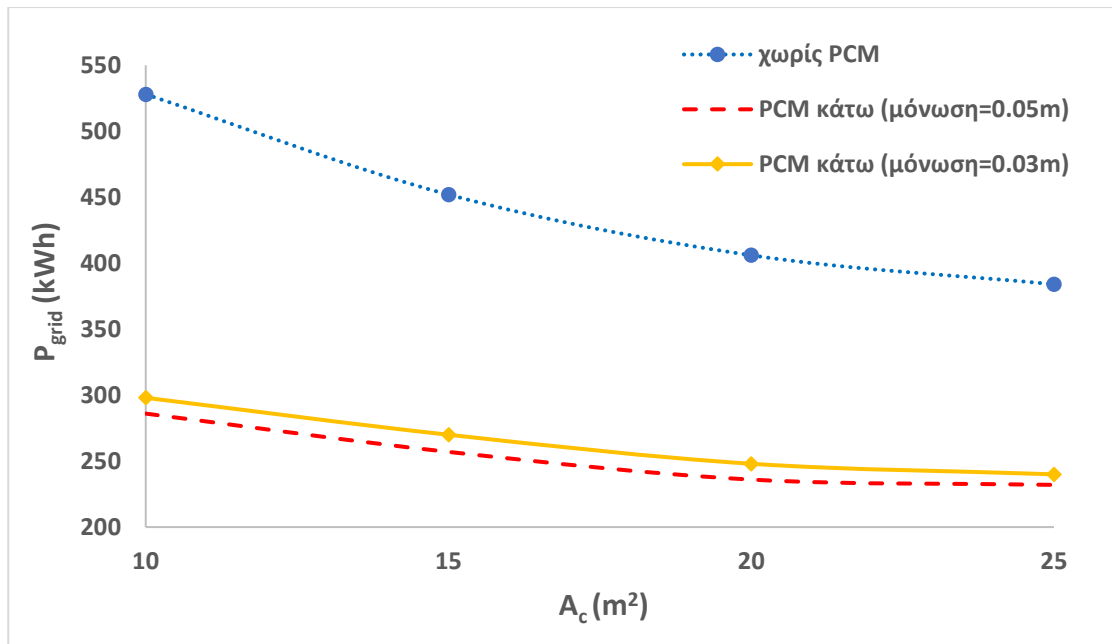
είναι χαμηλότερος. Για την περίπτωση με τον επίπεδο συλλέκτη FPC, η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας με το PCM κυμαίνεται γενικά μεταξύ 37% και 45%.

Η ηλιακή κάλυψη (f) είναι η τελευταία εξεταζόμενη παράμετρος και δίνεται στο διάγραμμα 7.4.8γ. Για συλλετικές επιφάνειες περίπου 20~25 m², διαπιστώθηκε ότι η ηλιακή κάλυψη έχει μέγιστη τιμή περίπου 84%. Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι η ηλιακή κάλυψη για το σύστημα με FPC δείχνει τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο λόγω της εισόδου θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία. Στην πράξη, αυτή η παράμετρος δείχνει τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με ένα σύστημα μόνο με αντλία θερμότητας αέρα περιβάλλοντος. Η ηλιακή κάλυψη είναι υψηλότερη για τις περιπτώσεις PCM με απόκλιση 0.5%. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι η χρήση του PCM οδηγεί σε πιο αποτελεσματική λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί εκ νέου ότι υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της λειτουργίας του συστήματος με PCM για λιγότερες ώρες την ημέρα σε σύγκριση με το συμβατικό ενδοδαπέδιο σύστημα.



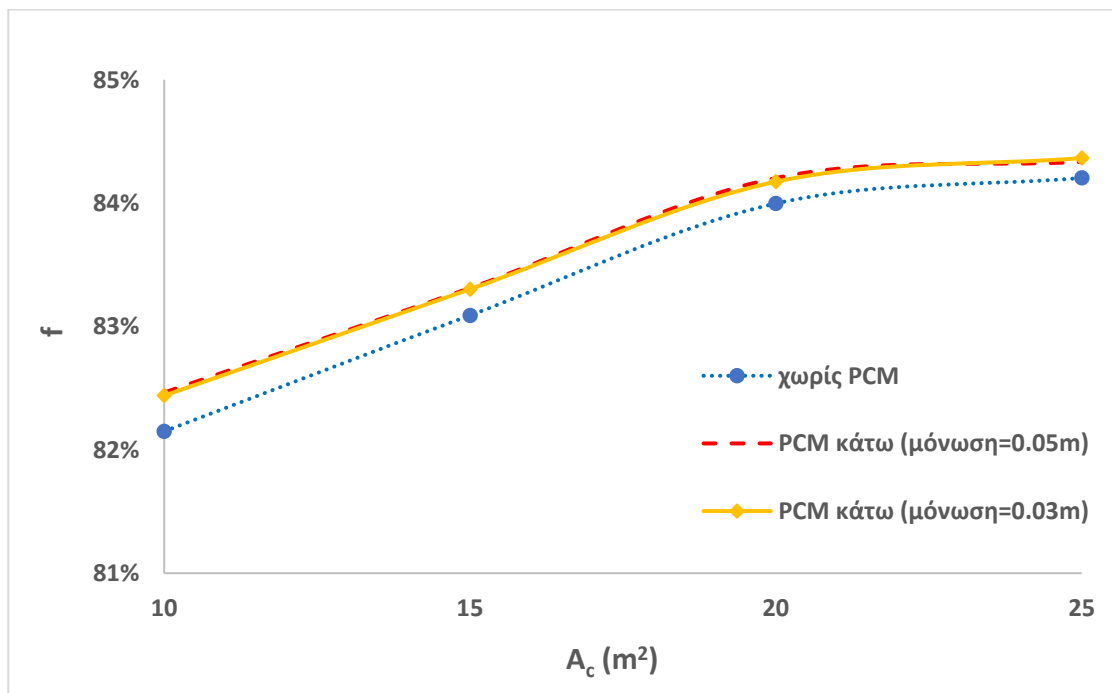
(α)

Διάγραμμα 7.4.8 : α) Συντελεστής απόδοσης αντλίας θερμότητας COP για διαφορετικές συλλετικές επιφάνειες του συστήματος με FPC.



(β)

Διάγραμμα 7.4.8 : β) Ηλεκτρική κατανάλωση P_{grid} για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με FPC.

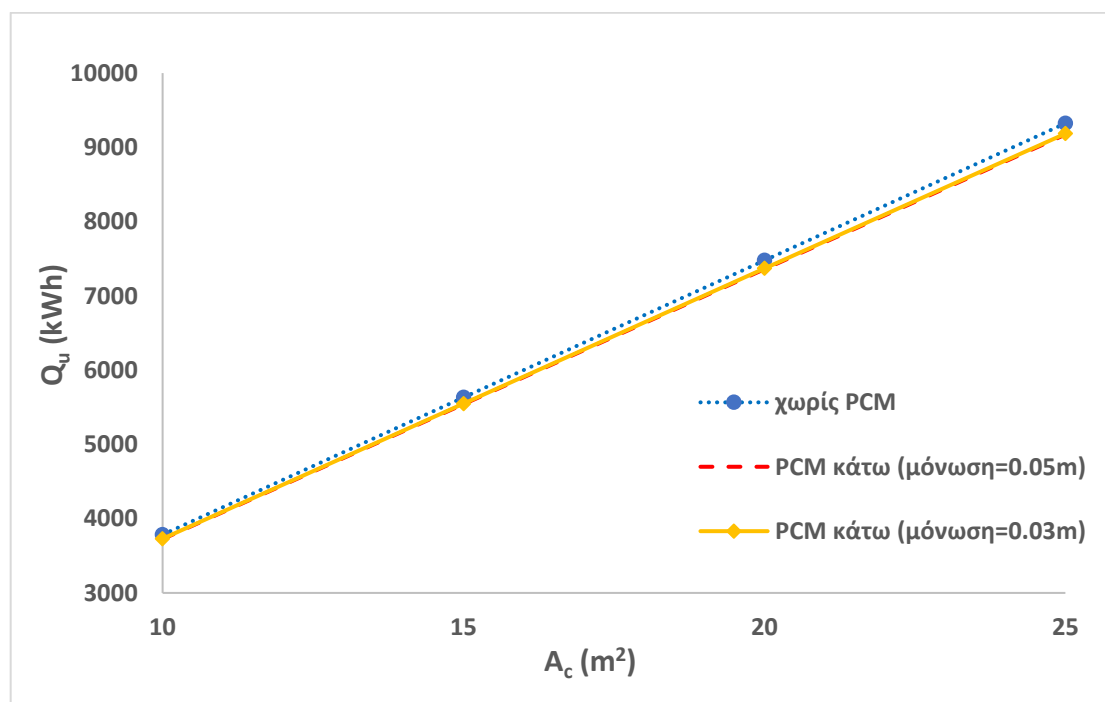


(γ)

Διάγραμμα 7.4.8 : γ) Ηλιακή κάλυψη f για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με FPC.

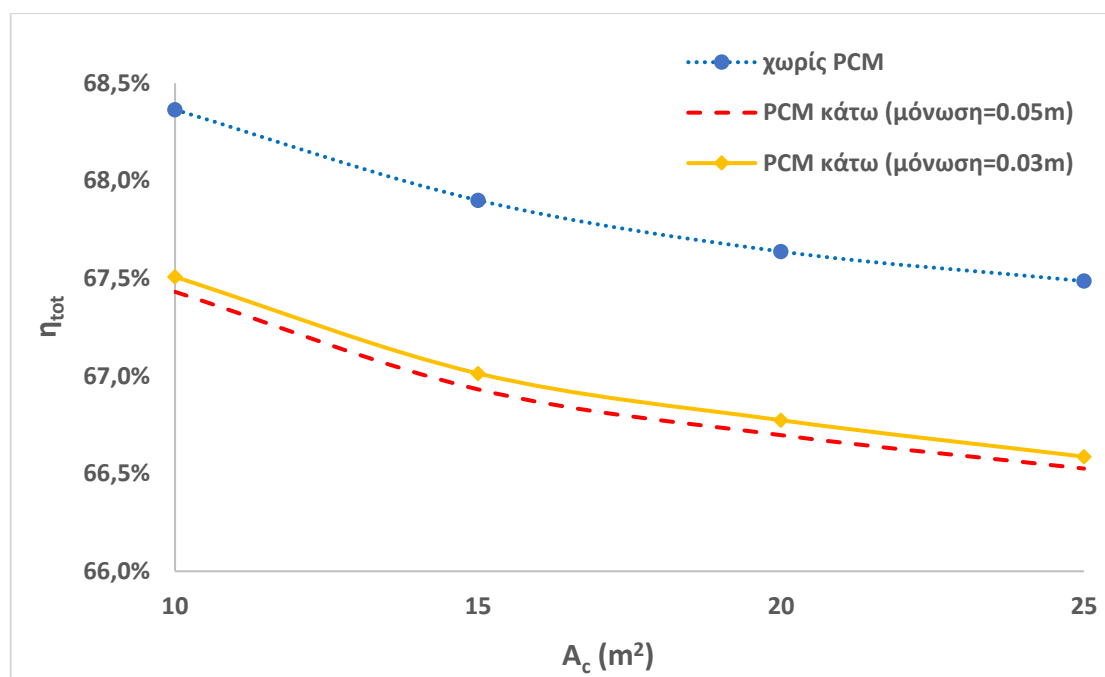
B) Ενεργειακή αξιολόγηση του συστήματος με PVT

Αυτή η ενότητα δίνει τα αποτελέσματα για το σύστημα με το θερμοφωτοβολταϊκό συλλέκτη (PVT). Το διάγραμμα 7.4.9α δίνει την παραγωγή ωφέλιμης αποδιδόμενης ισχύος του συλλέκτη, η οποία έχει γραμμικό χαρακτήρα, όπως στο διάγραμμα 7.4.7α. Οι λόγοι για αυτό το αποτέλεσμα έχουν εξηγηθεί στην προηγούμενη παράγραφο και δεν υπάρχει λόγος να επαναληφθούν. Το διάγραμμα 7.4.9β απεικονίζει τη συνολική απόδοση του συλλέκτη που λαμβάνει τιμές περίπου 68.5% για το σύστημα χωρίς PCM και περίπου 67.5% για το σύστημα με το στρώμα PCM. Η συνολική απόδοση του PVT περιλαμβάνει επίσης την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και για το λόγο αυτό η συνολική απόδοση είναι υψηλότερη από τη θερμική απόδοση του συστήματος FPC (βλ. διάγραμμα 7.4.7β). Επιπλέον, η μείωση της συνολικής απόδοσης είναι μικρή με την αύξηση της συλλεκτικής επιφάνειας και αυτό εξηγείται ότι για μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες αυξάνεται η θερμοκρασία μέσα στο δοχείο αποθήκευσης και αυτό το αποτέλεσμα οδηγεί σε χαμηλότερη θερμική απόδοση συλλέκτη.



(α)

Διάγραμμα 7.4.9: Για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με PVT: α) Ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη.

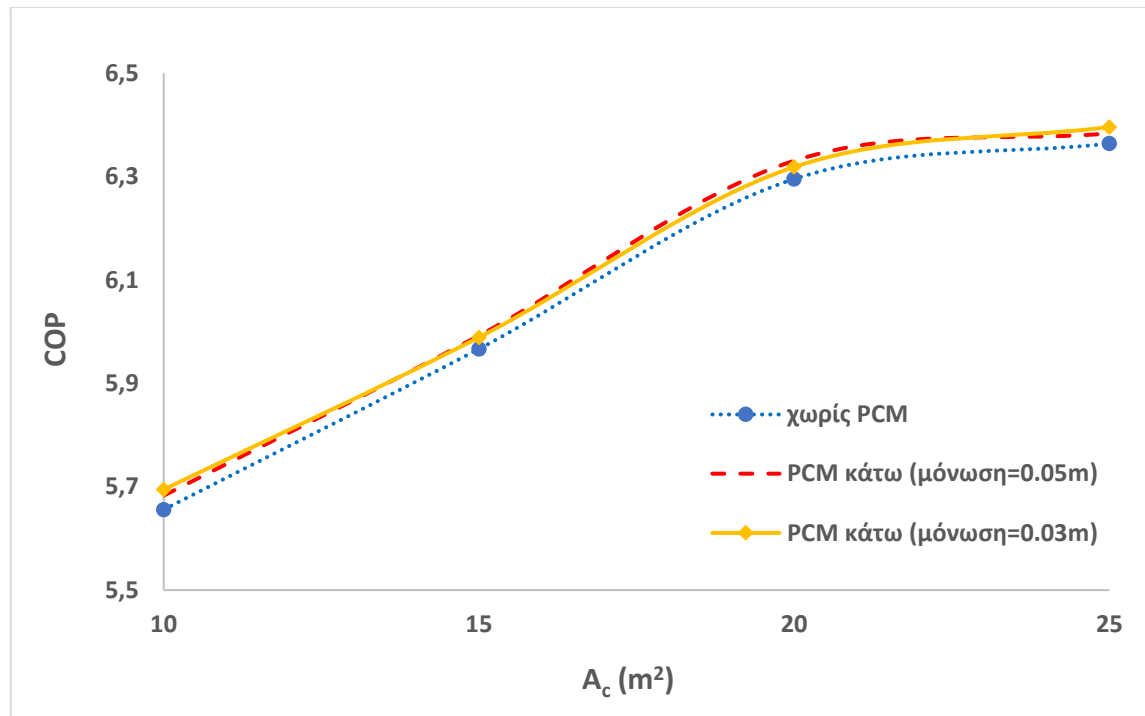


(β)

Διάγραμμα 7.4.9: Για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με PVT: β) βαθμός απόδοσης θερμο-φωτοβολταϊκού συλλέκτη.

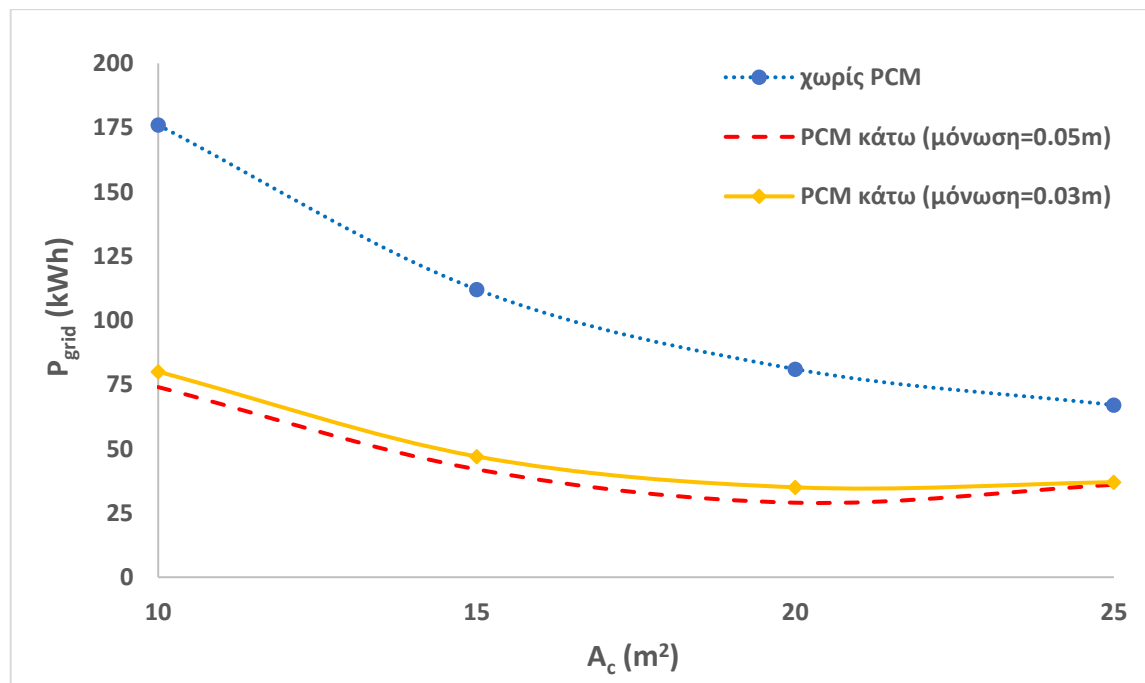
Το διάγραμμα 7.4.10α δίνει τον COP, το οποίο έχει παρόμοιες τάσεις όπως στο διάγραμμα 7.4.8α επειδή η εξεταζόμενη αντλία θερμότητας είναι η ίδια. Και πάλι, μετά την συλλεκτική επιφάνεια των 20 m² η καμπύλη του COP τείνει να γίνει οριζόντια. Γενικά, σε αυτές τις περιπτώσεις, ο COP κυμαίνεται μεταξύ 5.6 και 6.4. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου δίνεται από το διάγραμμα 7.4.10β. Παρατηρείται ότι οι τιμές που λαμβάνονται με τη χρήση του PCM είναι χαμηλότερες από τις περιπτώσεις χωρίς το PCM. Η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 46% και 65%, οι οποίες είναι ικανοποιητικές. Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερη στις μικρότερες συλλεκτικές επιφάνειες.

Η ηλεκτρική ηλιακή κάλυψη είναι η τελευταία εξεταζόμενη παράμετρος η οποία λαμβάνει υψηλότερες τιμές για τις περιπτώσεις με το PCM. Η περίπτωση με μόνωση 5cm έχει την υψηλότερη ηλιακή κάλυψη. Η μέγιστη ηλιακή κάλυψη είναι περίπου 88% για την συλλεκτική επιφάνεια των 20 m². Γενικά, η χρήση PCM οδηγεί σε 12% υψηλότερη ηλιακή κάλυψη.



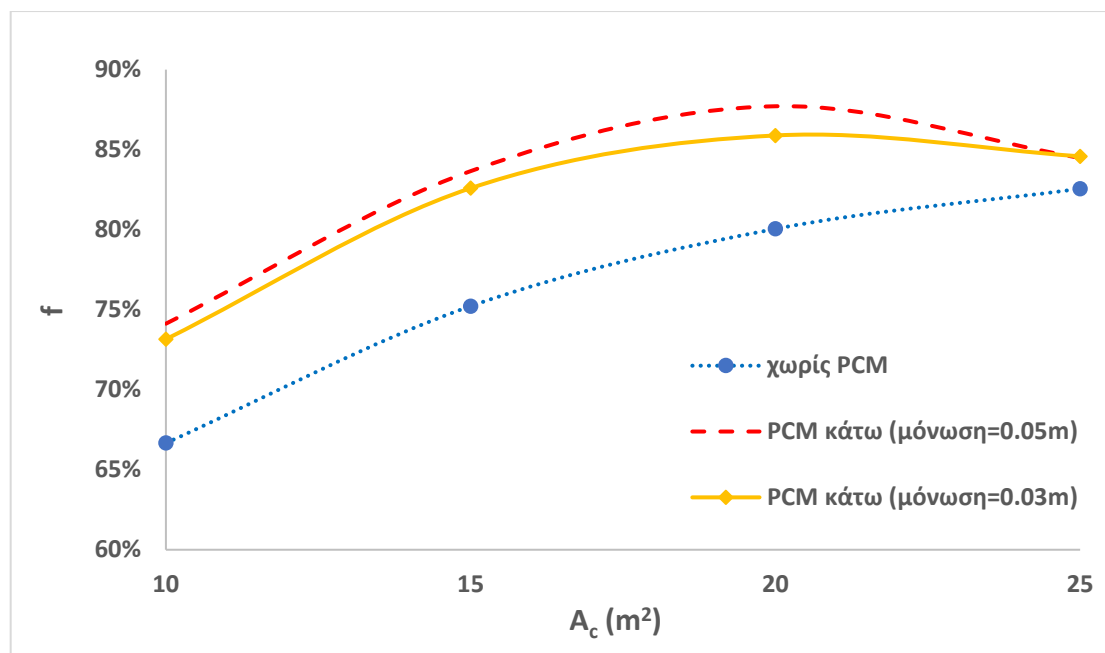
(α)

Διάγραμμα 7.4.10: α) Συντελεστής απόδοσης αντλίας θερμότητας COP για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με PVT.



(β)

Διάγραμμα 7.4.10: β) Ηλεκτρική κατανάλωση P_{grid} .



(γ)

Διάγραμμα 7.4.10: γ) Ηλεκτρική ηλιακή κάλυψη f για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με PVT.

Τέλος, είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι υπάρχει χαμηλότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο σε σύγκριση με το σύστημα με τον επίπεδο συλλέκτη (FPC). Για παράδειγμα, 20 m² PVT με PCM και μόνωση 5 cm απαιτούν 29 kWh από το δίκτυο ενώ 20 m² FPC με PCM και μόνωση 5 cm απαιτούν 236 kWh από το δίκτυο. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σημαντικό για την περιβαλλοντική αξιολόγηση των συστημάτων, επειδή η χρήση του PVT είναι σε θέση να μειώσει την ηλεκτρική κατανάλωση του δικτύου κατά 88% περίπου σε σχέση με το σύστημα FPC. Το γεγονός αυτό καθιστά τη χρήση των PVT ως κατάλληλων ηλιακών τεχνολογιών για τη σύνδεση με αντλίες θερμότητας.

Γ) Ενεργειακή αξιολόγηση του συστήματος με FPC and PV

Αυτή η ενότητα δίνει τα αποτελέσματα για το σύστημα με τον επίπεδο συλλέκτη και το φωτοβολταϊκό (FPC-PV) προκειμένου να τροφοδοτηθεί η αντλία θερμότητας τόσο με θερμότητα όσο και με ηλεκτρική ενέργεια.

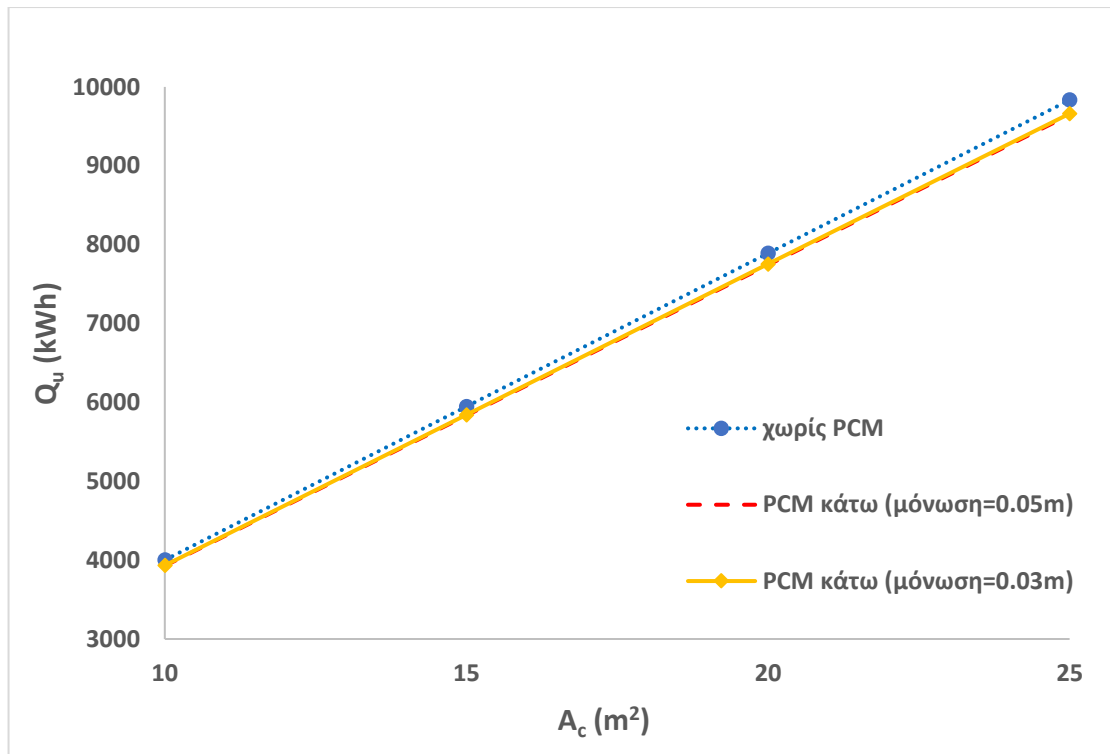
Η επιφάνεια του PV ορίζεται σε 10 m² και η συλλεκτική επιφάνεια του FPC δίνεται στον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων. Το διάγραμμα 7.4.11α δείχνει την παραγωγή της

ωφέλιμης αποδιδόμενης ισχύος, η οποία έχει γραμμικό χαρακτήρα, όπως στις προηγούμενες ενότητες (βλ. διαγράμματα 7.4.7α και 7.4.9α). Ο COP έχει επίσης παρόμοιες τάσεις όπως στα διαγράμματα 7.4.8α και 7.4.10α. Επομένως, αυτές οι παράμετροι δεν έχουν κάτι ξεχωριστό για να υποδείξουν την απόδοση του συστήματος με το FPC και το PV ξεχωριστά.

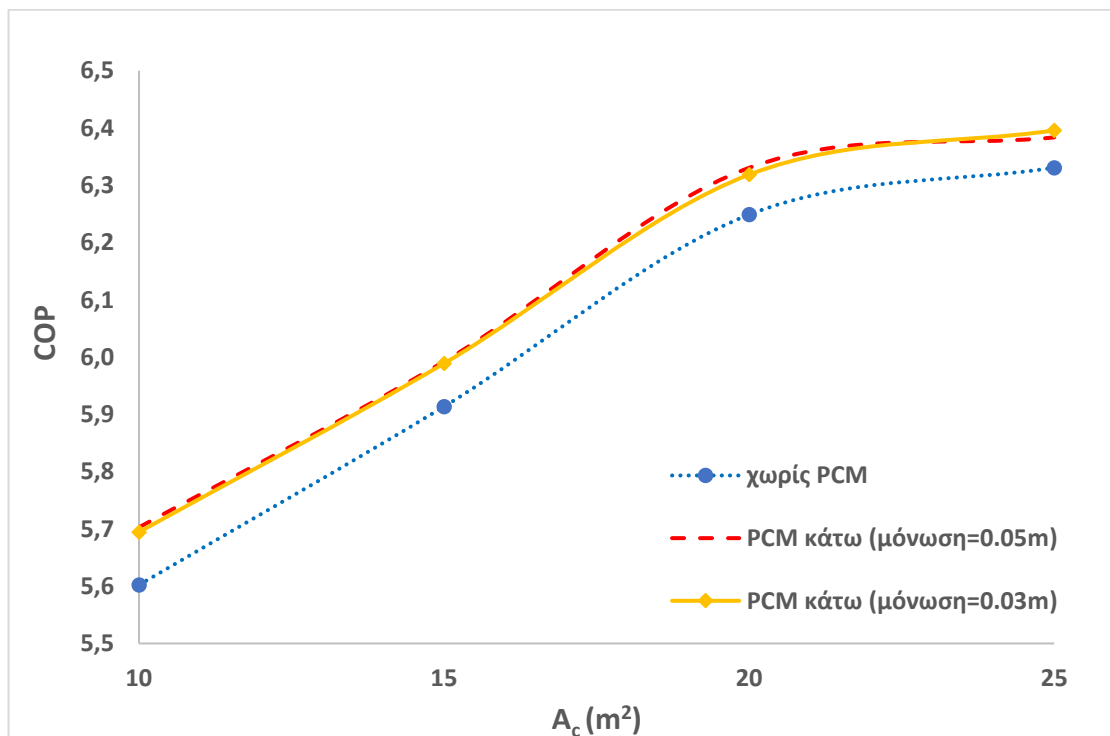
Το διάγραμμα 7.4.12α δίνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας η οποία μπορεί να μειωθεί μεταξύ 41% και 50% με τη χρήση PCM. Όταν η συλλεκτική επιφάνεια του FPC είναι 20 m² και του PV είναι 10 m², η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι 54 kWh για το σύστημα με PCM και μόνωση 5 cm, 60 kWh για το σύστημα με PCM και μόνωση 3 cm, ενώ είναι 104 kWh για το σύστημα χωρίς PCM. Αυτές οι τιμές είναι ενδιάμεσες τιμές σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των άλλων συστημάτων σχετικά με την αντίστοιχη περίπτωση με συλλεκτική επιφάνεια των 20 m².

Επιπλέον, μια ενδιαφέρουσα παράμετρος σε αυτή τη μελέτη είναι η ηλιακή κάλυψη, η οποία λαμβάνει τιμές μέχρι 77% (βλ. διάγραμμα 7.4.12β). Η ηλιακή κάλυψη είναι περίπου η ίδια και για τα δύο συστήματα με μόνωση 3 cm και 5 cm όταν η συλλεκτική επιφάνεια είναι 25 m². Ο λόγος για αυτό το αποτέλεσμα βασίζεται στην υψηλή εισροή θερμότητας στο σύστημα η οποία πρακτικά οδηγεί σε πολύ υψηλή ηλιακή κάλυψη.

Η ηλιακή κάλυψη, σε κάθε περίπτωση, ορίζεται σύμφωνα με τη ζήτηση θέρμανσης κάθε συστήματος. Υπάρχουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ της ζήτησης θέρμανσης με τα 3 cm και τα 5 cm πάχους μόνωσης και έτσι αυτές προκαλούν μερικές εξαιρετικά μικρές αποκλίσεις στην ηλιακή κάλυψη. Οι τιμές της ηλιακής κάλυψης είναι χαμηλότερες από εκείνες των προηγούμενων συστημάτων και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το συγκεκριμένο σύστημα δεν είναι τόσο βιώσιμο.

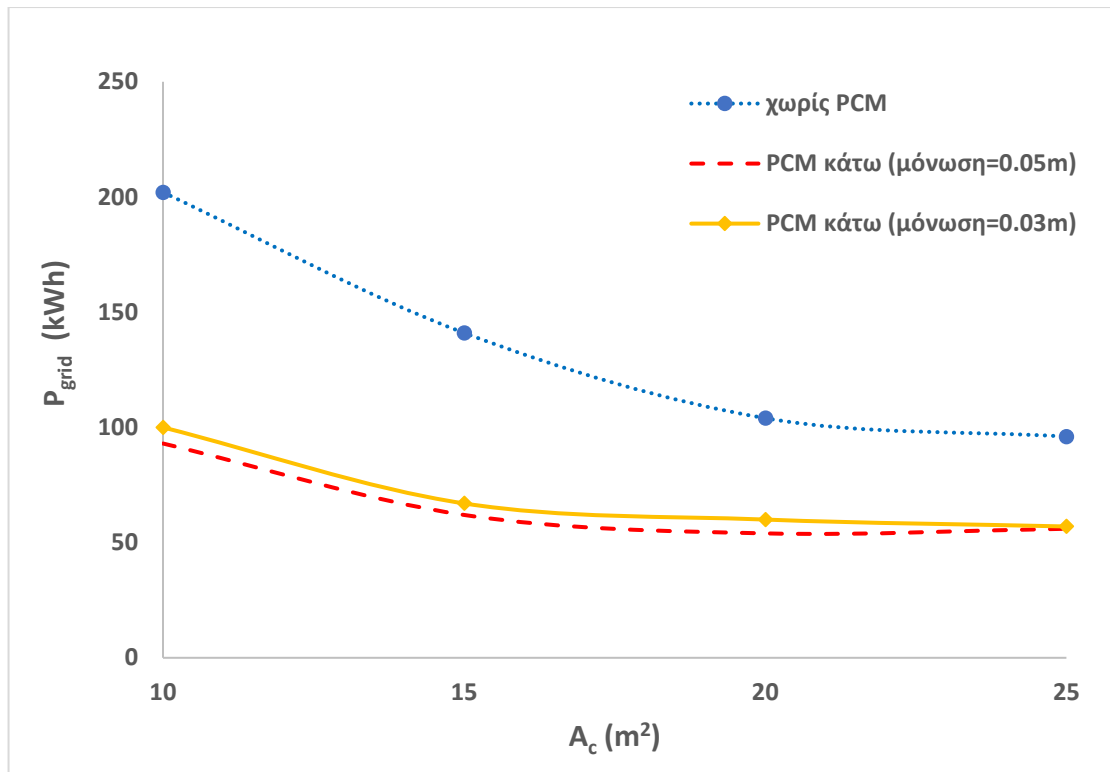


(α)

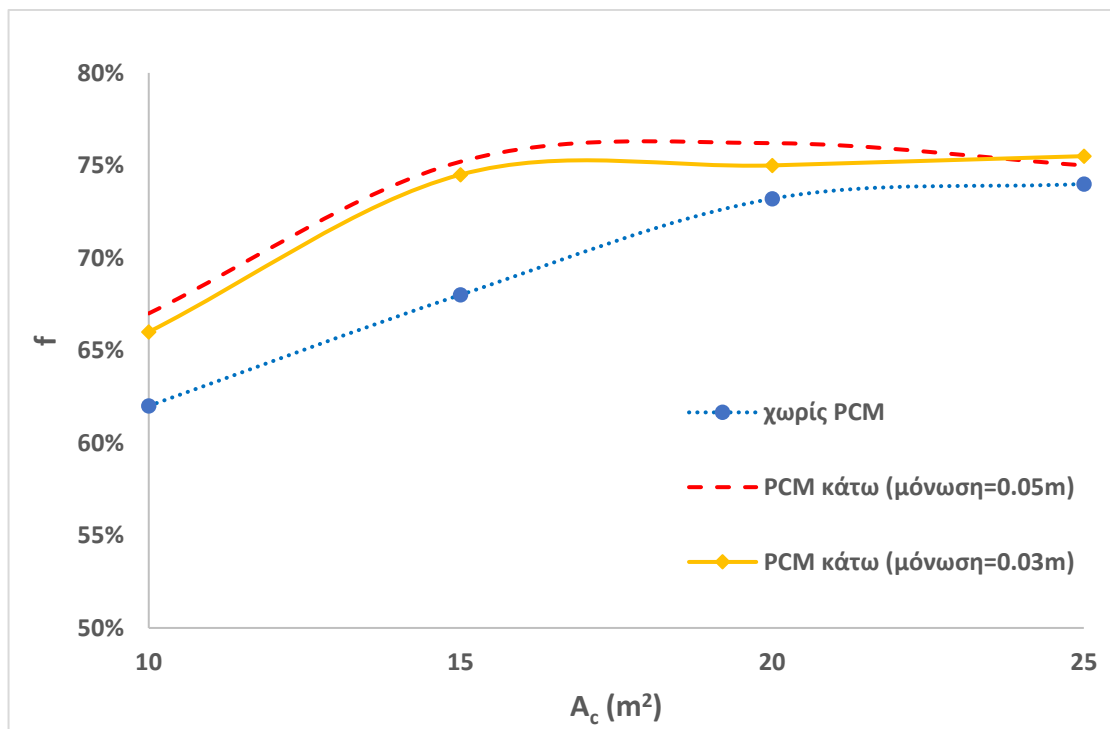


(β)

Διάγραμμα 7.4.11: Για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με FPC-PV: α) Ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη, β) Συντελεστής απόδοσης αντλίας COP.



(α)



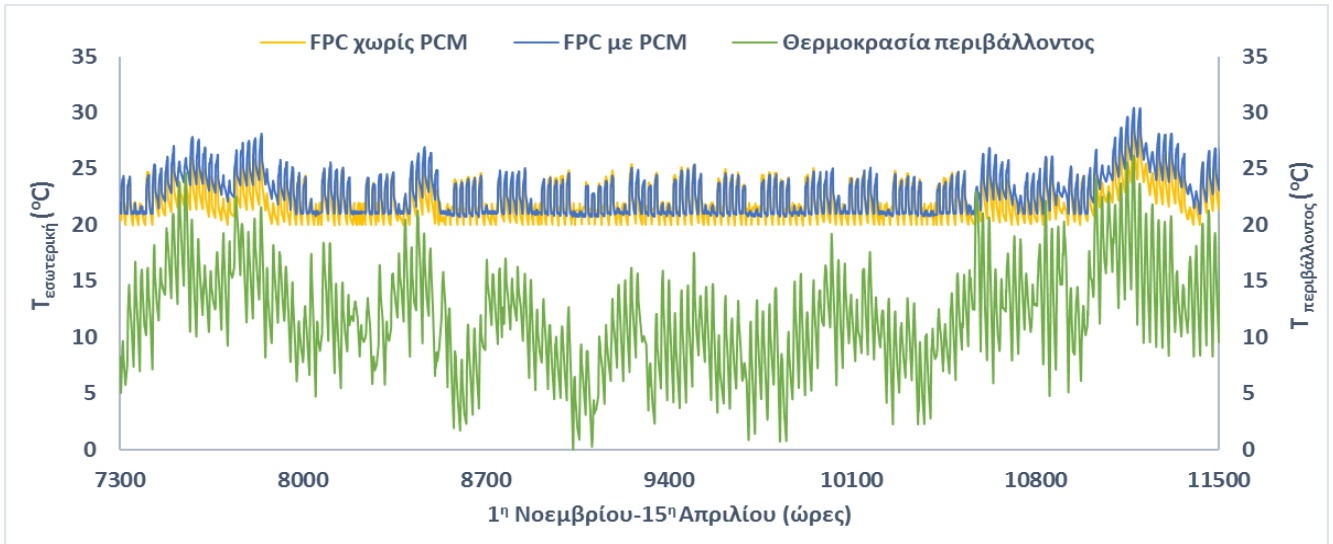
(β)

Διάγραμμα 7.4.12: Για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος με FPC-PV: (α) Ηλεκτρική κατανάλωση P_{grid} , (β) Ηλεκτρική ηλιακή κάλυψη f .

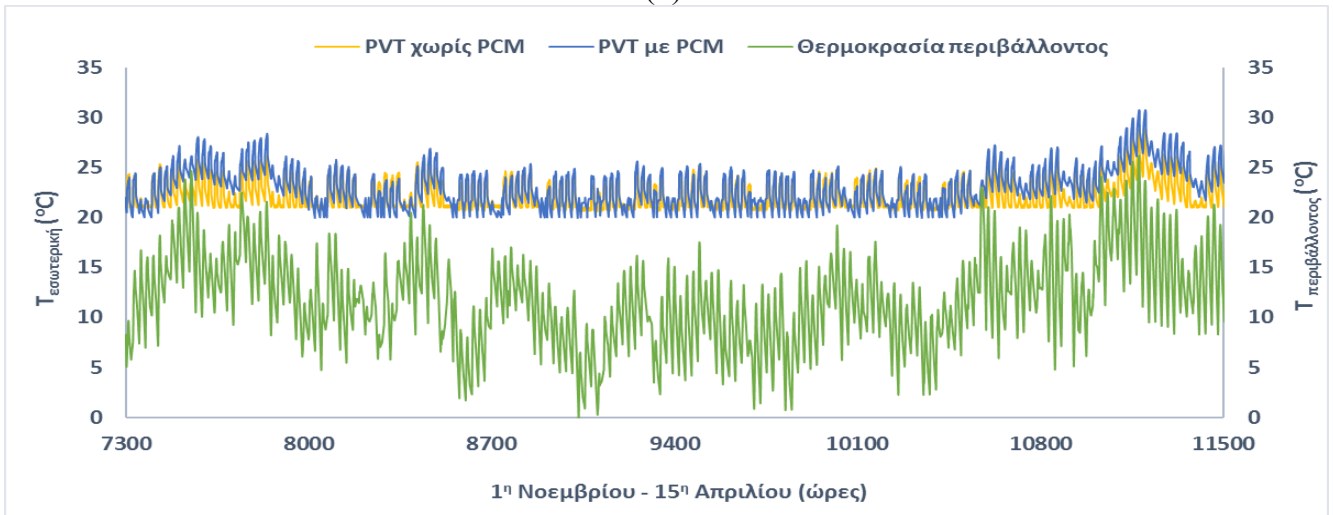
Δ) Διακύμανση εσωτερικών θερμοκρασιών

Είναι γνωστό ότι το χειμώνα, η θερμοκρασία μέσα στο κτήριο (γραφείο) πρέπει να είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κοντά στα όρια της θερμικής άνεσης. Το διάγραμμα 7.4.13 απεικονίζει την διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα (FPC, PVT, FPC-PV) με και χωρίς τη χρήση του στρώματος PCM στο δάπεδο (με πάχος μόνωσης 5 cm) σε σύγκριση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος για τη χειμερινή περίοδο στην Αθήνα που είναι από 1^η Νοεμβρίου έως 15^η Απριλίου. Ο μέσος όρος της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου, χρησιμοποιώντας και τα τρία εξεταζόμενα συστήματα, είναι 21.4°C. Τα αποτελέσματα είναι πιο ορατά στο διάγραμμα 7.4.14. Το διάγραμμα 7.4.14 απεικονίζει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα (FPC, PVT, FPC-PV) με και χωρίς τη χρήση στρώματος PCM (με μόνωση 5 cm) σε σύγκριση με τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας (21^η-26^η Δεκεμβρίου) της χειμερινής περιόδου στην Αθήνα. Αναλυτικότερα, οι καμπύλες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις καμπύλες συστημάτων χωρίς PCM και τις καμπύλες συστημάτων με PCM. Είναι σαφές ότι η χρήση στρώματος PCM, κάτω από το σύστημα της ενδοδαπέδιας θέρμανσης για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα, είναι σε θέση να δώσει περίπου 1°C υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία σε σύγκριση με τη μη χρήση PCM. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι τα εξεταζόμενα συστήματα με τη χρήση PCM δίνουν αποδεκτά προφίλ εσωτερικής θερμοκρασίας και έτσι τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικά κτήρια. Είναι αξιοσημείωτο ότι η εσωτερική θερμοκρασία είναι γενικά υψηλότερη από 21°C την εξεταζόμενη εβδομάδα και αυτό αποδεικνύει την υψηλή απόδοση των εξεταζόμενων συστημάτων θέρμανσης.

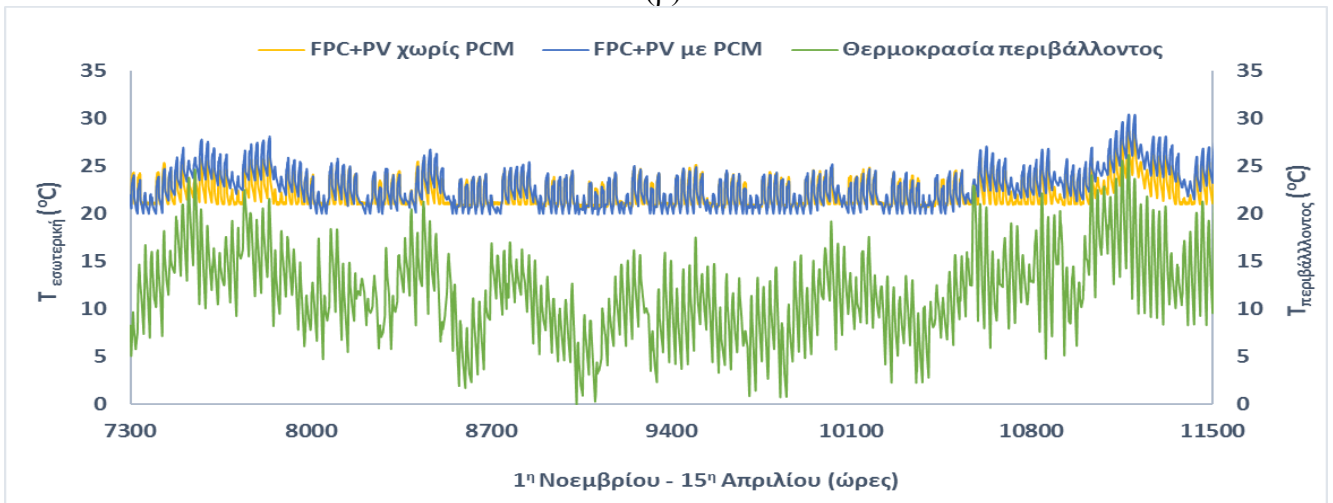
Το Διάγραμμα 7.4.15 δείχνει το επίπεδο θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοχείου αποθήκευσης για τα εξεταζόμενα συστήματα και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Είναι προφανές ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του δοχείου αποθήκευσης για τη δεδομένη περίοδο. Έτσι, μπορεί να ειπωθεί ότι η χρήση των ηλιακών συστημάτων δημιουργεί θερμότητα εισόδου υψηλότερης θερμοκρασίας στην αντλία θερμότητας και έτσι αυξάνεται η συνολική απόδοση της αντλίας θερμότητας.



(α)

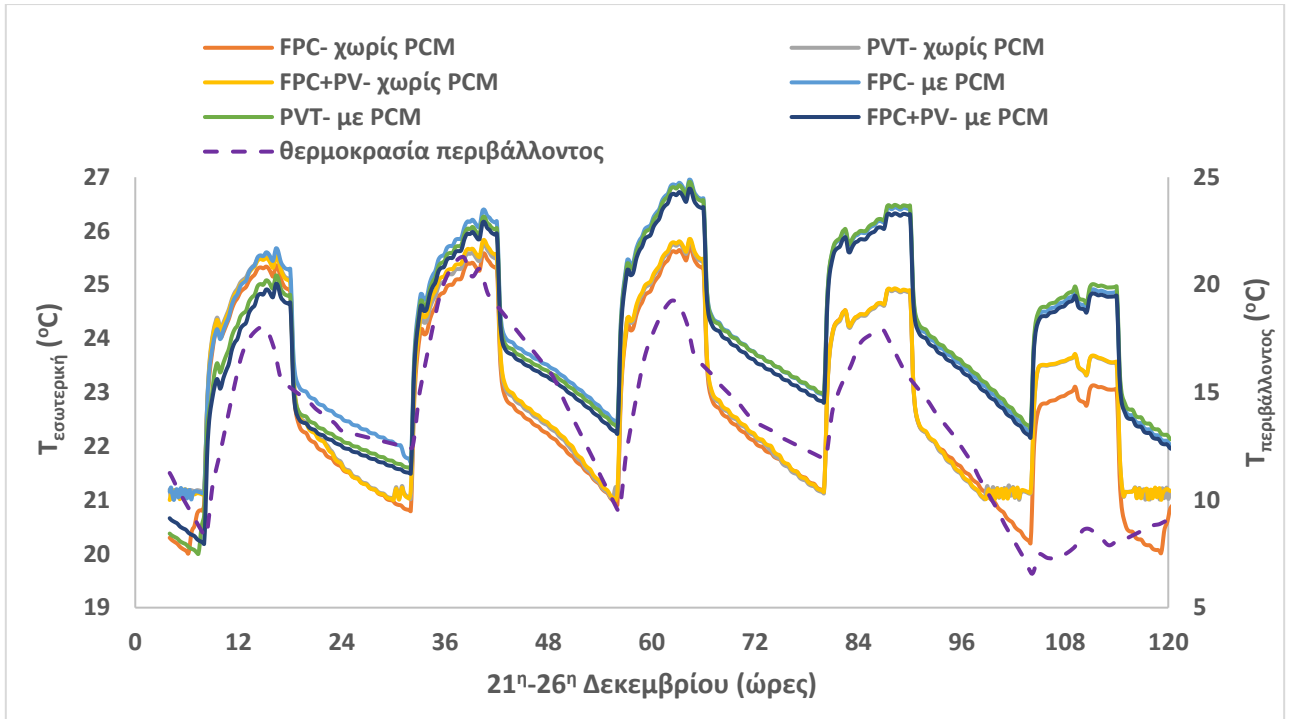


(β)

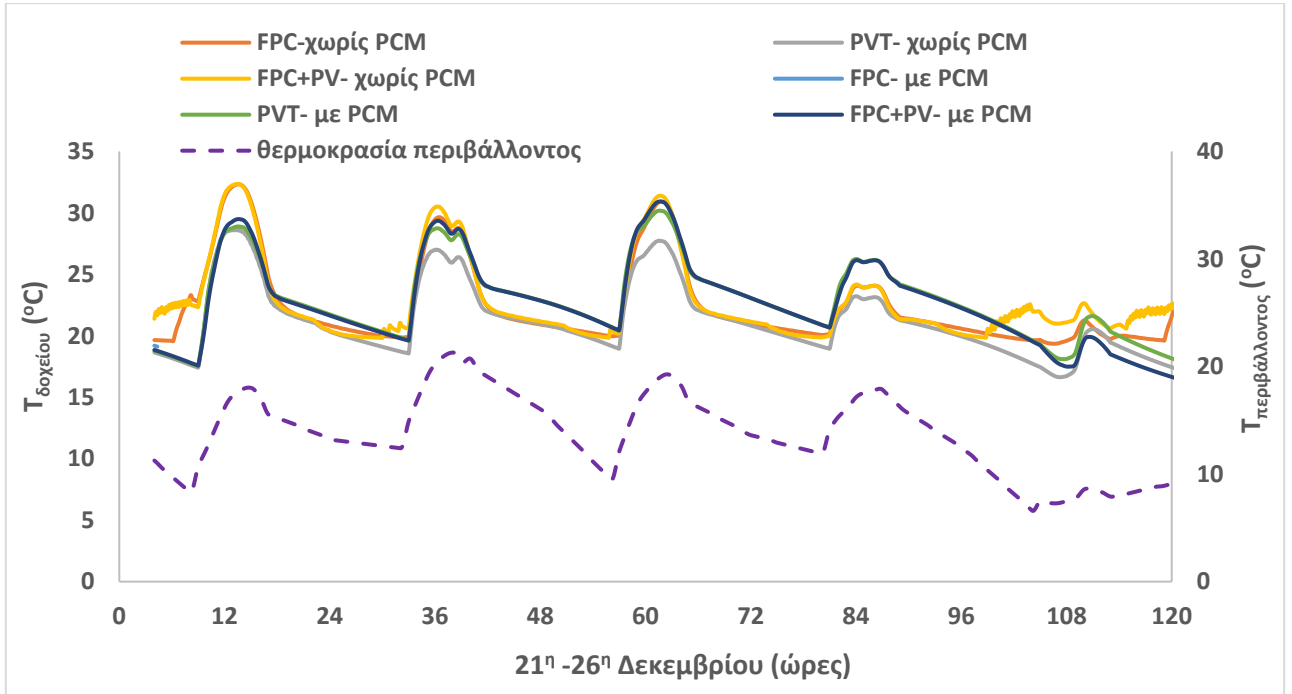


(γ)

Διάγραμμα 7.4.13: Διακυμάνσεις εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου στην Αθήνα α) με το σύστημα FPC, β) με το σύστημα PVT, γ) με το σύστημα FPC-PV.



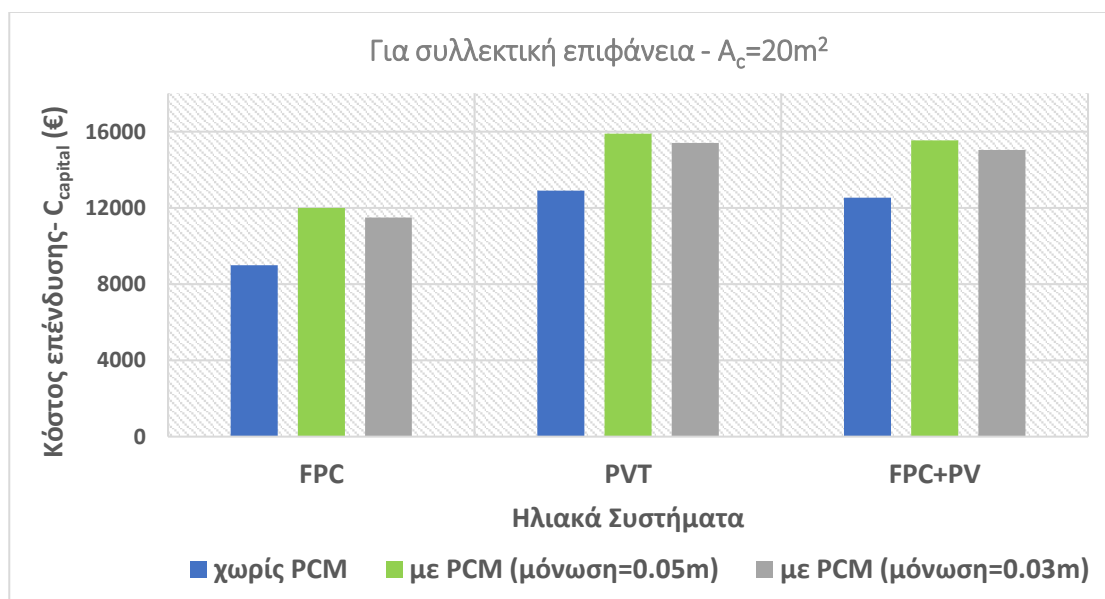
Διάγραμμα 7.4.14: Διακυμάνσεις εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας (21^η-26^η Δεκεμβρίου) του χειμώνα στην Αθήνα για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα.



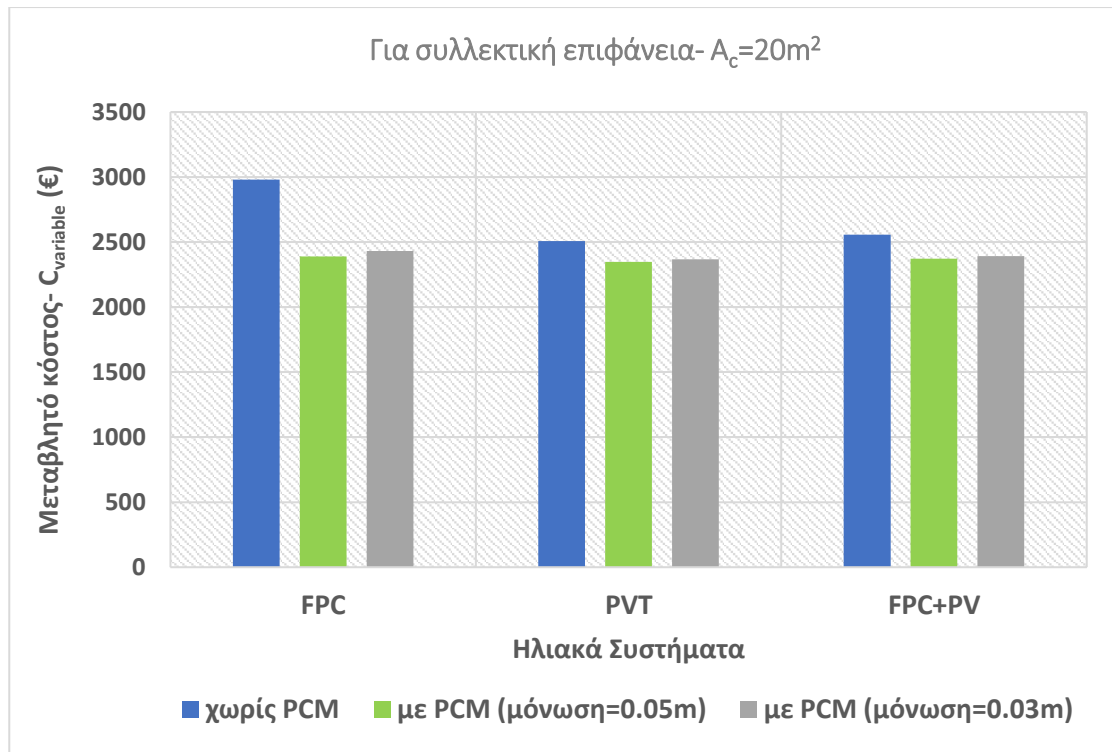
Διάγραμμα 7.4.15: Διακυμάνσεις θερμοκρασίας δοχείου αποθήκευσης κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας (21^η-26^η Δεκεμβρίου) του χειμώνα στην Αθήνα για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα.

E) Οικονομική αξιολόγηση των συστημάτων

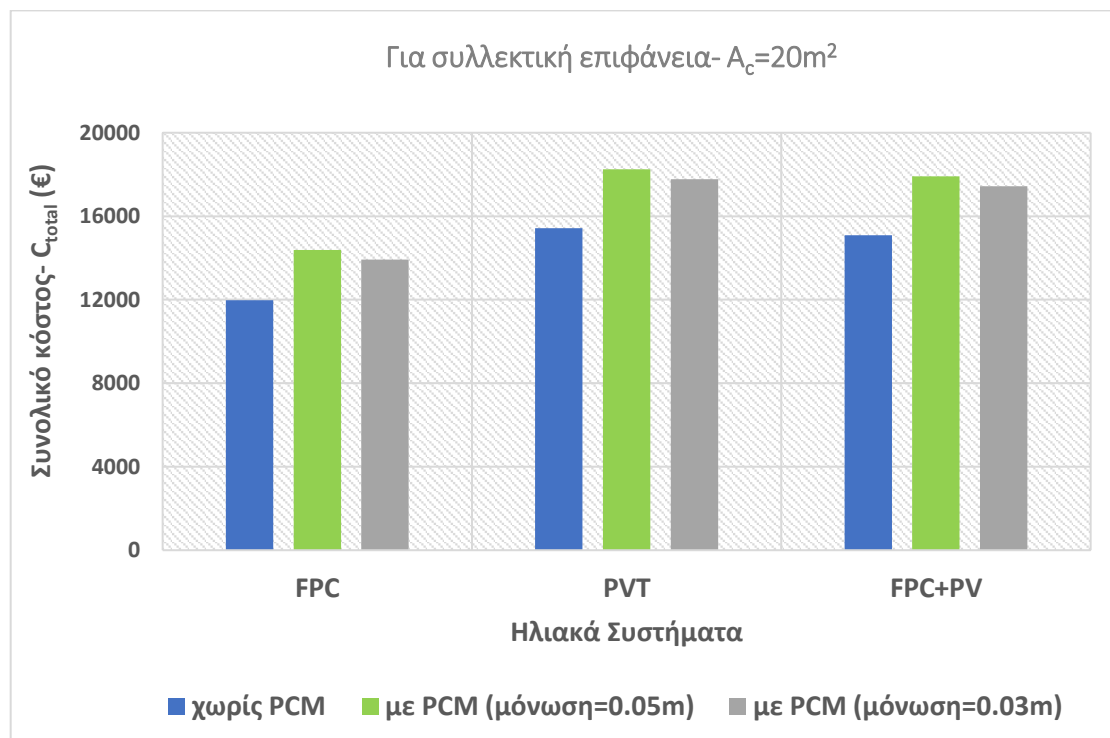
Σε αυτή την ενότητα δίνεται η οικονομική αξιολόγηση των συστημάτων. Το διάγραμμα 7.4.16 δείχνει τη σύγκριση του αρχικού κόστους επένδυσης (κεφαλαίου) ($C_{capital}$), του μεταβλητού κόστους ($C_{variable}$) και του συνολικού κόστους (C_{total}) όλων των εξεταζόμενων συστημάτων με και χωρίς PCM για την συλλεκτική επιφάνεια των 20 m². Είναι σαφές ότι το σύστημα PVT οδηγεί σε υψηλότερο κόστος κεφαλαίου ενώ το σύστημα FPC οδηγεί σε ελάχιστο. Επιπλέον, υπάρχει αύξηση κατά μέσο όρο 28% του κόστους κεφαλαίου όλων των συστημάτων λόγω της χρήσης του PCM. Το πάχος μόνωσης των 3 cm μαζί με τη χρήση του PCM δίνει μικρότερο κόστος κεφαλαίου κατά 3% σε σύγκριση με το πάχος μόνωσης των 5 cm. Το σύστημα PVT έχει το χαμηλότερο μεταβλητό κόστος λόγω του γεγονότος ότι καταναλώνει τη χαμηλότερη ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, με τη χρήση του PCM, υπάρχει μείωση του μεταβλητού κόστους από 18.5% έως 20% για το σύστημα FPC, μείωση κατά 5.6% έως 6.4% για το σύστημα PVT και μείωση κατά 6.5% έως 7.2% το σύστημα FPC-PV. Αυτή η μείωση είναι εύλογη, αφού η χρήση του PCM μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και στα τρία συστήματα. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει αύξηση του συνολικού κόστους (C_{total}) με τη χρήση PCM περίπου 16% έως 19.5% για το σύστημα FPC, 15% έως 18% για το σύστημα PVT και 16% έως 19% για το σύστημα FPC-PV. Επιπλέον, το διάγραμμα 7.4.17 δείχνει μια σύγκριση του συνολικού κόστους (C_{total}) όλων των συστημάτων με και χωρίς PCM για περισσότερες συλλεκτικές επιφάνειες. Και στις τρεις περιπτώσεις, το σύστημα FPC έχει το χαμηλότερο συνολικό κόστος.



(α)

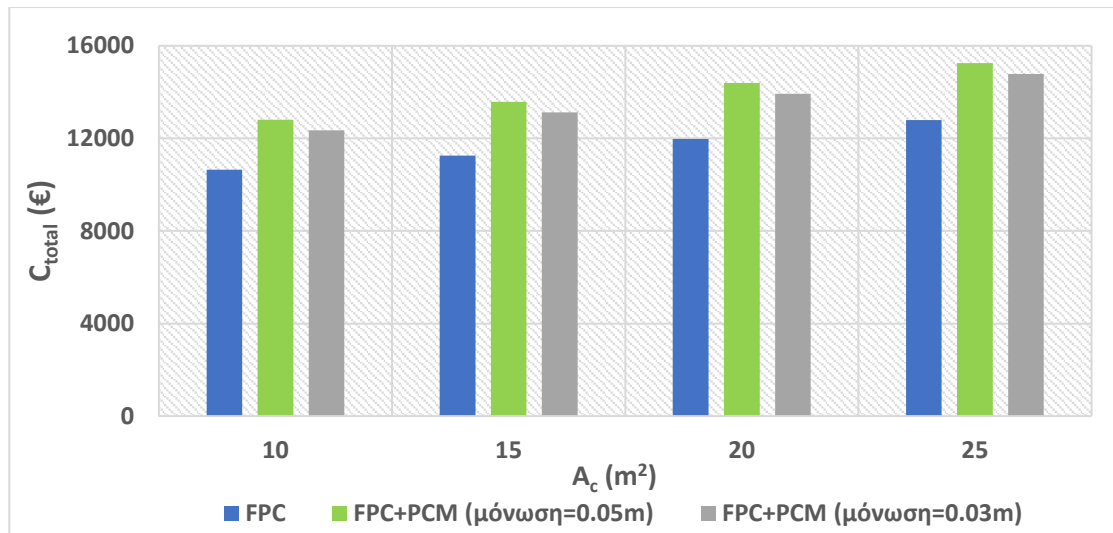


(β)

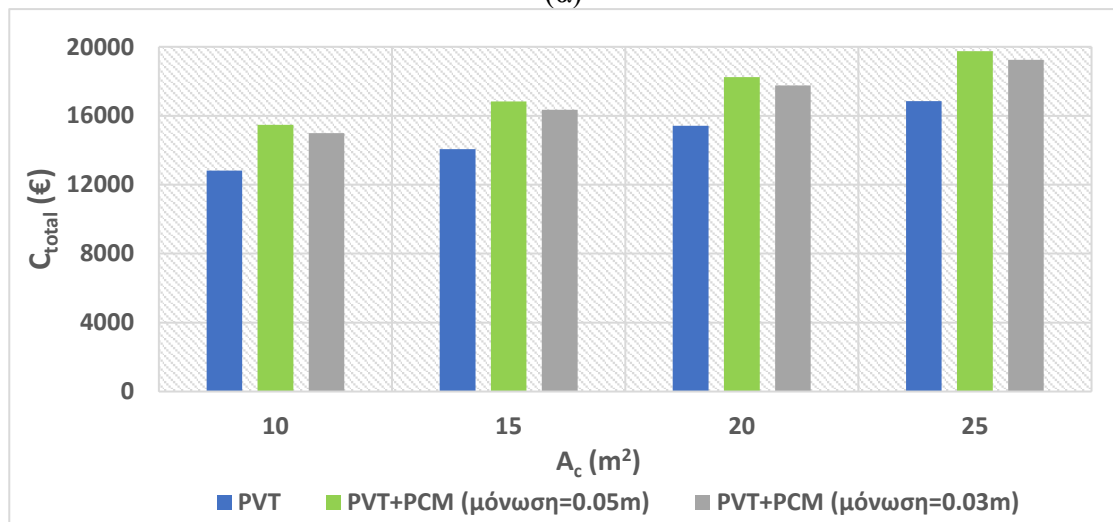


(γ)

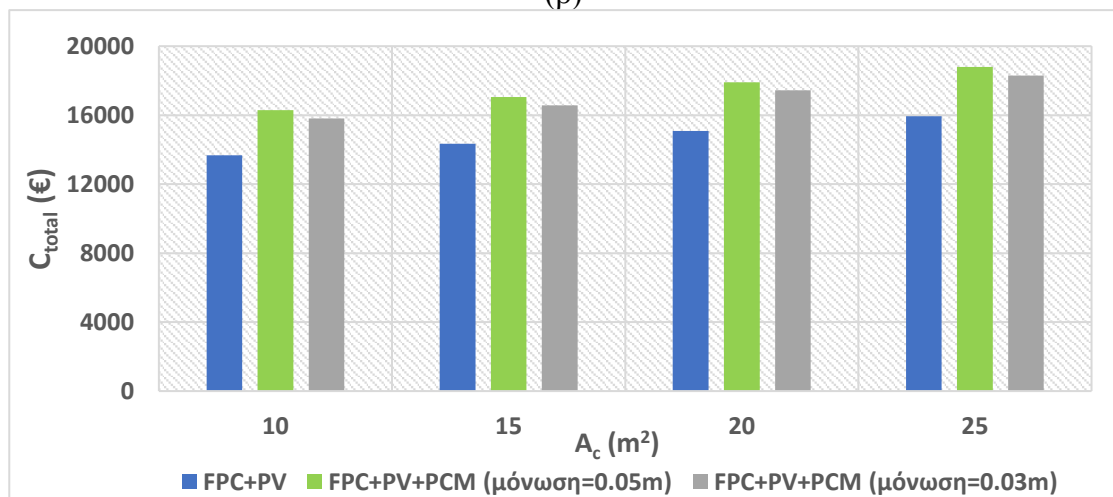
Διάγραμμα 7.4.16: Σύγκριση κόστους των εξεταζόμενων συστημάτων για συλλεκτική επιφάνεια $A_c=20 m^2$: α) Κόστος κεφαλαίου ($C_{capital}$), β) Μεταβλητό κόστος ($C_{variable}$), γ) Συνολικό κόστος (C_{total}).



(α)



(β)



(γ)

Διάγραμμα 7.4.17: Σύγκριση συνολικού κόστους (C_{total}) των συστημάτων: α) FPC, β) PVT, γ) FPC-PV.

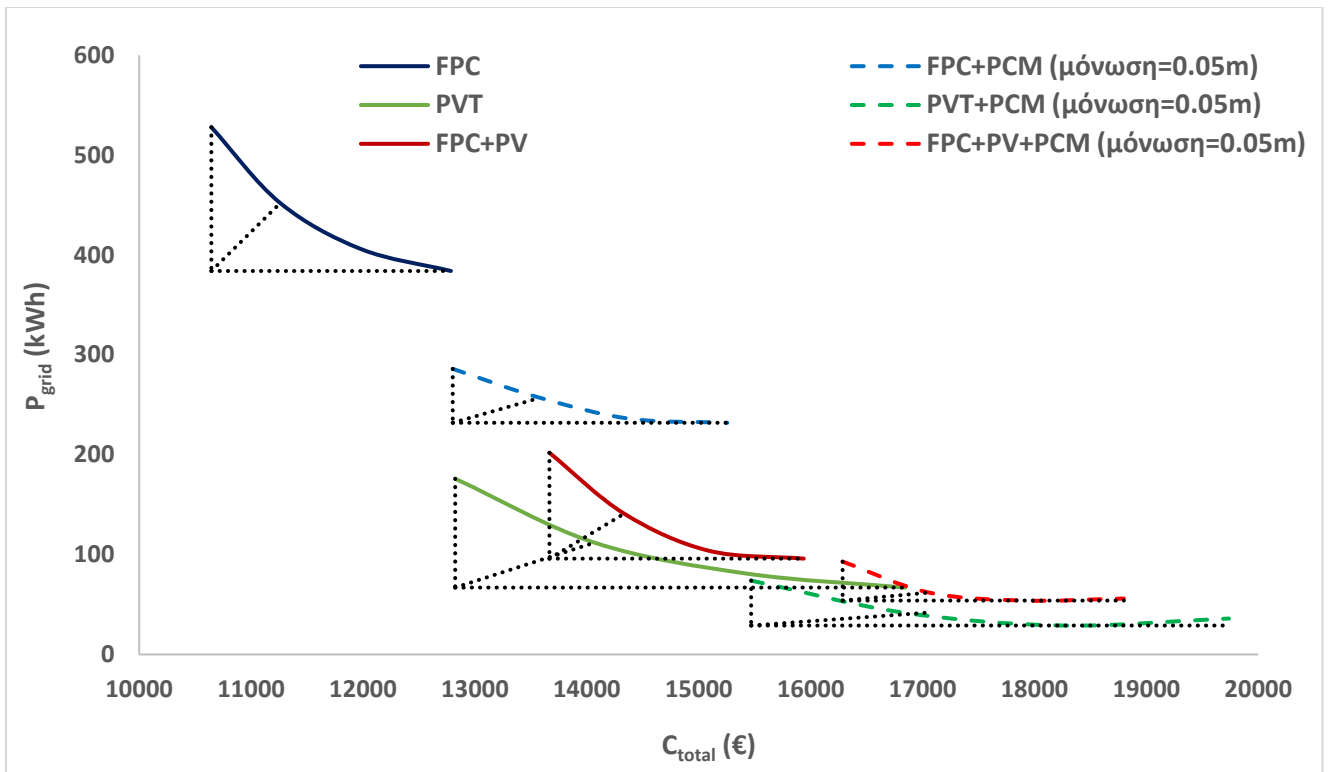
ΣΤ) Πολύ-παραγοντική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων

Σε αυτή την παράγραφο διεξάγεται μια διαδικασία πολύ-παραγοντικής αξιολόγησης προκειμένου να αξιολογηθεί η μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο με την ταυτόχρονη αύξηση του συνολικού κόστους.

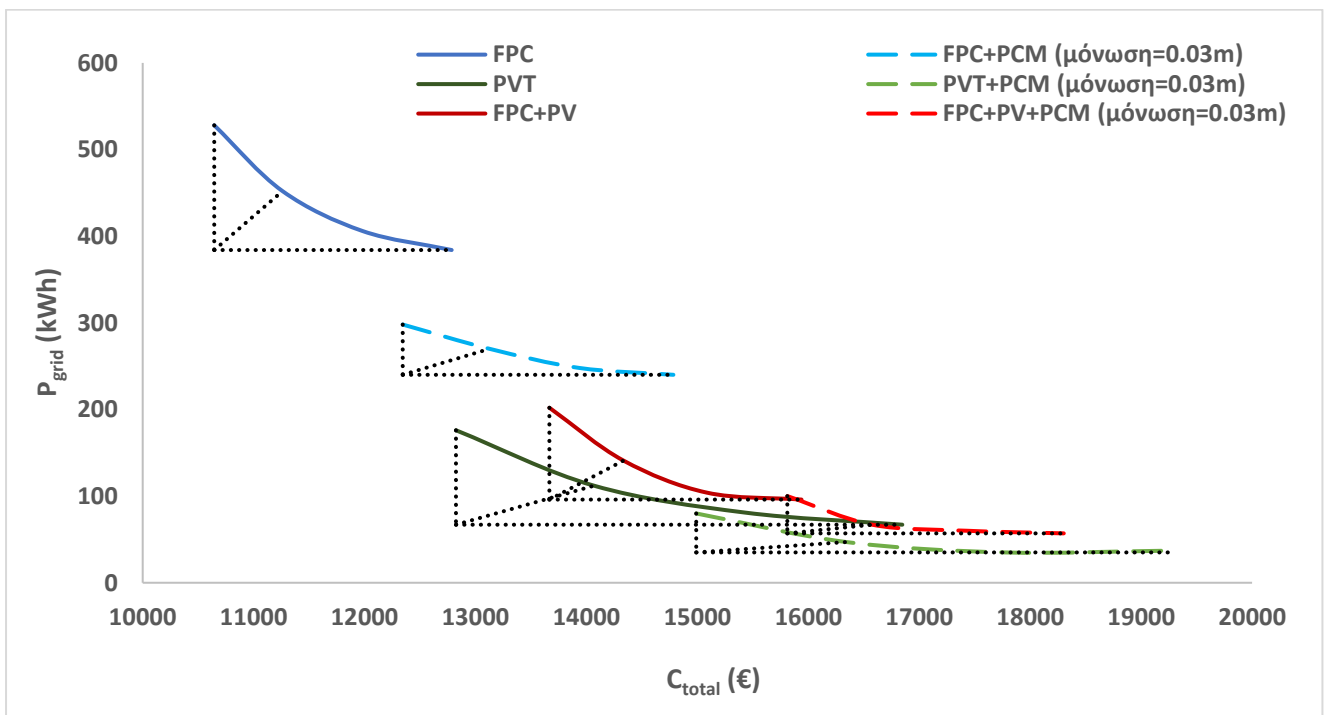
Το διάγραμμα 7.4.18 δίνει όλα τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις μόνωσης. Για κάθε καμπύλη, γίνεται μια διαδικασία πολύ-παραγοντικής βελτιστοποίησης προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη περίπτωση. Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι η βέλτιστη περίπτωση είναι αυτή που έχει τη μικρότερη αδιάστατη γεωμετρική απόσταση από το αντίστοιχο ιδανικό σημείο σε κάθε περίπτωση.

Το τελευταίο βήμα αυτής της μεθοδολογίας είναι η απεικόνιση όλων των βέλτιστων περιπτώσεων στο διάγραμμα 7.4.19. Αυτό το διάγραμμα είναι ουσιαστικά σαν ένας «χάρτης» των διαφόρων σεναρίων. Κάθε σενάριο αντιστοιχεί σε διαφορετικό συνδυασμό ηλιακού συστήματος και σχεδιασμού ενδοδαπέδιου συστήματος. Φαίνεται ότι οι περιπτώσεις με FPC-PV δεν οδηγούν σε βέλτιστα αποτελέσματα συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις και έτσι δεν πρέπει να επιλεγούν. Από την άλλη πλευρά, οι περιπτώσεις με FPC ή PVT είναι τα βέλτιστα σενάρια. Πιο συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις με FPC έχουν χαμηλότερο κόστος ενώ οι περιπτώσεις με PVT οδηγούν σε χαμηλότερη κατανάλωση δικτύου. Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι η τελική επιλογή βασίζεται στην εφαρμογή της κάθε περίπτωσης και στους συγκεκριμένους στόχους βελτιστοποίησης κάθε εφαρμογής.

Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η χρήση PVT με PCM φαίνεται να είναι ένα σενάριο με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος που είναι κατάλληλο για κτήρια σχεδόν μηδενικής ενέργειας.

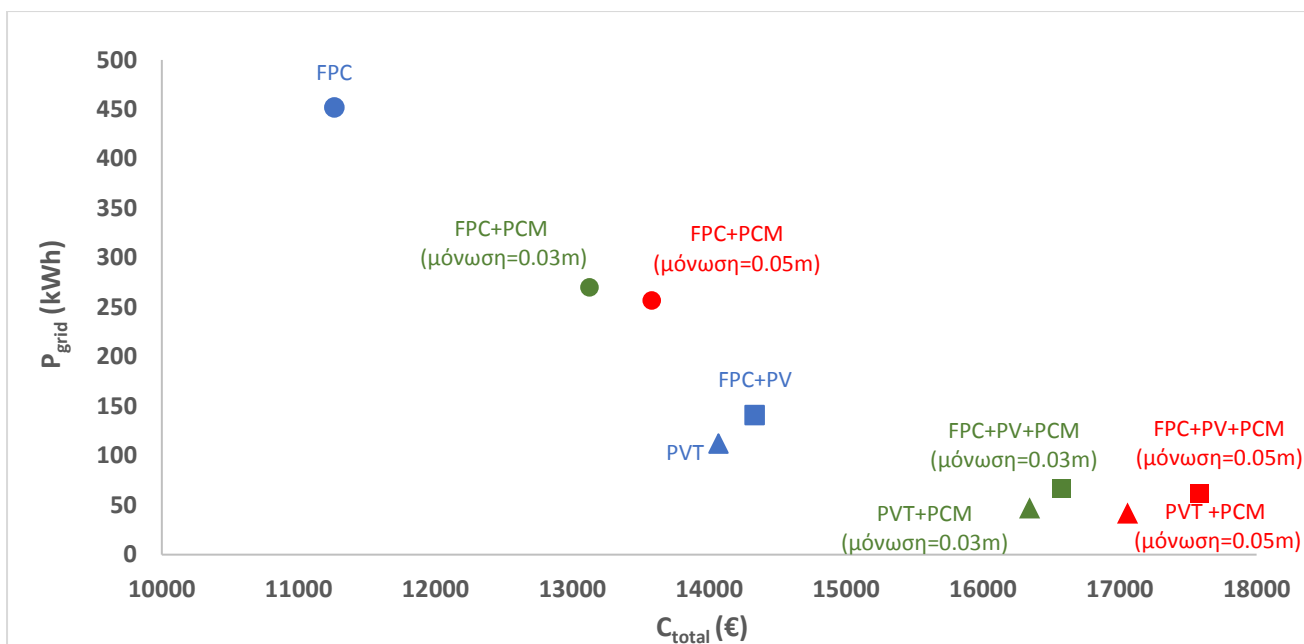


(α)



(β)

Διάγραμμα 7.4.18: Πολύ-παραγοντική αξιολόγηση των συστημάτων με και χωρίς PCM χρησιμοποιώντας ως κριτήρια την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και του συνολικού κόστους α) PCM και μόνωση πάχους 0.05 m, β) PCM και μόνωση πάχους 0.03 m.



Διάγραμμα 7.4.19: Βέλτιστα σημεία της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει του συνολικού κόστους όλων των εξεταζόμενων συστημάτων.

7.4.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι η χρήση του PCM είναι σε θέση να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα των προηγούμενων παραγράφων δείχνουν ότι η συλλεκτική επιφάνεια των 20 m² φαίνεται να είναι η καλύτερη περίπτωση για όλα τα συστήματα. Αυτή η επιλογή έχει γίνει χρησιμοποιώντας ενεργειακά κριτήρια και πιο συγκεκριμένα τις καμπύλες ηλιακής κάλυψης. Επιπλέον, είναι χρήσιμο να ειπωθεί ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και οι καμπύλες COP έχουν παρόμοιες τάσεις με την ηλιακή κάλυψη και οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα. Τα κύρια ενεργειακά αποτελέσματα αυτής της μελέτης σχετικά με τα εξεταζόμενα συστήματα συνοψίζονται στον πίνακα 7.4.3. Είναι σαφές ότι το σύστημα με μόνωση πάχους 3 cm έχει λίγο μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα με μόνωση πάχους 5 cm. Η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της περίπτωσης χωρίς PCM και της περίπτωσης με μόνωση πάχους 5 cm είναι 42% για το σύστημα FPC, 67% για το σύστημα PVT και 48% για το σύστημα FPC-PV. Αυτά είναι ενθαρρυντικά αποτελέσματα που δείχνουν ότι η ενσωμάτωση του PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης οδηγεί σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του PCM είναι η δημιουργία υψηλότερων επιπέδων εσωτερικής θερμοκρασίας και καλύτερων συνθηκών θερμικής άνεσης, όπως

διαπιστώθηκε από τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου. Επιπλέον, η απλή περίοδος αποπληρωμής (simple payback period-SPP) των εξεταζόμενων συστημάτων δίδεται στον πίνακα 7.4.3. Τα συστήματα συγκρίνονται με το αντίστοιχο σύστημα θέρμανσης με ένα λέβητα (boiler) συνδεδεμένο με το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης. Η απόδοση του λέβητα είναι 80% και θεωρείται ότι καλύπτει όλη τη ζήτηση για θέρμανση του κτηρίου. Επιπλέον, το κόστος θέρμανσης είναι 0.12€/kWh. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι στην ανάλυση αυτή λαμβάνεται υπόψη μόνο η χειμερινή περίοδος (Νοέμβριος-Απρίλιος), γιατί μόνο τότε υπάρχουν ανάγκες θέρμανσης για την τοποθεσία της Αθήνας. Διαπιστώνεται ότι η χρήση του συστήματος FPC χωρίς PCM οδηγεί σε περίοδο αποπληρωμής 10.2 ετών, ενώ τα συστήματα με PCM σε μεγαλύτερη περίοδο απόσβεσης που φτάνει τα 33 έτη. Η πιο ελπιδοφόρα περίπτωση είναι η χρήση 20 m² FPC με PCM και μόνωση πάχους 0.03 m. Στην περίπτωση αυτή, το SPP είναι 18.3 έτη. Οικονομικά, η χειρότερη περίπτωση είναι η χρήση PVT και PCM με μόνωση πάχους 0.05m με 33.0 χρόνια απλή περίοδο αποπληρωμής.

Πίνακας 7.4.3: Σύνοψη αποτελεσμάτων για τις περιπτώσεις με συλλεκτική επιφάνεια 20 m².

Περιπτώσεις	COP	Ηλεκτρική κατανάλωση (P_{grid}) (kWh)	f	SPP (έτη)
FPC χωρίς PCM	6.249	406	84.00%	10.2
FPC και PCM με μόνωση=0.05m	6.331	236	84.20%	20.1
FPC και PCM με μόνωση=0.03m	6.319	248	84.17%	18.3
PVT χωρίς PCM	6.249	89	80.05%	21.7
PVT και PCM με μόνωση= 0.05m	6.331	29	87.71%	33.0
PVT και PCM με μόνωση= 0.03m	6.319	35	85.89%	30.9
FPC-PV χωρίς PCM	6.249	104	74.38%	20.5
FPC-PV και PCM με μόνωση= 0.05m	6.331	54	77.12%	31.9
FPC-PV και PCM με μόνωση= 0.03m	6.319	60	75.81%	29.9

Ο Πίνακας 7.4.4 συνοψίζει τα οικονομικά αποτελέσματα των εξεταζόμενων συστημάτων. Η οικονομική σύγκριση αποδεικνύει ότι υπάρχει μείωση του μεταβλητού κόστους στα συστήματα με PCM. Αναλυτικότερα, για την συλλεκτική επιφάνεια των 20 m² υπάρχει μια μείωση περίπου 18 έως 20% για το σύστημα FPC+PCM, μια μείωση 5.6% έως 6.4% για το σύστημα PVT+PCM και μια μείωση από 6.5% έως 7.2% για το σύστημα FPC-PV+PCM. Ωστόσο, η χρήση του PCM οδηγεί σε υψηλότερο συνολικό κόστος για όλα τα συστήματα. Συγκεκριμένα, το συνολικό κόστος αυξάνεται μέχρι και 19.5% με το σύστημα FPC+PCM, μέχρι 18% με το σύστημα PVT+PCM και μέχρι 19%

με το σύστημα FPC-PV+PCM. Το σύστημα FPC+PCM έχει το χαμηλότερο συνολικό κόστος από τα άλλα συστήματα με PCM. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η χρήση μόνωσης πάχους 3 cm οδηγεί σε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας αλλά σε μείωση του συνολικού κόστους σε σύγκριση με τη μόνωση των 5 cm για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα. Οι διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων με πάχος μόνωσης 3 cm και 5 cm είναι σχετικά χαμηλές και συνεπώς οι περιπτώσεις αυτές μπορούν να υιοθετηθούν ως ισοδύναμες. Ωστόσο, στις περιπτώσεις που το κόστος είναι πιο σημαντικό, μπορεί να επιλεγεί η χρήση των 3 cm, ενώ στις περιπτώσεις που η κατανάλωση ενέργειας είναι η κρίσιμη παράμετρος, πρέπει να επιλεγεί η περίπτωση μόνωσης των 5 cm.

Πίνακας 7.4.4: Οικονομική σύγκριση των ενδοδαπέδιων συστημάτων με ηλιακά υποβοηθούμενη αντλία θερμότητας.

Συστήματα	A_c (m^2)	Ηλεκτρική κατανάλωση (kWh)	C_{total} χωρίς PCM (€)	C_{total} με PCM (0.05m) (€)	C_{total} με PCM (0.03m) (€)	$C_{variable}$ χωρίς PCM (€)	$C_{variable}$ με PCM (0.05m) (€)	$C_{variable}$ με PCM (0.03m) (€)
FPC	10	528	10645	12802	12344	3145	2302	2344
	15	452	11261	13582	13127	3011	2332	2377
	20	406	11981	14389	13931	2981	2389	2431
	25	384	12785	15256	14784	3035	2506	2534
PVT	10	176	12824	15469	14989	2424	2069	2090
	15	112	14069	16825	16342	2419	2175	2192
	20	81	15428	18247	17768	2508	2347	2368
	25	67	16847	19739	19243	2697	2589	2593
FPC-PV	10	202	13665	16286	15811	2626	2246	2271
	15	141	14334	17059	16576	2544	2269	2286
	20	104	15086	17912	17433	2556	2372	2393
	25	96	15939	18799	18303	2649	2509	2513

Είναι επίσης χρήσιμο να ειπωθεί ότι τα παρόντα συστήματα δεν συγκρίθηκαν με μια αντλία θερμότητας αέρα επειδή είναι ένα διαφορετικό σύστημα το οποίο οδηγεί σε διαφορετικές συνθήκες θερμικής άνεσης στον εσωτερικό χώρο. Το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης είναι ένα ακτινοβόλο σύστημα θέρμανσης το οποίο οδηγεί σε πιο ομοιόμορφα επίπεδα θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο. Επιπλέον, η χρήση της θερμότητας από πηγή αέρα οδηγεί σε υψηλότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, που αποτελεί σημαντικό περιορισμό αυτής της τεχνολογίας. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, η χρήση αντλίας θερμότητας αέρα μειώνει το συνολικό επενδυτικό κόστος

και εξακολουθεί να είναι μια ελκυστική επιλογή οικονομικά. Πρέπει να ειπωθεί σύντομα ότι ο COP μιας αντλίας θερμότητας αέρα είναι γύρω στην τιμή 3 αλλά οι σημερινές τιμές του COP με την αντλία θερμότητας νερού υπερβαίνουν το 6. Έτσι, αυτό το γεγονός δείχνει μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας τουλάχιστον κατά 50%.

Σημειώνεται ότι τα εξεταζόμενα συστήματα λειτουργούν μόνο το χειμώνα. Οπότε για τις συνθήκες της καλοκαιρινής περιόδου ισχύουν τα λεγόμενα της παραγράφου 7.3.7.

7.4.7 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η μελέτη αυτή εξετάζει ενεργειακά και οικονομικά τρία ηλιακά υποβοηθούμενα συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με αντλία θερμότητας με και χωρίς τη χρήση στρώματος PCM στο δάπεδο. Το TRNSYS είναι το εργαλείο προσομοίωσης αυτής της μελέτης και η εξεταζόμενη περίοδος είναι από τον Νοέμβριο έως τον Απρίλιο. Ένα συνηθισμένο κτήριο (γραφείο) στην Αθήνα επιφάνειας 100 m² εξετάζεται με ετήσια ζήτηση θέρμανσης περίπου 27 kWh/m². Συγκρίνονται τρία συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης: με FPC, με PVT και με συνδυασμό FPC-PV. Τα συστήματα αναλύονται ενεργειακά με μια παραμετρική μελέτη που βασίζεται στις συλλεκτικές επιφάνειες και το πάχος της μόνωσης του δαπέδου. Επίσης, τα συστήματα αναλύονται οικονομικά με μια παραμετρική μελέτη που βασίζεται στις συλλεκτικές επιφάνειες και τη χρήση του στρώματος PCM στο δάπεδο. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της μελέτης έχουν δημοσιευθεί από τη συγγραφέα [7.47-7.48]. Τα βασικά συμπεράσματα παρατίθενται παρακάτω:

- Προκειμένου να έχουμε ικανοποιητική ηλιακή κάλυψη στην ηλεκτρική ζήτηση της αντλίας θερμότητας, η βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη βρίσκεται περίπου στα 20 m².
- Η εφαρμογή στρώματος PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο περίπου 42% για το σύστημα με FPC, 67% για το σύστημα με PVT και 48% για το σύστημα με FPC-PV.
- Η ηλιακή κάλυψη με το σύστημα FPC είναι περίπου 84%, με το σύστημα PVT 85% και με το σύστημα FPC-PV 77%. Γενικά, ο COP της αντλίας θερμότητας είναι περίπου 6.3 με 20 m² συλλεκτική επιφάνεια.
- Με τη χρήση της στρώσης PCM κάτω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, υπάρχει αύξηση περίπου 1°C στην εσωτερική θερμοκρασία. Η αύξηση αυτή βελτιώνει τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτηρίου.

- Η οικονομική σύγκριση αποδεικνύει ότι υπάρχει μείωση του μεταβλητού κόστους στα συστήματα με τη χρήση του PCM. Για τη βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια των 20 m² υπάρχει μια μείωση από 5.6% έως 20%. Όσον αφορά το συνολικό κόστος, σημειώνεται αύξηση περίπου 15 έως 20%. Το σύστημα FPC+PCM έχει το χαμηλότερο συνολικό κόστος μεταξύ των άλλων συστημάτων με PCM.
- Η μικρότερη περίοδος αποπληρωμής (SPP) μεταξύ των περιπτώσεων με PCM βρίσκεται για την περίπτωση με FPC και μόνωση πάχους 3 cm. Στην περίπτωση αυτή, η μικρότερη περίοδος αποπληρωμής είναι 18.3 έτη. Ωστόσο, είναι υψηλότερη από την περίπτωση του συστήματος FPC χωρίς PCM όπου η απλή περίοδος αποπληρωμής είναι 10.2 έτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 7^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[7.1] G. Mazzucco, G. Xotta, V.A. Salomoni, M. Giannuzzi, C.E. Maiorana, Solid thermal storage with PCM materials. Numerical investigations, Applied Thermal Engineering 2017;124: 545–559.

[7.2] Y. Li, S. Liu, J. Lu, Effects of various parameters of a PCM on thermal performance of a solar chimney, Applied Thermal Engineering 2017;127:1119–1131.

[7.3] R. Padovan, M. Manzan, Genetic optimization of a PCM enhanced storage tank for Solar Domestic Hot Water Systems, Solar Energy 2014;103:563–573.

[7.4] J. Zhao, Y. Ji, Y. Yuan, Z. Zhang, J. Lu, Energy-Saving Analysis of Solar Heating System with PCM Storage Tank, Energies 2018;11:237.

[7.5] S.R. Mousavi Baygi, S.M. Sadrameli, Thermal management of photovoltaic solar cells using polyethylene glycol 1000 (PEG1000) as a phase change material, Thermal Science and Engineering Progress 2018;5:405–411.

[7.6] U. Stritih, P. Charvat, R. Koželj, L. Klimes, E. Osterman, M. Ostry, V. Butala, PCM thermal energy storage in solar heating of ventilation air—Experimental and numerical investigations, Sustainable Cities and Society 2018;37:104–115.

[7.7] A. Safari, R. Saidur, F.A. Sulaiman, Y. Xu, J. Dong, A review on supercooling of phase change materials in thermal energy storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017;70: 905–19.

- [7.8] N.I. Ibrahim, F.A. Al-Sulaiman, S. Rahman, B.S. Yilbas, A.Z. Sahin, Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: a critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;74:26–50.
- [7.9] Z. Luo, Z. Huang, N. Xie, X. Gao, T. Xu, Y. Fang, Z. Zhang, Numerical and experimental study on temperature control of solar panels with form-stable paraffin/expanded graphite composite PCM, *Energy Conversion and Management* 2017;149:416-423.
- [7.10] A.H.A. Al-Waeli, K. Sopian, M.T. Chaichan, H.A. Kazem, A. Ibrahim, S. Mat, M.H. Ruslan, Evaluation of the nanofluid and nano-PCM based photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study, *Energy Conversion and Management* 2017;151:693-708.
- [7.11] S.A Nada, D.H. El-Nagar, H.M.S. Hussein, Improving the thermal regulation and efficiency enhancement of PCM-Integrated PV modules using nano particles, *Energy Conversion and Management* 2018;166:735-743.
- [7.12] W. Youssef, Y.T. Ge, S.A. Tassou, CFD modelling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes, *Energy Conversion and Management* 2018;157:498–510.
- [7.13] C. Tzivanidis, E. Bellos, G. Mitsopoulos, K.A. Antonopoulos, A. Delis, Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump heating system with other usual heating systems in Athens, *Applied Thermal Engineering* 2016;106:87-97.
- [7.14] M. Mohanraj, Y. Belyayev, S. Jayaraj, A. Kaltayev, Research and developments on solar assisted compression heat pump systems – A comprehensive review (Part-B: Applications), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;83:124–155.
- [7.15] M. Mohanraj, Y. Belyayev, S. Jayaraj, A. Kaltayev, Research and developments on solar assisted compression heat pump systems – A comprehensive review (Part A: Modeling and modifications), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;83:90–123.
- [7.16] E. Bellos, C. Tzivanidis, K. Moschos, K.A. Antonopoulos, Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems, *Energy Conversion and Management* 2016b;120:306–319.

- [7.17] I. Atmaca, Energy and exergy analysis of a solar-assisted heat pump space heating system for clear days, *International Journal of Exergy* 2013;12(2):226–248.
- [7.18] S. Poppi, C. Bales, M.Y. Haller, A. Heinz, Influence of boundary conditions and component size on electricity demand in solar thermal and heat pump combi systems, *Applied Energy* 2016;162:1062–1073.
- [7.19] A.K. Athienitis, T.Y. Chen, Experimental and theoretical investigation of floor heating with thermal storage, *ASHRAE Transactions* 1993; 99(1):1049–1057.
- [7.20] J.D. Dale, M.Y. Ackerman, A comparison of radiant floor and forced air heating. *SESCI 1989: Proceeding of 15th Annual SESCO Conference*, p. 15–18,1989.
- [7.21] K. Ghali, Economic viability of underfloor heating system: A case study in Beirut climate. In *International conference on renewable energies & power quality*; Sevilla, Spain 2017.
- [7.22] C. Inard, A. Meslem, P. Depecker, Energy consumption and thermal comfort in dwelling-cells: A zonal-model approach, *Building and Environment* 1998;33(5):279–291.
- [7.23] J. Braun, Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage, *ASHRAE Transactions* 1990;96(2):876–888.
- [7.24] K. Lin, Y. Zhang, X. Xu, H. Di, R. Yang, P. Qin, Modeling and simulation of underfloor electric heating system with shape-stabilized PCM plates, *Building and Environment* 2004; 39:1427–1434.
- [7.25] K. Lin, Y. Zhang, X. Xu, H. Di, R. Yang, P. Qin, Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates, *Energy and Buildings* 2005;37:215–220.
- [7.26] R. Ansuini, R. Larghetti, A. Giretti, M. Lemma, Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control, *Energy and Buildings* 2011;43:3019–3026.
- [7.27] P. Devaux, M. Mehdi Farid, Benefits of PCM underfloor heating with PCM wallboards for space heating in winter, *Applied Energy* 2017;191:593–602.

- [7.28] A.E. Mays, R. Ammar, M. Hawa, M.A. Akroush, F. Hachem, M. Khaled, M. Ramadan, Using phase change material in under floor heating, *Energy Procedia* 2017;119:806–811.
- [7.29] M.M. Farid, W.J. Kong, Underfloor heating with latent heat storage, *Proc Inst Mechan Eng, Part A: J Power Energy* 2001;215(5):601–9.
- [7.30] X. Jin, X.S. Zhang, Thermal analysis of a double layer phase change material floor, *Applied Thermal Engineering* 2011;31:1576–81.
- [7.31] J. Mazo, M. Delgado, J.M. Marin, B. Zalba, Modeling a radiant floor system with phase change material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump, *Energy and Buildings* 2012;47:458–466.
- [7.32] R. Barzin, J.J.J. Chen, B.R. Young, M.M. Farid, Application of PCM underfloor heating in combination with PCM wallboards for space heating using price based control system, *Applied Energy* 2015;148:39–48.
- [7.33] K.L. Huang, G.H. Feng, J.S. Zhang, Experimental and numerical study on phase change material floor in solar water heating system with a new design, *Solar Energy* 2014;105:126–38.
- [7.34] R. Zeng, X. Wang, W. Xiao, Y. Zhang, Q. Zhang, H. DI, Thermal performance of phase change material energy storage floor for active solar water-heating system, *Frontiers of Energy and Power Engineering in China* 2009, doi: 10.1007/s11708-009-0079-9.
- [7.35] BioPCM, Technical data Q29, Phase Change Energy Solutions Australia, www.phasechange.com.au <accessed 2017>.
- [7.36] TRNSYS 18 Transient System Simulation Program – Volume 5, Multizone Building Modeling with Type56 and TRNBuild, Solar Energy Laboratory (SEL), University of Wisconsin: Madison, WI, USA, 2012;8-200.
- [7.37] Thermal Energy System Specialists (TESS), TESSLibs 3-Mathematical Reference. Type 1270: Phase Change Material (PCM) wall layer for Type56, 2012.

- [7.38] E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types, *Applied Thermal Engineering* 2016;102:749–59.
- [7.39] <<https://www.homeadvisor.com/cost/heating-and-cooling/install-a-geothermal-heating-or-cooling-system>> <accessed 2018>.
- [7.40] J. Kosny, N. Shukla, A. Fallahi, Cost Analysis of Simple Phase Change Material-Enhanced Building Envelopes in Southern U.S. Climates, U.S. Department of Energy’s Building America Program, Fraunhofer CSE 2013.
- [7.41] E. Bellos, C. Tzivanidis, Energetic and financial sustainability of solar assisted heat pump heating systems in Europe, *Sustainable Cities and Society* 2017;33:70–84.
- [7.42] E. Bellos, C. Tzivanidis, C. Symeou, K.A. Antonopoulos, Energetic, exergetic and financial evaluation of a solar driven absorption chiller – A dynamic approach. *Energy Conversion and Management* 2017;137:34–48.
- [7.43] M. T. Plytaria, C. Tzivanidis, E. Bellos, K. A. Antonopoulos, Parametric analysis and optimization of an underfloor solar assisted heating system with phase change materials, *Thermal Science and Engineering Progress* 2019;10:59-72.
- [7.44] E. Bellos, C. Tzivanidis, A. Prassas, K.A. Antonopoulos, Modelling of a Solar Assisted Floor Heating System with TRNSYS, *Energy, Transportation and Global Warming*, Springer, January 2016, 355-369, doi: 10.1007/978-3-319-30127-3_28.
- [7.45] <https://www.boilersprices.co.uk/heat-only-boilers-prices/> <accessed 2018>.
- [7.46] E. Bellos, C. Tzivanidis, Multi-objective optimization of a solar driven trigeneration system, *Energy* 2018;149:47-62.
- [7.47] M. T. Plytaria, C. Tzivanidis, E. Bellos, K. A. Antonopoulos, Energetic investigation of solar assisted heat pump underfloor heating systems with and without phase change materials, *Energy Conversion and Management* 2018;173:626–639.
- [7.48] M. T. Plytaria, E. Bellos, C. Tzivanidis, K. A. Antonopoulos, Financial and energetic evaluation of solar assisted heat pump underfloor heating systems with phase change materials, *Applied Thermal Engineering* 2019;149:548-564.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΗΛΙΑΚΟΣ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (PCM)

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσονται και αναλύονται οι προσομοιώσεις πρωτότυπων συστημάτων για ηλιακό κλιματισμό-ψύξη κτηρίων με υλικά αλλαγής φάσης (PCM), με το λογισμικό TRNSYS.

8.1 Εισαγωγή

Σήμερα, υπάρχουν πολλά ενεργειακά προβλήματα όπως η αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, οι αυξημένες εκπομπές CO₂ και η φυσική ρύπανση [8.1]. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές για θέρμανση και ψύξη χώρων σε κτήρια, προκειμένου να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας [8.2]. Ειδικά το καλοκαίρι, ο ηλιακός κλιματισμός (ή η ηλιακή ψύξη) είναι μια τεχνολογία που οδηγεί στη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας [8.3].

Οι ψύκτες απορρόφησης με LiBr/H₂O είναι η κύρια τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές ηλιακής ψύξης. Η εναλλακτική επιλογή είναι η χρήση H₂O/NH₃ αλλά αυτό το εργαζόμενο ζεύγος χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές ψύξης, με παραγωγή ψύξης σε επίπεδα θερμοκρασίας χαμηλότερα από 0°C. Επιπλέον, η χρήση του LiBr/H₂O παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερη απόδοση από το H₂O/NH₃, ενώ ένας άλλος περιορισμός του εργαζόμενου ζεύγους H₂O/NH₃ είναι η υψηλή τοξικότητα του NH₃. Μια άλλη επιλογή είναι η χρήση του LiCl/H₂O ως εργαζόμενο ζεύγος, αλλά αντιμετωπίζει κρίσιμα προβλήματα κρυστάλλωσης και έτσι δεν είναι η σωστή επιλογή. Οι Aliane et al. [8.4] εξέτασαν μελέτες ψύξης με ηλιακή απορρόφηση προκειμένου να δοθεί έμφαση στη λειτουργία των ψυκτών απορρόφησης που τροφοδοτούνται από ηλιακή θερμότητα. Υπάρχουν πολλές έρευνες με τους ηλιακούς συλλέκτες απορρόφησης στη βιβλιογραφία. Οι Shirazi et al. [8.5] σχεδίασαν πέντε ηλιακά συστήματα απορρόφησης θέρμανσης και ψύξης και τα διερεύνησαν για διαφορετικά κλίματα. Οι ίδιοι συγγραφείς, σε άλλη μελέτη [8.6], ανέλυσαν ενεργειακά, περιβαλλοντικά και οικονομικά τρία συστήματα με μονοβάθμιο, διβάθμιο και τριβάθμιο ψύκτη απορρόφησης και διαπίστωσαν ότι το σύστημα με διβάθμιο ψύκτη απορρόφησης είναι η πιο ελκυστική επιλογή. Οι Chen et al. [8.7] μελέτησαν ένα μονοβάθμιο ψύκτη απορρόφησης με κρύο αέρα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα αυτό μπορεί να αυξήσει την ικανότητα ψύξης περίπου 65.5%. Οι Bellos et al. [8.8] ανέλυσαν

ενεργειακά, εξεργειακά και οικονομικά ένα ηλιακό σύστημα ψύξης με ένα μονοβάθμιο ψύκτη απορρόφησης σε συνδυασμό με συλλέκτες κενού και βρήκαν μια περίοδο αποπληρωμής 15 ετών. Επιπλέον, οι Bellos et al. [8.9] εξέτασαν ένα ηλιακό σύστημα ψύξης απορρόφησης-συμπύεσης και βρήκαν μια περίοδο αποπληρωμής 14 ετών. Οι Bellos και Tzivanidis [8.10] διερεύνησαν ένα σύστημα ψύξης με ψύκτη απορρόφησης συνδυασμένο με παραβολικούς συλλέκτες και διαπίστωσαν ότι αυτό το σύστημα παρουσίαζε υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα. Ο Lu [8.11] μελέτησε δέκα διαφορετικά συστήματα ψύξης/θέρμανσης απορρόφησης και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα με διβάθμιο ψύκτη απορρόφησης και με πηγή θερμότητας την απορριπτόμενη θερμότητα είναι η πλέον βελτιστοποιημένη επιλογή. Οι Zhou et al. [8.12] διερεύνησαν πειραματικά ένα σύστημα ψύξης που οδηγείται από ηλιακούς συλλέκτες Fresnel. Οι Xu και Wang [8.13] ερεύνησαν θεωρητικά ένα ηλιακό σύστημα με μεταβλητό ψύκτη απορρόφησης LiBr/H₂O και διαπίστωσαν ότι αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ηλιακή ψύξη μεγαλύτερης απόδοσης και μικρή συλλεκτική επιφάνεια. Οι Ibrahim et al. [8.14] διερεύνησαν ένα σύστημα ψύξης με ηλιακή απορρόφηση με αποθήκευση πάγου. Οι Sokhansefat et al. [8.15] βελτιστοποίησαν ένα ηλιακό σύστημα ψύξης με ένα μονοβάθμιο ψύκτη απορρόφησης και βρήκαν αύξηση της απόδοσης κατά 28% και ηλιακή κάλυψη έως 70%. Επιπλέον, οι Khan et al. [8.16] ανέπτυξαν δύο διαφορετικά μοντέλα ηλιακού συστήματος ψύξης με μονοβάθμιο ψύκτη απορρόφησης.

Εκτός από τους ψύκτες απορρόφησης, υπάρχουν και άλλες τεχνικές ψύξης που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας αυξάνοντας την ενεργειακή απόδοση στα κτήρια. Για παράδειγμα, τα θερμικά ενεργητικά συστήματα κτηρίων (thermally activated building systems-TABS), που αποτελούνται από σωλήνες, μπορούν να ενσωματωθούν στο περίβλημα του κτηρίου, όπως σε τοίχους, στέγες και δάπεδα, για εφαρμογές ψύξης, βελτιώνοντας τη θερμική απόδοση ενός κτηρίου. Πολλοί ερευνητές έχουν διερευνήσει αυτά τα συστήματα. Οι Romaní et al. [8.17-8.18] μελέτησαν πειραματικά την απόδοση ενός θαλάμου με τοίχους ακτινοβολίας σε συνδυασμό με έναν εναλλάκτη θερμότητας εδάφους και διαπίστωσαν ότι υπήρξε μείωση των ψυκτικών φορτίων κατά περίπου 20% όταν η εσωτερική θερμοκρασία αέρα ήταν 26°C. Οι Liu et al. [8.19] πρότειναν και μελέτησαν πειραματικά ένα ενεργό σύστημα ηλιακού θερμοηλεκτρικού τοίχου ακτινοβολίας που μείωσε τα θερμικά φορτία ενός κτηρίου και είχε επίσης απόδοση ψύξης περίπου 5%. Οι Luo et al. [8.20] διερεύνησαν ένα θερμοηλεκτρικό σύστημα

τοίχου με φωτοβολταϊκό στην πρόσοψη σε ψυχρά κλίματα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτό το σύστημα θα μπορούσε να εξοικονομήσει ενέργεια κατά μέσο όρο 46%. Οι Mikeska και Svendsen [8.21] πραγματοποίησαν πειράματα για να αξιολογήσουν την επίδραση ενός συστήματος ψύξης δια ακτινοβολίας στην εσωτερική θερμική άνεση ενός κτηρίου. Συμπέραναν ότι όταν η θερμοκρασία του νερού ήταν 4 K χαμηλότερη από τη θερμοκρασία που αισθάνονταν οι ένοικοι, τότε τα επίπεδα της εσωτερικής θερμοκρασίας ήταν κοντά στα όρια της θερμικής άνεσης. Οι Simko et al. [8.22] διερεύνησαν, αριθμητικά και πειραματικά, ένα ενεργό τοίχο με σωλήνες και διαπίστωσαν ότι αυτό το σύστημα θα μπορούσε να μειώσει την απώλεια θερμότητας. Οι Jing et al. [8.23] σχεδίασαν ένα σύστημα ηλιακής απορρόφησης-υποψύξης σε κτήρια και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ηλιακή ακτινοβολία και η ζήτηση για ψύξη επιδρούν στην ικανότητα ψύξης του συστήματος.

Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ενσωμάτωση του PCM στο περίβλημα του κτηρίου, όπως στην οροφή [8.24], στο πάτωμα [8.25] και στους τοίχους [8.26], παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια τόσο για τη θέρμανση του χώρου όσο και για τη ψύξη. Η ανασκόπηση των Mengjie et al. [8.27] παρείχε μια ενημέρωση σχετικά με τις πρόσφατες εξελίξεις των υλικών αλλαγής φάσης στο περίβλημα των κτηρίων και σε εξοπλισμό. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για το περίβλημα των κτηρίων η περιοχή θερμοκρασίας αλλαγής φάσης των PCM άλλαξε μεταξύ 10°C και 39°C και για την εφαρμογή σε εξοπλισμό μεταξύ -15.4°C και 77°C. Οι Zhu et al. [8.28] εξέτασαν την εφαρμογή υλικών αλλαγής φάσης που έχουν σταθεροποιημένο σχήμα και έχουν ενσωματωθεί σε κτήρια τα τελευταία δέκα χρόνια. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτά τα PCM μειώνουν τις διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας και τις απαιτήσεις ενέργειας. Οι Fateh et al. [8.29] εξέτασαν τη χρήση του PCM σε ένα κτήριο ελαφρού βάρους και βρήκαν ότι η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης των PCM είναι 23°C. Οι Stritih et al. [8.30] εξέτασαν τη χρήση των PCM στα δομικά στοιχεία ενός κτηρίου προκειμένου να καταστεί το κτήριο σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης και διαπίστωσαν ότι τα δεδομένα καιρού είναι πολύ σημαντικά για τη θερμική συμπεριφορά του κτηρίου. Οι Sun et al. [8.31] υπολόγισαν τη μεταφορά θερμότητας ενός γραφείου με PCM το οποίο είχε τοποθετηθεί στην εσωτερική πλευρά του εξωτερικού τοίχου και βρήκαν τις βέλτιστες θερμοκρασίες τήξης του PCM για διάφορες πόλεις της Κίνας. Οι Erlbeck et al. [8.32] διαπίστωσαν ότι με την αλλαγή του σχήματος ενός PCM, που ενσωματώνεται

σε ένα μπλοκ από σκυρόδεμα, η θερμική συμπεριφορά βελτιστοποιείται χωρίς τη προσθήκη περισσότερης μάζας PCM. Οι Errebaï et al. [8.33] πραγματοποίησαν πειράματα προκειμένου να παράσχουν μια τεχνική λύση για τη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς των γυψοσανίδων με PCM. Οι Xie et al. [8.34] μελέτησαν πέντε τοίχους με PCM σ' ένα κλιματιζόμενο δωμάτιο και παρουσίασαν τη θερμική τους απόδοση. Οι Zhou και Pang [8.35] διερεύνησαν την απόδοση ενός τοίχου Trombe με τη χρήση PCM και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το PCM διατηρεί την εσωτερική θερμική άνεση σε καλά επίπεδα. Οι Wang et al. [8.36] μελέτησαν την απόδοση ενός τοίχου με PCM όλο το χρόνο και διαπίστωσαν ότι η χρήση του PCM μειώνει τα φορτία θέρμανσης κατά μέσο όρο 15% και τα φορτία ψύξης περίπου 24%. Οι Chen et al. [8.37] ανέπτυξαν έναν ενεργό-παθητικό τοίχο αερισμού με υλικό αλλαγής φάσης το οποίο δημιούργησε μια έκλυση θερμότητας κατά μέσο όρο 55% και μια αποθήκευση θερμότητας κατά μέσο όρο 41.5%.

Επιπλέον, το PCM, όπως έχει ήδη ειπωθεί, μπορεί να ενσωματωθεί σε συστήματα HVAC και σε μονάδες αποθήκευσης όπως δοχεία αποθήκευσης και σε εφαρμογές ηλιακής θέρμανσης και ψύξης. Για παράδειγμα, οι Belmonte et al. [8.38] μελέτησαν την απόδοση ενός ηλιακού συστήματος ψύξης όπου ένας ξηρός ψύκτης με PCM είχε αντικαταστήσει έναν υγρό πύργο. Οι Agyenim et al. [8.39] έβαλαν ένα PCM σε εναλλάκτη θερμότητας και με αυτό τον τρόπο προσπάθησαν να βελτιώσουν τον συντελεστή απόδοσης (COP) του ψύκτη απορρόφησης. Οι Schweigler et al. [8.40] τοποθέτησαν ένα PCM σε ένα ψύκτη απορρόφησης και διαπίστωσαν ότι η χρήση του PCM βελτίωσε το θερμικό κέρδος. Οι Ponsanmugakumar et al. [8.41] μελέτησαν ένα ηλιακό σύστημα κλιματισμού με ψύκτη απορρόφησης και με την ενσωμάτωση ενός PCM στη γεννήτρια και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το PCM μπορεί να μειώσει τα βοηθητικά φορτία. Οι Azzouz et al. [8.42] έβαλαν ένα PCM στην πίσω πλευρά του εξατμιστή και διαπίστωσαν ότι το θερμικό φορτίο επηρέασε την αύξηση του COP. Οι Sonnenrein et al. [8.43] μελέτησαν την επίδραση διαφορετικών στοιχείων αποθήκευσης θερμότητας σε ένα συμπυκνωτή και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το PCM μείωσε τη θερμοκρασία του συμπυκνωτή και επομένως την κατανάλωση ενέργειας. Ο Said και ο Hassan [8.44] μελέτησαν πειραματικά ένα σύστημα κλιματισμού σε συνδυασμό με έναν εναλλάκτη θερμότητας PCM και διαπίστωσαν ότι με τη χρήση του PCM υπήρξε αύξηση του COP της μονάδας κλιματισμού. Οι Hirmiz et al. [8.45] πραγματοποίησαν αριθμητικές

προσομοιώσεις προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν το όφελος της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης στην απόδοση του ψυκτικού συστήματος ηλιακής απορρόφησης. Οι Aljehani et al. [8.46] ανέπτυξαν ένα μοντέλο συστήματος κλιματισμού και αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με PCM και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με τη χρήση του PCM υπάρχει βελτίωση όσον αφορά την απόδοση και το μέγεθος του συμπιεστή και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

8.2 Αριθμητική προσομοίωση ηλιακού συστήματος ψύξης με και χωρίς PCM στους τοίχους ακτινοβολίας ενός κτηρίου.

8.2.1 Γενικά

Στην παρούσα μελέτη, ένα ηλιακό σύστημα ψύξης με συλλέκτες σωλήνων κενού (ETC) συνδεδεμένο με έναν μονοβάθμιο ψύκτη απορρόφησης, ο οποίος τροφοδοτεί τέσσερις τοίχους ακτινοβολίας με και χωρίς μία στρώση PCM αντίστοιχα, διερευνάται ενεργειακά και οικονομικά για ένα κτήριο με εμβαδόν 100 m² στην Αθήνα. Η πρωτοτυπία αυτής της μελέτης είναι ο συνδυασμός τριών τεχνολογιών: ένας ηλιακά-υποβοηθούμενος ψύκτης απορρόφησης, οι τοίχοι ακτινοβολίας και η ενσωμάτωση του στρώματος PCM σε αυτούς. Το στρώμα PCM χρησιμοποιείται στα τοίχους ακτινοβολίας, προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης και να μειωθεί η λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης. Δεν υπάρχει άλλη μελέτη που να διερευνά την παρούσα διαμόρφωση του εξεταζόμενου συστήματος και έτσι η μελέτη αυτή έρχεται να παρουσιάσει ένα νέο τρόπο για την παραγωγή ψυκτικού φορτίου κτηρίου με μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και να συνδυάσει ένα βελτιωμένο κέλυφος κτηρίου με αυξημένη χωρητικότητα αποθήκευσης.

Η μελέτη αυτή διεξάγεται με το λογισμικό TRNSYS 17 το οποίο χρησιμοποιεί ένα ενεργό στρώμα για την προσομοίωση του τοίχου ακτινοβολίας. Το PCM μοντελοποιείται με το επικυρωμένο μοντέλο Type 1270.

8.2.2. Το εξεταζόμενο κτήριο

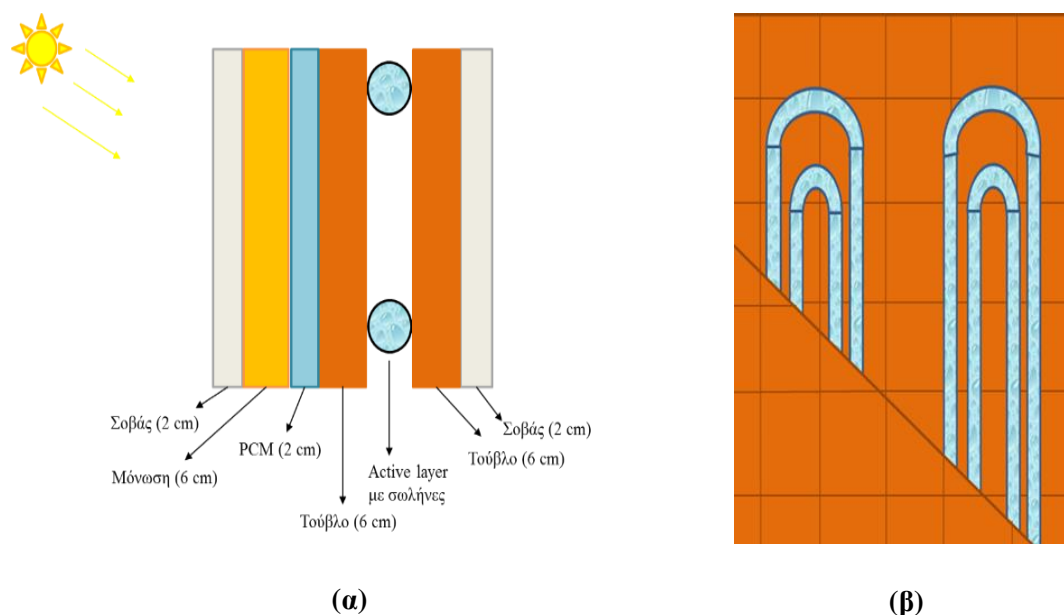
Σε αυτή τη μελέτη, το εξεταζόμενο κτήριο έχει μέγεθος και συνθήκες λειτουργίας ίδιες με το κτήριο που περιεγράφηκε στην παράγραφο 6.2.2.1. Σ'αυτή τη μελέτη θεωρείται ότι 7 άτομα εργάζονται μέσα στο κτήριο και το φορτίο του εξοπλισμού είναι ίσο με 350W. Το μόνο που αλλάζει είναι η δομή των τοίχων (Πίνακας 8.2.1) με συντελεστή θερμοπερατότητας 0.545W/m²K. Η μοντελοποίηση του συστήματος ψύξης δια

ακτινοβολίας γίνεται χρησιμοποιώντας ένα "ενεργό στρώμα" σε τοίχους, όπως είχε γίνει αντίστοιχα στο ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Αυτή η στρώση περιέχει σωληνώσεις πληρωμένες με ρευστό. Πιο συγκεκριμένα, το ενεργό στρώμα περιλαμβάνει χάλκινους σωλήνες με απόσταση 20cm, οι οποίοι έχουν εξωτερική διάμετρο 2 cm και πάχος 2 mm. Η επιθυμητή παροχή μάζας εισόδου δίδεται και καθορίζει την κατάτμηση της περιοχής για το σύστημα τοίχου ακτινοβολίας. Στην περίπτωση μας, ο συγκεκριμένος ρυθμός παροχής μάζας 10 kg/hm^2 χωρίζει το εμβαδόν κάθε τοίχου σε ένα τμήμα. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας με το ενεργό στρώμα και τον αέρα ζώνης εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ενεργού στρώματος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι επιθυμητές θερμοκρασίες ρυθμίστηκαν στους 26°C το καλοκαίρι, που είναι μια θερμοκρασία στα όρια της θερμικής άνεσης.

Σε αυτές τις προσομοιώσεις, το επικυρωμένο Type 1270 από την εταιρεία TESS χρησιμοποιήθηκε για την ενσωμάτωση του PCM στους τοίχους. Σε αυτή τη μελέτη, όπου ψυχρό νερό εισέρχεται στους σωλήνες των τοίχων, επιλέγεται το μικρότερο διαθέσιμο επίπεδο θερμοκρασίας τήξης το οποίο είναι 23°C . Επομένως, το επιλεγμένο PCM είναι το BioPCM Q23/M91 [8.47], οι ιδιότητες του οποίου έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 6. Το στρώμα PCM βρίσκεται μεταξύ του τούβλου και της μόνωσης των τοίχων όπως φαίνεται στην εικόνα 8.2.1. Επίσης, η εικόνα 8.2.1 απεικονίζει τον τρόπο κατασκευής του τοίχου ακτινοβολίας. Παρατηρείται ότι οι σωλήνες νερού είναι μεταξύ των δύο στρώσεων τούβλου.

Πίνακας 8.2.1: Στρώματα τοίχου από έξω προς τον εσωτερικό χώρο.

	<i>Στρώματα</i>	<i>Τιμές</i>
<i>Τοίχοι</i>	Σοβάς	0.02 m
	Μόνωση	0.06 m
	Τούβλο	0.06 m
	‘Ενεργό στρώμα’ με σωλήνες	0.002 m
	Τούβλο	0.06 m
	Σοβάς	0.02 m



Εικόνα 8.2.1: (α) Στρώματα τοίχου ακτινοβολίας του εξεταζόμενου συστήματος, (β) Κατασκευή σωλήνων μέσα στα τούβλα.

8.2.3. Το εξεταζόμενο σύστημα ψύξης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται το εξεταζόμενο σύστημα ψύξης χωρίς και με ένα στρώμα PCM στους τοίχους ακτινοβολίας. Οι υπολογισμοί έγιναν για την καλοκαιρινή περίοδο (Μάιος-Σεπτέμβριος) στην Αθήνα. Μετά από μια ανάλυση ευαισθησίας, επιλέχθηκε το χρονικό βήμα των 5 λεπτών. Πιο συγκεκριμένα, αυτό το χρονικό βήμα καθιστά τη σύγκλιση της ετήσιας βοηθητικής κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος. Η παραμετρική ανάλυση έγινε με την αλλαγή του όγκου του δοχείου αποθήκευσης και της συλλεκτικής επιφάνειας του ETC.

Τέλος, πρέπει να ειπωθεί ότι τα χρησιμοποιούμενα κλιματολογικά δεδομένα αφορούν την Αθήνα (Ελλάδα) και δίνονται από το μοντέλο 109 του TRNSYS (Meteonorm), που περιλαμβάνει δεδομένα καιρού για ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος.

8.2.3.1 Ηλιακό σύστημα ψύξης με τοίχους ακτινοβολίας.

Η απλή διαμόρφωση του ηλιακού συστήματος ψύξης με τοίχους ακτινοβολίας παρουσιάζεται στην εικόνα 8.2.2. Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται από τον συλλέκτη κενού για να θερμανθεί το νερό, το οποίο αποθηκεύεται στο δοχείο αποθήκευσης. Ένας μονοβάθμιος ψύκτης απορρόφησης, ο οποίος λειτουργεί με το εργαζόμενο ζεύγος LiBr-

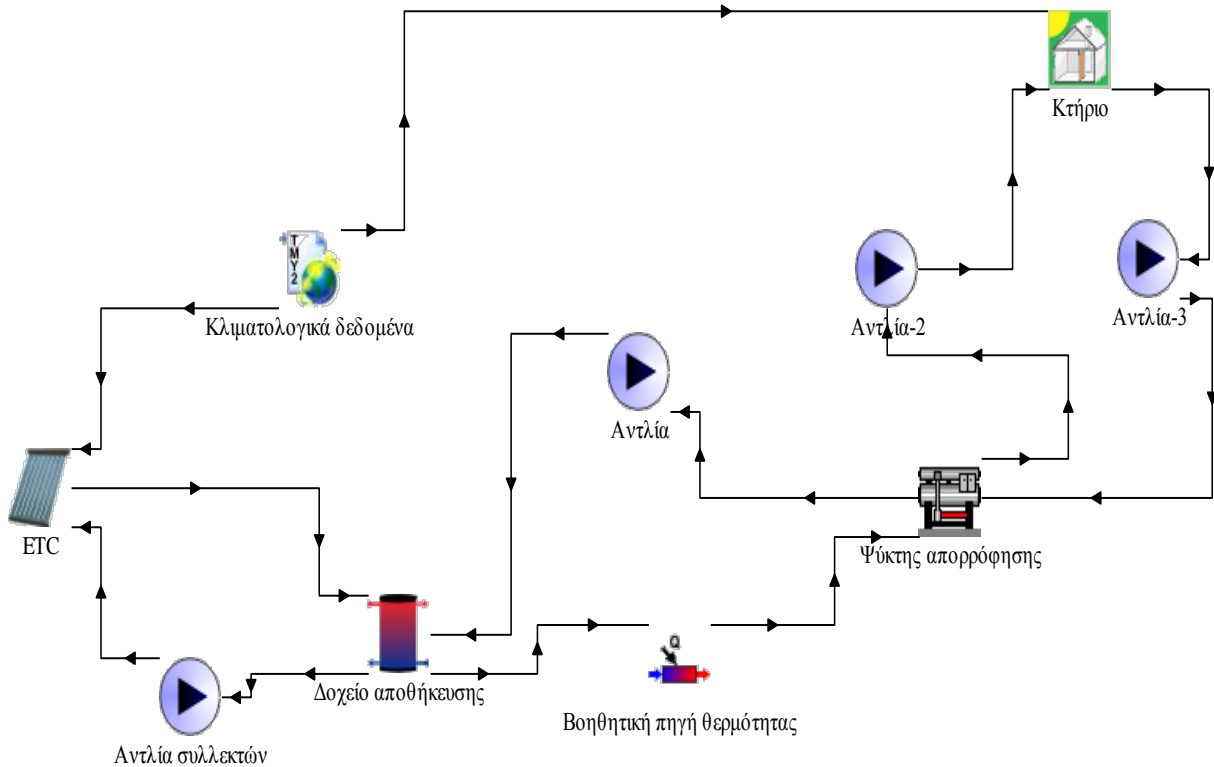
H₂O, τροφοδοτείται με ζεστό νερό από το δοχείο αποθήκευσης. Επιπλέον, όταν η θερμοκρασία του νερού είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή, τότε μια βοηθητική πηγή θερμότητας μετά το δοχείο αποθήκευσης θερμαίνει το νερό μέχρι τους 85°C [8.8]. Στη συνέχεια, ο ψύκτης απορρόφησης παράγει κρύο νερό και αυτό το νερό ρέει μέσω των σωληνώσεων στους τοίχους ακτινοβολίας του κτηρίου όταν υπάρχουν ανάγκες ψύξης. Η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου ορίζεται στους 26°C. Η ονομαστική τιμή COP του ψύκτη απορρόφησης επιλέγεται στο 0.7 και η ονομαστική χωρητικότητα είναι 20 kW. Ο COP δεν είναι σταθερός σε αυτή τη μελέτη αλλά ποικίλει ανάλογα με τη θερμοκρασία εισόδου χρησιμοποιώντας τους καταλόγους από τις βιβλιοθήκες του TRNSYS που περιλαμβάνονται στο μοντέλο Type 107, που μοντελοποιεί τον ψύκτη απορρόφησης.

Η συλλεκτική επιφάνεια του ETC κυμαίνεται από 50 m² έως 110 m² και ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης κυμαίνεται από 1 m³ έως 7 m³. Κάθε πάνελ είναι ίσο με 2 m² και κάθε σειρά έχει 5 πάνελ. Σε αυτή τη μελέτη, οι παράλληλες σειρές κυμαίνονται από 5 έως 11, προκειμένου να επιτευχθεί συνολική συλλεκτική επιφάνεια από 50 m² έως 110 m². Η λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών ρυθμίζεται με έναν κατάλληλο ελεγκτή ο οποίος ελέγχει εάν η συνολική ηλιακή ακτινοβολία υπερβαίνει τα 100 W/m².

Στις περιπτώσεις με χαμηλότερο ηλιακό δυναμικό, η αντλία κυκλοφορίας του συστήματος συλλέκτη σταματά να λειτουργεί επειδή δεν υπάρχει περιθώριο για παραγωγή χρήσιμης θερμότητας. Αυτό το όριο των 100 W/m² έχει καθοριστεί με μια απλή ανάλυση ευαισθησίας. Πρακτικά, οι χαμηλότερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας οδηγούν σε αρνητική θερμική απόδοση συλλέκτη (οι θερμικές απώλειες υπερβαίνουν τη χρήσιμη παραγωγή) και έτσι το ηλιακό σύστημα δε λειτουργεί. Επιπλέον, υπάρχει στο ηλιακό σύστημα μια ανώτερη θερμοκρασία διακοπής στους 120°C. Το εργαζόμενο υγρό στο ηλιακό σύστημα είναι νερό υπό πίεση στα 8 bar.

Ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης εξετάζεται παραμετρικά από 1 m³ έως 7 m³ για όλες τις περιπτώσεις συλλεκτικής επιφάνειας. Επιπλέον, το δοχείο αποθήκευσης μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ζωνών ανάμειξης και σε αυτή τη μελέτη έγινε επιλογή 10 ζωνών ανάμειξης αφού διεξήχθη μια απλή ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με αυτό το ζήτημα. Πιο συγκεκριμένα, η ετήσια κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας υπολογίστηκε για διαφορετικό αριθμό ζωνών ανάμειξης και με τις 10 ζώνες τα αποτελέσματα σύγκλιναν σε λογικό χρόνο υπολογισμού. Οι θερμικές απώλειες του

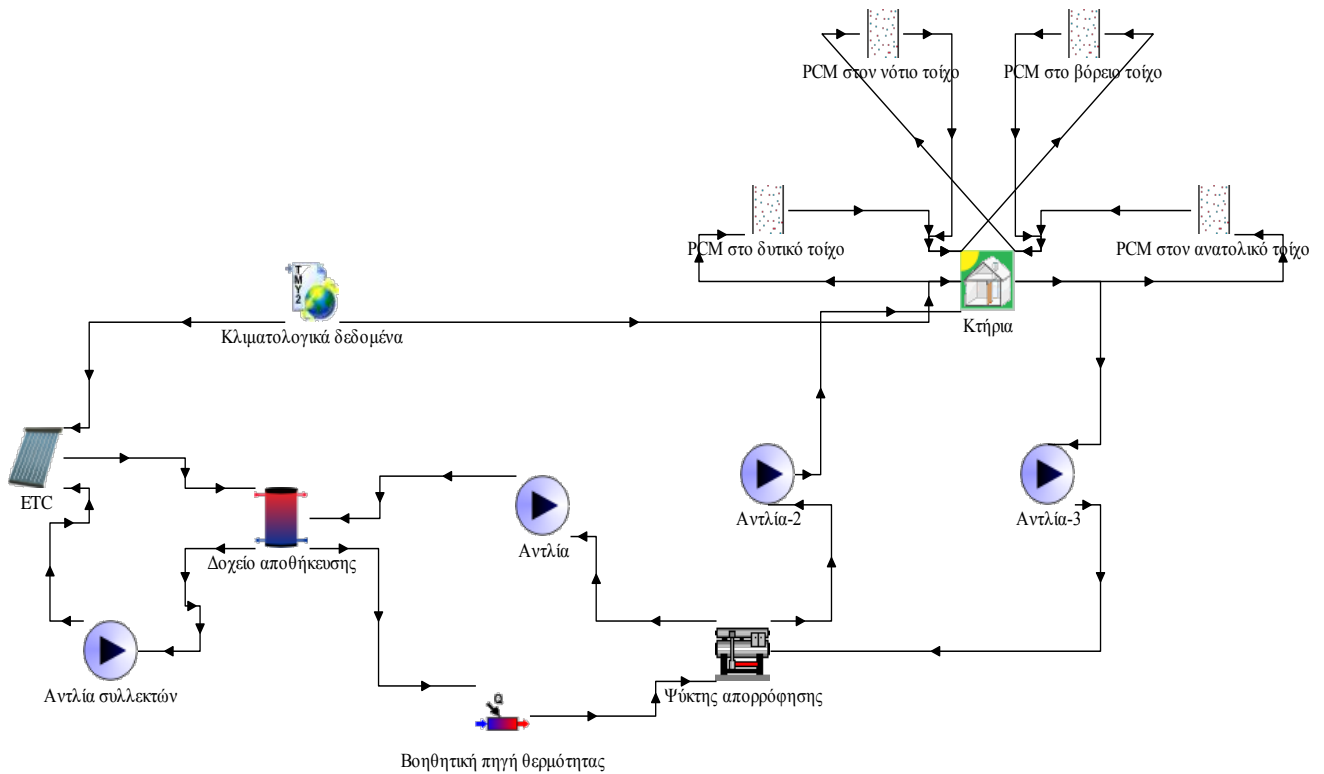
δοχείου αποθήκευσης είναι σημαντικές σε αυτή τη μελέτη επειδή υπάρχουν επίπεδα θερμοκρασίας γύρω στους 100°C και έχουν ληφθεί υπόψη με τη χρήση του συντελεστή θερμικής απώλειας ίσο με 0.8 W/m²K.



Εικόνα 8.2.2: Το εξεταζόμενο ηλιακό σύστημα ψύξης με τοίχους ακτινοβολίας.

8.2.3.2 Ηλιακό σύστημα ψύξης με στρώμα PCM μέσα στους τοίχους ακτινοβολίας.

Η επόμενη περίπτωση είναι το ηλιακό σύστημα ψύξης με στρώμα PCM στους τέσσερις τοίχους ακτινοβολίας. Η απλή διαμόρφωση του συστήματος φαίνεται στην εικόνα 8.2.3. Το στρώμα PCM χρησιμοποιείται για να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης και να αποφευχθεί η λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης. Οι υπολογισμοί έγιναν για την εφαρμογή της στρώσης PCM σε κάθε τοίχο και έπειτα σε συνδυασμό με περισσότερους από έναν τοίχους. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Β, η εικόνα Β6 δείχνει την ολοκληρωμένη διαμόρφωση του συστήματος στο TRNSYS.



Εικόνα 8.2.3: Το εξεταζόμενο ηλιακό σύστημα ψύξης με στρώμα PCM μέσα στους τοίχους ακτινοβολίας.

8.2.4 Τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία (components) στο TRNSYS

Οι τιμές κάθε χρησιμοποιούμενου στοιχείου στο TRNSYS δίνονται στον Πίνακα 8.2.2. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο COP του ψύκτη απορρόφησης επιλέγεται να είναι 0.7 [8.5], η οποία είναι μια τυπική τιμή για μονοβάθμια μηχανή. Επιπλέον, υπάρχουν επιπλέον components όπως αντλίες νερού (Type 3d), διαφορικός ελεγκτής on/off (Type 2b), ελεγκτής (controller) θέρμανσης (Type 970), ελεγκτής ψύξης (Type 971) και οι τιμές των παραμέτρων τους έχουν επιλεγεί γενικά, σύμφωνα με τυπικές τιμές. Ειδικότερα, ο controller θέρμανσης ελέγχει τη θερμοκρασία εισόδου στο ψύκτη απορρόφησης για να είναι τουλάχιστον 85°C, ενώ ο controller ψύξης ελέγχει τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου για να φτάσει τους 26°C. Ο διαφορικός ελεγκτής χρησιμοποιείται στο ηλιακό σύστημα για τη ρύθμιση της λειτουργίας της αντλίας κυκλοφορίας. Αυτός ο διαφορικός ελεγκτής δίνει σήμα λειτουργίας εάν η συνολική ηλιακή ακτινοβολία υπερβαίνει τα 100 W/m² και η θερμοκρασία στο δοχείο είναι μέχρι 120°C.

Πίνακας 8.2.2: Τιμές παραμέτρων του συστήματος στο TRNSYS.

Στοιχεία συστήματος	Παράμετροι	Τιμές
Συλλέκτης κενού (ETC) (Type 71)	Συλλεκτική επιφάνεια (A_c)	50-110 m ²
	[F_R (τ_a)]	0.82
	Κλίση συλλέκτη (β)	25°
	[$F_R U_L$]	2.19 W/m ² K
	Παροχή μάζας (m_c)	1-2 kg/s
	Ειδική θερμοχωρητικότητα νερού (c_p)	4.19 kJ/kgK
Ψύκτης απορρόφησης (Type 107)	Ισχύς	20 kW
	COP	0.7
	Θερμοκρασία νερού ψύξης	35°C
	Παροχή κρύου νερού	1 kg/s
	Θερμοκρασία θερμού νερού εισόδου	85°C
Βοηθητική πηγή θερμότητας (Type 6)	Ισχύς	5 kW
	Θερμοκρασία λειτουργίας	85°C
Δοχείο αποθήκευσης (Type 4b)	Όγκος δοχείου	1-7 m ³
	Ζώνες ανάμειξης	10
	Συντελεστής θερμικών απωλειών	0.8 W/m ² K

8.2.5 Μαθηματική μοντελοποίηση

Για τον συλλέκτη σωλήνων κενού ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις. Η ωφέλιμη αποδιδόμενη ισχύς συλλέκτη κενού δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_u = m_c \cdot c_p \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (8.2.1)$$

Η διαθέσιμη ισχύς από την ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη (Q_s) υπολογίζεται ως:

$$Q_s = A_c \cdot G_T \quad (8.2.2)$$

Το ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος (ηλιακό σύστημα-δοχείο αποθήκευσης και ψύκτη απορρόφησης) γράφεται ως εξής:

$$Q_u + Q_{aux} = Q_{abs} + Q_{stored} + Q_{loss} \quad (8.2.3)$$

Η προηγούμενη εξίσωση δείχνει ότι η ενέργεια από την ωφέλιμη ισχύ του συλλέκτη (Q_u) και τη βοηθητική πηγή θερμότητας (Q_{aux}) διαχωρίζεται στη θερμότητα στην είσοδο του ψύκτη απορρόφησης (Q_{abs}), στην αποθηκευμένη ενέργεια στο δοχείο αποθήκευσης (Q_{stored}) και στις θερμικές απώλειες από το δοχείο προς το περιβάλλον (Q_{loss}).

Επιπλέον, η εξίσωση 8.2.4 δείχνει τον COP του ψύκτη απορρόφησης, που είναι ο λόγος της παραγόμενης ψύξης (Q_{cool}) προς το θερμικό φορτίο προς τον ψύκτη απορρόφησης (Q_{abs}).

$$COP = \frac{Q_{cool}}{Q_{abs}} \quad (8.2.4)$$

Η εξίσωση 8.2.4 δίνει τον COP μόνο για τον ψύκτη απορρόφησης και όχι για όλο το σύστημα. Γι' αυτό και ο παρονομαστής της εξίσωσης είναι η θερμότητα εισόδου του ψύκτη απορρόφησης.

Σε αυτή τη μελέτη, η ηλιακή κάλυψη για την είσοδο θερμότητας στο ψύκτη απορρόφησης (f) είναι μια κρίσιμη παράμετρος η οποία υπολογίζεται έμμεσα σύμφωνα με την εξίσωση 8.2.5. Αυτή η παράμετρος δείχνει τη συμβολή της ηλιακής ενέργειας στην ανάγκη ενέργειας του ψύκτη απορρόφησης. Πρακτικά, αυτή η παράμετρος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ενέργεια του βοηθητικού θερμαντήρα (Q_{aux}) και του θερμικού φορτίου προς τον ψύκτη απορρόφησης (Q_{abs}).

$$f = 1 - \frac{Q_{aux}}{Q_{abs}} \quad (8.2.5)$$

Πρέπει να ειπωθεί ότι η λειτουργία των αντλιών του συστήματος είναι γενικά πολύ μικρή και αμελείται από τους υπολογισμούς [8.48].

Το ψυκτικό φορτίο (Q_{cool}) του κτηρίου δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{cool} = m_1 \cdot c_p \cdot (T_{w1,out} - T_{w1,in}) + m_2 \cdot c_p \cdot (T_{w2,out} - T_{w2,in}) + m_3 \cdot c_p \cdot (T_{w3,out} - T_{w3,in}) + m_4 \cdot c_p \cdot (T_{w4,out} - T_{w4,in}) \quad (8.2.6)$$

όπου ο δείκτης w συμβολίζει τους τέσσερις 'ενεργούς' τοίχους ακτινοβολίας. Αυτό το φορτίο ψύξης χρησιμοποιείται πρακτικά από τον ψύκτη απορρόφησης για τον υπολογισμό της θερμότητας εισόδου χρησιμοποιώντας την εξίσωση 8.2.4. Τα επίπεδα θερμοκρασίας της εξίσωσης 8.2.6 υπολογίζονται από τα στοιχεία του TRNSYS σε κάθε χρονικό βήμα.

Για τη μοντελοποίηση του PCM ισχύουν αυτά που έχουν ειπωθεί στην ενότητα 6.1.2.1.

Οι δύο βασικές εξισώσεις είναι:

$$T_{final} = T_{initial} + \frac{q_1 + q_2}{m_{pcm} \cdot c_{p,solid}} \quad (8.2.7)$$

$$T_{final} = T_{initial} + \frac{q_1 + q_2}{m_{pcm} \cdot c_{p,liquid}} \quad (8.2.8)$$

όπου q_1 και q_2 είναι οι ποσότητες εισροής ενέργειας στο PCM από τα οριακά στρώματα τοιχώματος, m_{pcm} είναι η μάζα του PCM, $c_{p,solid}$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα στην στερεή κατάσταση του PCM και $c_{p,liquid}$ είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα στην υγρή κατάσταση του PCM. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων υπολογίζονται από το TRNSYS σε κάθε χρονικό βήμα [8.49].

Η χρήση του συνολικού κόστους της επένδυσης (C_{total}) δίνει την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος με και χωρίς PCM. Η εξίσωση 8.2.9 δίνει τον ορισμό του συνολικού κόστους που είναι το άθροισμα του κόστους κεφαλαίου του συστήματος και του μεταβλητού κόστους για όλη τη διάρκεια της επένδυσης που επιλέχθηκε να είναι 25 έτη:

$$C_{total} = C_{capital} + C_{variable} \quad (8.2.9)$$

Πιο αναλυτικά, η εξίσωση 8.2.10 ορίζει το κόστος κεφαλαίου της επένδυσης με και χωρίς PCM ενώ η εξίσωση 8.2.11 ορίζει το μεταβλητό κόστος που στην ουσία είναι το κόστος κατανάλωσης της βοηθητικής ηλεκτρικής ενέργειας κατά την διάρκεια της επένδυσης.

$$C_{capital} = \begin{cases} A_c \cdot C_c + V_t \cdot C_t + C_{aux} + Q_{nom} \cdot C_{abs} + C_{act.walls1,2,3,4} \\ A_c \cdot C_c + V_t \cdot C_t + C_{aux} + Q_{nom} \cdot C_{abs} + C_{act.walls1,2,3,4} + C_{PCM,walls1,2,3,4} \end{cases} \quad (8.2.10)$$

$$C_{variable} = E_{aux} \cdot K_{el} \cdot R + K_{O\&M} \quad (8.2.11)$$

όπου K_{el} είναι το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε [€/kWh] και επιλέχθηκε για την Ελλάδα να είναι 0.20 €/kWh [8.50]. $K_{O\&M}$ είναι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης που είναι ίσο με 0.01 του $C_{capital}$. Πρέπει να ειπωθεί ότι το κόστος λειτουργίας των αντλιών συγκαταλέγεται σ' αυτή την παράμετρο.

Η ετήσια βοηθητική κατανάλωση ενέργειας δίνεται από την εξίσωση:

$$E_{aux} = \int_{May}^{September} Q_{aux} dt \quad (8.2.12)$$

Η παράμετρος R είναι τα 'πραγματικά' χρόνια της διάρκειας ζωής της επένδυσης που λαμβάνει υπόψη το επιτόκιο αναγωγής χρήματος, όπως δείχνει η παρακάτω εξίσωση:

$$R = \frac{(1+r)^N - 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (8.2.13)$$

Τελικώς, ο πίνακας 8.2.3 δείχνει αναλυτικά τα οικονομικά δεδομένα της μελέτης.

Πίνακας 8.2.3: Οικονομικά δεδομένα της μελέτης [8.50-8.54].

<i>Παράμετροι</i>	<i>Τιμές</i>
<i>Κόστος συλλέκτη ETC (C_c)</i>	250 €/m ²
<i>Κόστος δοχείου αποθήκευσης (C_t)</i>	500 €/m ³
<i>Κόστος PCM (C_{pcm})</i>	30 €/m ²
<i>Κόστος βοηθητικής πηγής θερμότητας (C_{aux})</i>	100 €
<i>Κόστος 'ενεργού' τοίχου ακτινοβολίας ($C_{act.wall}$)</i>	30 €/m ²
<i>Κόστος ψύκτη απορρόφησης (C_{abs})</i>	300 €/kW
<i>Επιτόκιο αναγωγής χρήματος (r)</i>	3%
<i>Διάρκεια ζωής επένδυσης (N)</i>	25 years
<i>Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (K_{el})</i>	0.20 €/kWh
<i>Κόστος λειτουργίας και συντήρησης ($K_{O\&M}$)</i>	1% $C_{capital}$

8.2.6 Προσομοίωση και αποτελέσματα

Η ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων παρουσιάζεται σε αυτή την παράγραφο. Επιπλέον, η εσωτερική θερμοκρασία για όλα τα συστήματα παρουσιάζεται για όλη τη θερινή περίοδο.

A) Ενεργειακή αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων

Το διάγραμμα 8.2.4 απεικονίζει την κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας του συστήματος χωρίς PCM ως συνάρτηση επτά διαφορετικών συλλεκτικών επιφανειών του ETC και για επτά διαφορετικούς όγκους του δοχείου αποθήκευσης. Σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να διαπιστωθεί ο βέλτιστος όγκος δοχείου αποθήκευσης για την κάθε συλλεκτική επιφάνεια, ο οποίος οδηγεί στην ελαχιστοποίηση της βοηθητικής ενέργειας.

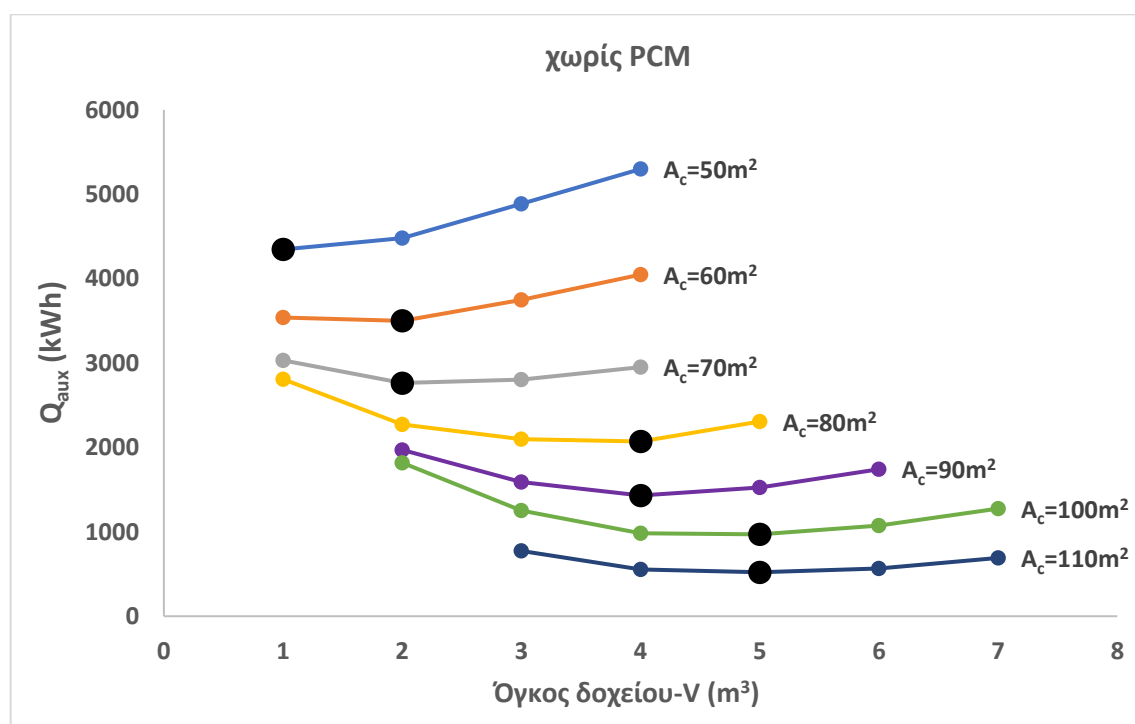
Η ανάλυση δείχνει ότι για την συλλεκτική επιφάνεια $A_c=50 \text{ m}^2$, ο βέλτιστος όγκος δοχείου αποθήκευσης (V) είναι 1 m^3 . Για $A_c = 60 \text{ m}^2$ και 70 m^2 , το βέλτιστο δοχείο αποθήκευσης έχει όγκο $V= 2 \text{ m}^3$, για $A_c = 80 \text{ m}^2$ και 90 m^2 έχει $V= 4 \text{ m}^3$ και για $A_c=100 \text{ m}^2$ και 110 m^2 έχει όγκο $V=5 \text{ m}^3$. Είναι προφανές ότι οι μικρότεροι όγκοι δοχείου αποθήκευσης είναι πιο κατάλληλοι για μικρές συλλεκτικές επιφάνειες, ενώ μεγαλύτεροι όγκοι δοχείου αποθήκευσης είναι κατάλληλοι για μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες.

Πρακτικά, η μεγαλύτερη συλλεκτική επιφάνεια παράγει περισσότερη ωφέλιμη ισχύ θερμότητας και έτσι απαιτείται μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα προκειμένου να διατηρηθεί το εργαζόμενο υγρό στα επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας.

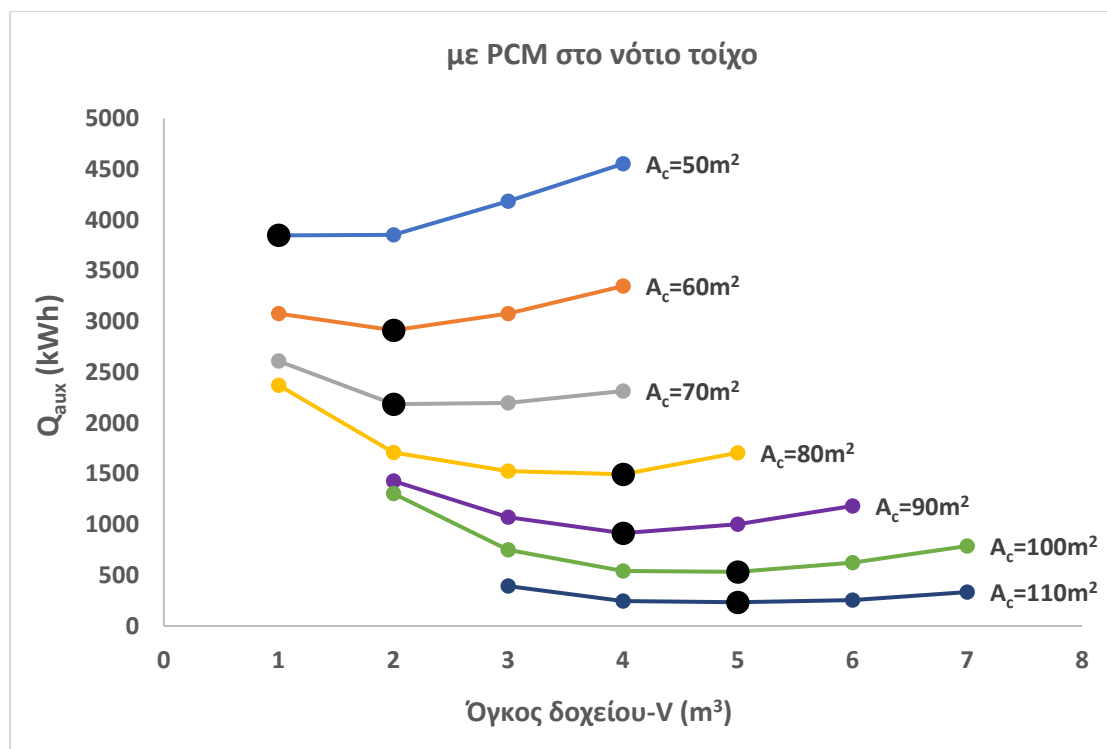
Επιπλέον, παρατηρείται χαμηλότερη κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας για μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες λόγω της υψηλότερης ωφέλιμης παραγωγής ενέργειας από το ηλιακό σύστημα.

Το διάγραμμα 8.2.5 απεικονίζει την κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας του συστήματος με PCM στο νότιο τοίχο ως συνάρτηση επτά διαφορετικών συλλεκτικών επιφανειών του ETC και για επτά διαφορετικούς όγκους δοχείου αποθήκευσης. Ο νότιος τοίχος επιλέγεται για πρώτη ανάλυση με PCM, επειδή το εξεταζόμενο κτήριο έχει νότιο προσανατολισμό και η επίδραση του ήλιου είναι μεγαλύτερη σε αυτή την πλευρά.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με τη χρήση της στρώσης PCM, υπάρχει μείωση της κατανάλωσης βοηθητικής ενέργειας για κάθε συλλεκτική επιφάνεια που είναι περίπου 17%. Σε αυτή την περίπτωση, οι βέλτιστοι όγκοι δοχείου αποθήκευσης για κάθε συλλεκτική επιφάνεια είναι ίδιοι με το προηγούμενο σύστημα χωρίς PCM.



Διάγραμμα 8.2.4: Κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας (Q_{aux}) συναρτήσει του όγκου του δοχείου αποθήκευσης και της συλλεκτικής επιφάνειας για το σύστημα ψύξης χωρίς PCM (Τα μαύρα σημεία δείχνουν τη βέλτιστη τιμή του δοχείου αποθήκευσης για κάθε συλλεκτική επιφάνεια).

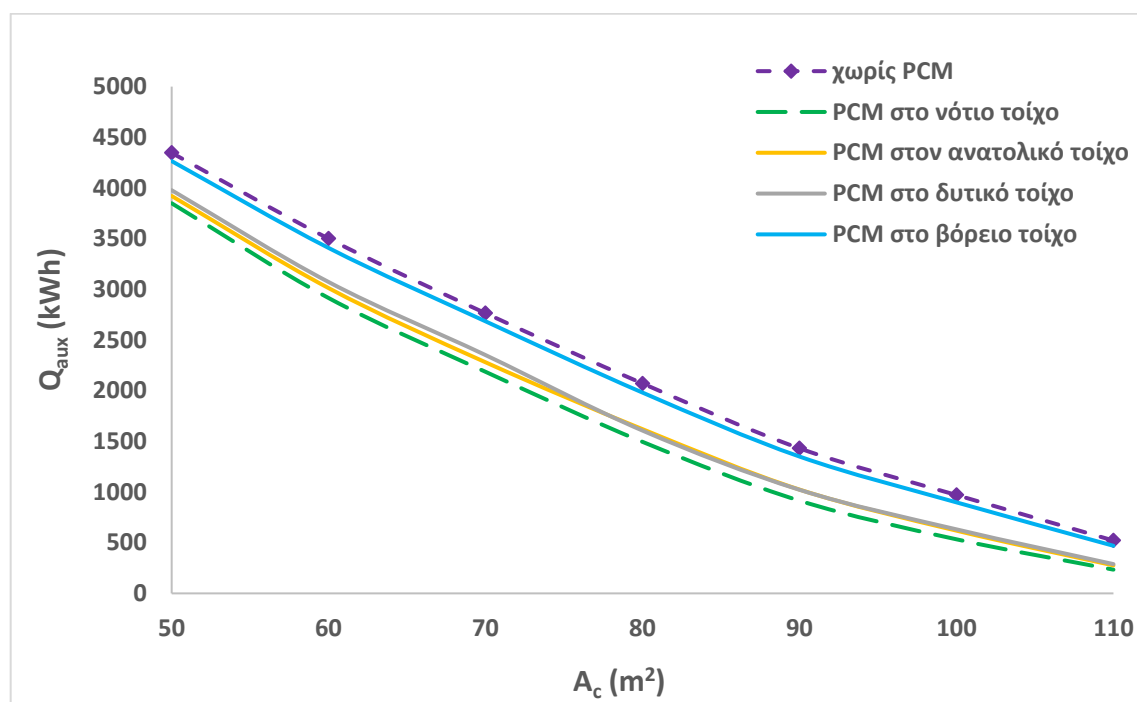


Διάγραμμα 8.2.5: Κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας (Q_{aux}) συναρτήσει του όγκου του δοχείου αποθήκευσης και της συλλεκτικής επιφάνειας για το σύστημα ψύξης με PCM στο νότιο τοίχο (Τα μαύρα σημεία δείχνουν τη βέλτιστη τιμή του δοχείου αποθήκευσης για κάθε συλλεκτική επιφάνεια).

Το επόμενο βήμα αφορά τη ενεργειακή σύγκριση του συστήματος χωρίς και με PCM σε κάθε τοίχο ξεχωριστά. Τα διαφορετικά περιβλήματα του κτηρίου μελετώνται για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες, ενώ οι όγκοι του δοχείου αποθήκευσης έχουν τις αντίστοιχες βέλτιστες τιμές (βλ. διαγράμματα 8.2.4 και 8.2.5). Το διάγραμμα 8.2.6 δείχνει την κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας της περίπτωσης χωρίς PCM και των περιπτώσεων με PCM σε κάθε τοίχο (νότιος, ανατολικός, δυτικός, βόρειος) για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του ETC.

Παρατηρείται ότι υπάρχει μείωση της βοηθητικής ενέργειας με τη χρήση του στρώματος PCM. Η μεγαλύτερη μείωση, κατά μέσο όρο 30%, είναι όταν το PCM βρίσκεται στο νότιο τοίχο και αυτό είναι λογικό επειδή στην περίπτωση αυτή, η επίδραση του ήλιου είναι μεγαλύτερη. Όταν το PCM βρίσκεται στον ανατολικό τοίχο, υπάρχει μείωση κατά μέσο όρο 25% και όταν το PCM βρίσκεται στο δυτικό τοίχο, υπάρχει μείωση κατά μέσο όρο 24%. Η χαμηλότερη μείωση, κατά μέσο όρο 5%, επιτυγχάνεται όταν το PCM βρίσκεται στο βόρειο τοίχο. Πρακτικά, το PCM συμβάλλει στο να μην επηρεάζεται πολύ

η θερμοκρασία του τοίχου από την ηλιακή ακτινοβολία στην εξωτερική επιφάνεια. Επιπλέον, η χρήση PCM βοηθά τους τοίχους ακτινοβολίας να διατηρούν σχετικά χαμηλή θερμοκρασία εξαιτίας του ψυχρού νερού που ρέει μέσα τους. Έτσι, υπάρχει η "αποθήκευση ψύξης" στους τοίχους λόγω του PCM, το οποίο μειώνει τις διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και μειώνει τα ψυκτικά φορτία του κτηρίου.



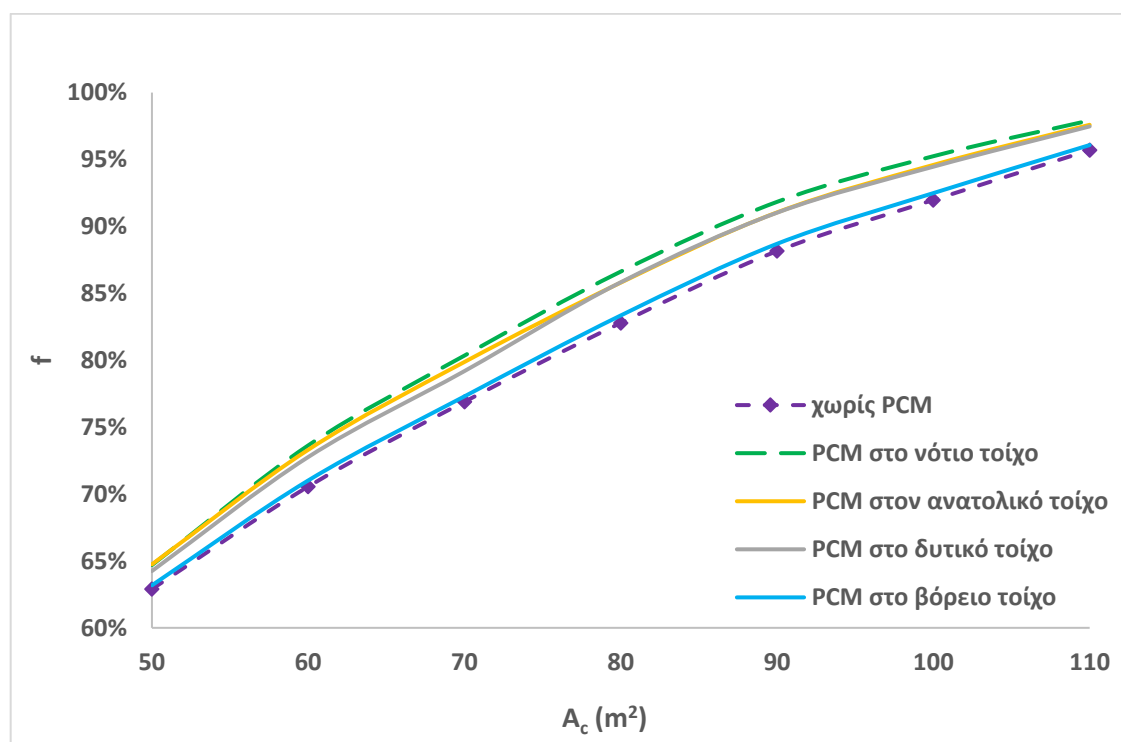
Διάγραμμα 8.2.6: Κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας (Q_{aux}) για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος χωρίς PCM και των συστημάτων με PCM σε κάθε τοίχο.

Το διάγραμμα 8.2.7 δείχνει την ηλιακή κάλυψη για διάφορες συλλεκτικές επιφάνειες χωρίς και με PCM σε κάθε τοίχο. Παρατηρείται ότι για μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες, η ηλιακή κάλυψη αυξάνεται. Επιπλέον, η χρήση του στρώματος PCM αυξάνει την ηλιακή κάλυψη λόγω των μικρότερων αναγκών για ψύξη του κτηρίου. Αναλυτικότερα, όταν το PCM βρίσκεται στο νότιο τοίχο, η ηλιακή κάλυψη αυξάνεται κατά 3.8%, στον ανατολικό κατά 3.2%, στο δυτικό κατά 2.8% και στο βόρειο τοίχο κατά 0.6%. Έτσι, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η καλύτερη θέση του στρώματος PCM είναι όταν βρίσκεται στο νότιο τοίχο.

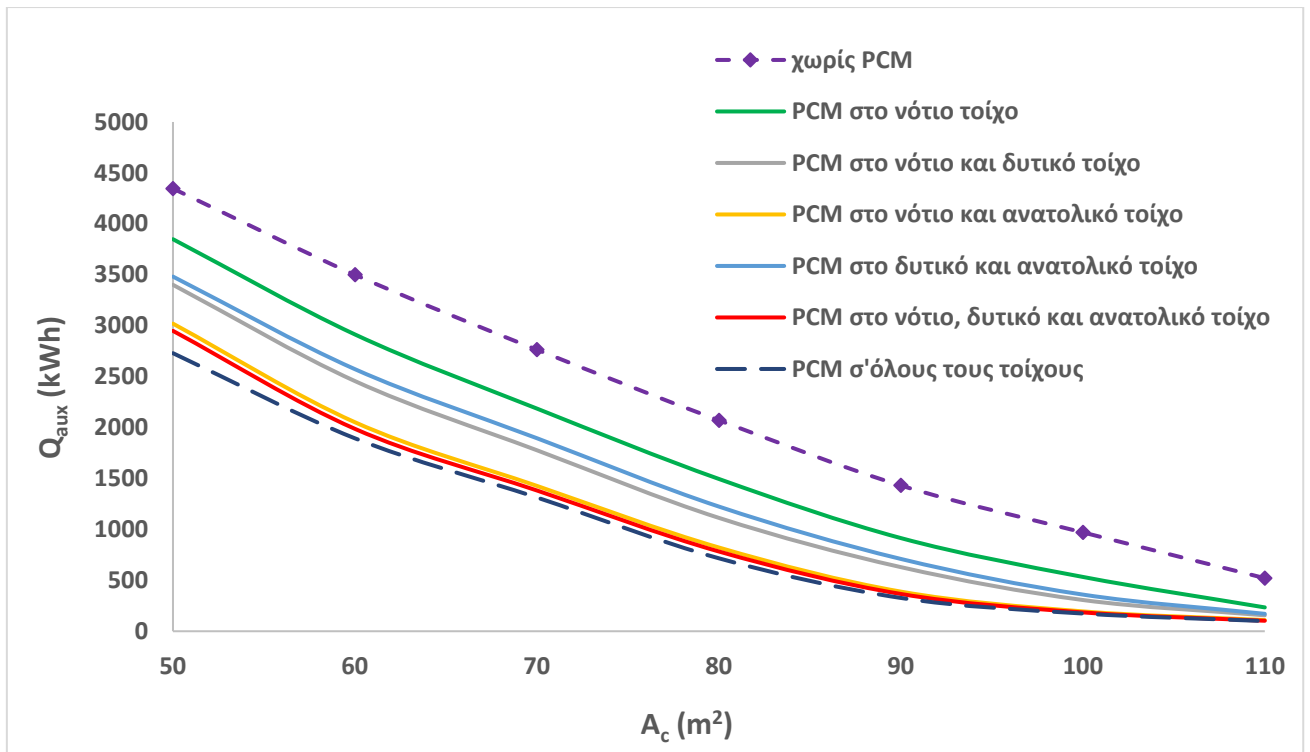
Το διάγραμμα 8.2.8 απεικονίζει την κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας και το διάγραμμα 8.2.9 την ηλιακή κάλυψη του συστήματος χωρίς και με PCM σε συνδυασμούς

τοιχών. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (κατά μέσο όρο 63%) επιτυγχάνεται όταν το στρώμα PCM τοποθετείται σε όλους τους τοίχους. Η διαφορά στη μείωση της ενέργειας μεταξύ του PCM σε όλους τους τοίχους, σε τρεις τοίχους (νότιο, δυτικό, ανατολικό) και σε δύο τοίχους (νότιο, ανατολικό) είναι περίπου 2.6% - 4.0% αντίστοιχα.

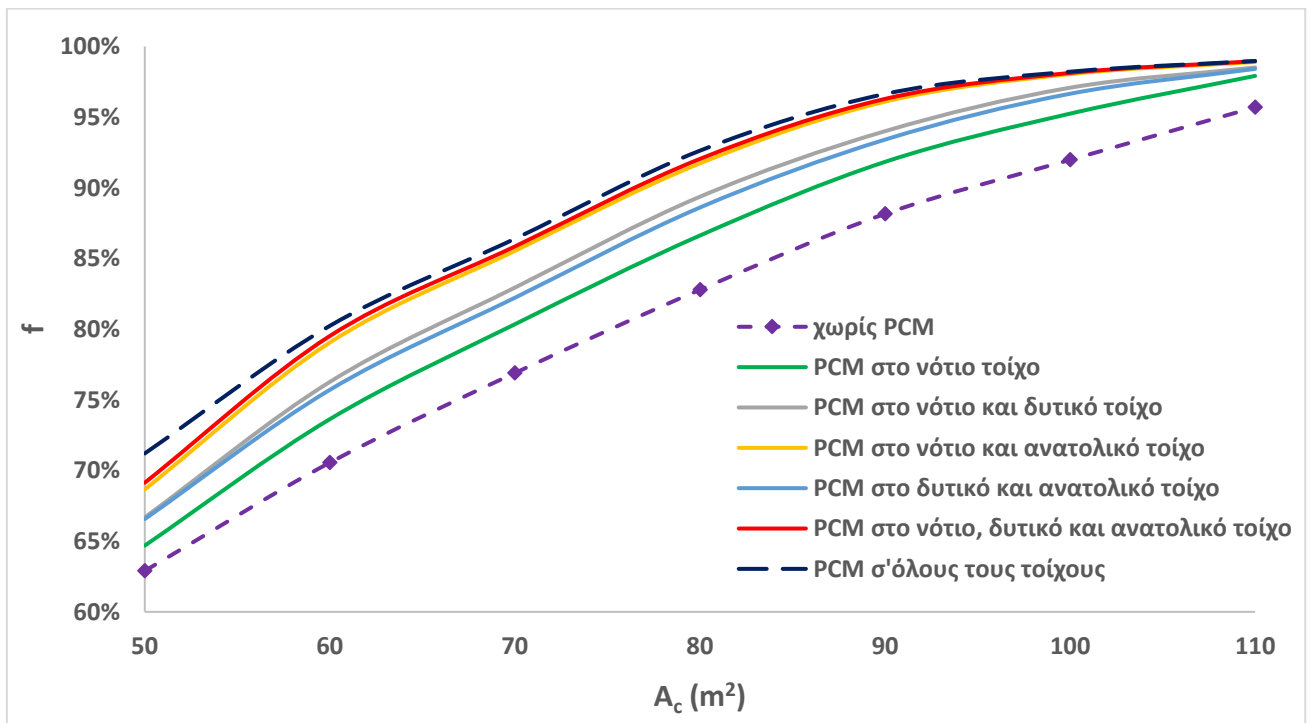
Όσον αφορά την ηλιακή κάλυψη, παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη αύξηση (κατά μέσο όρο 10%) επιτυγχάνεται όταν το στρώμα PCM τοποθετείται σε όλους τους τοίχους. Η διαφορά της ηλιακής κάλυψης μεταξύ του PCM σε όλους τους τοίχους, σε τρεις τοίχους (νότιο, δυτικό, ανατολικό) και σε δύο τοίχους (νότιο, ανατολικό) είναι ανεπαίσθητη και περίπου 0.9–1.2% αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι οι καμπύλες στα διαγράμματα 8.2.8 και 8.2.9 δείχνουν ότι μετά από τα 80m² συλλεκτικής επιφάνειας, το ποσοστό της μείωσης και της αύξησης αντίστοιχα είναι μικρότερο. Έτσι, η βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια είναι κάτω από 80 m². Η συλλεκτική επιφάνεια των 60 m² επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη αύξηση (περίπου 9.7%) της ηλιακής κάλυψης.



Διάγραμμα 8.2.7: Ηλιακή κάλυψη (f) για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος χωρίς PCM και των συστημάτων με PCM σε κάθε τοίχο.



Διάγραμμα 8.2.8: Κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας (Q_{aux}) για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος χωρίς PCM και των συστημάτων με PCM σε συνδυασμό τοίχων.



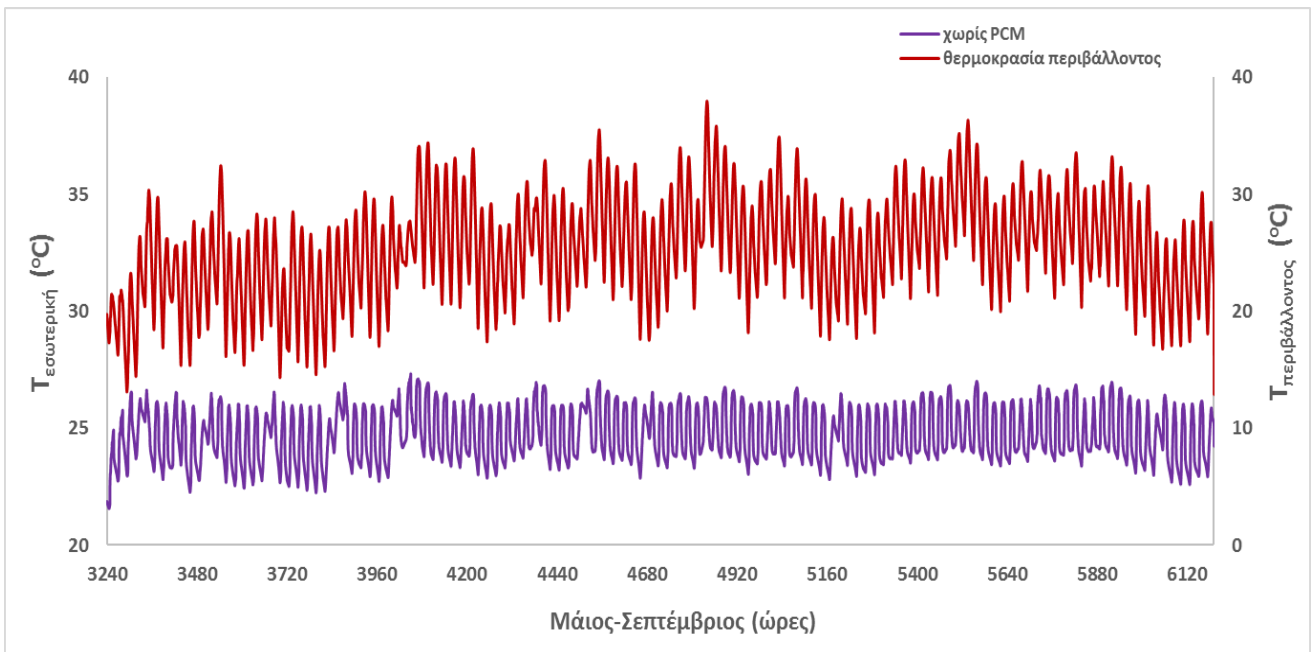
Διάγραμμα 8.2.9: Ηλιακή κάλυψη (f) για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος χωρίς PCM και των συστημάτων με PCM σε συνδυασμό τοίχων.

B) Διακύμανση εσωτερικών θερμοκρασιών

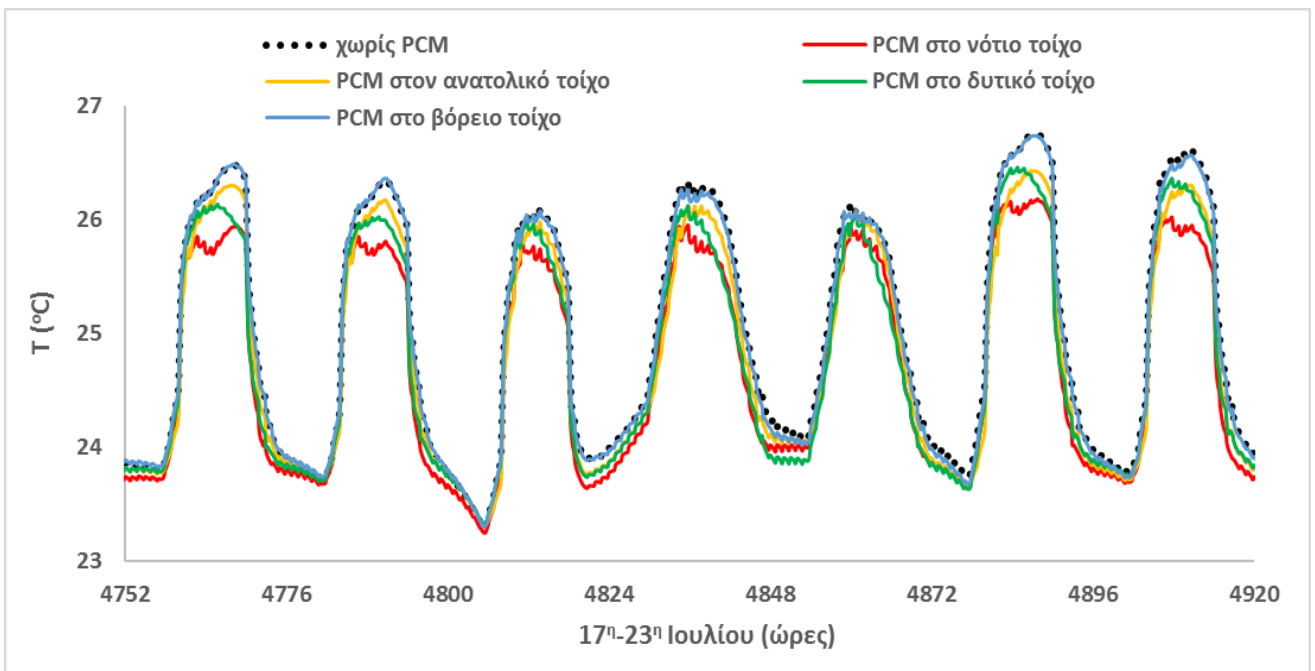
Η εσωτερική θερμοκρασία του κτηρίου το καλοκαίρι πρέπει να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες θερμικής άνεσης. Το διάγραμμα 8.2.10 απεικονίζει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη θερινή περίοδο (Μάιος-Σεπτέμβριος) στην Αθήνα για το σύστημα χωρίς PCM σε σύγκριση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος για την ίδια περίοδο. Είναι προφανές ότι με τη χρήση του συστήματος ψύξης, η εσωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και κοντά στα όρια θερμικής άνεσης. Το διάγραμμα 8.2.11 δείχνει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας για τα συστήματα ψύξης χωρίς και με ένα στρώμα PCM σε κάθε τοίχο κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας (17^η-23^η Ιουλίου) του καλοκαιριού. Η χαμηλότερη εσωτερική θερμοκρασία επιτυγχάνεται όταν το στρώμα PCM βρίσκεται στο νότιο τοίχο. Στο διάγραμμα 8.2.12, οι διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων PCM σε κάθε τοίχο είναι πιο ορατές. Έτσι, το διάγραμμα αυτό απεικονίζει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (20^η Ιουλίου) του καλοκαιριού. Παρατηρείται ότι οι διαφορές θερμοκρασίας είναι ανεπαίσθητες. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή του στρώματος PCM στο νότιο τοίχο δίνει μια μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά μέσο όρο σε 0.3°C. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι οι αποκλίσεις των επιπέδων εσωτερικής θερμοκρασίας μεταξύ των εξεταζόμενων περιπτώσεων δεν είναι τόσο υψηλές, αλλά οι αντίστοιχες αποκλίσεις ψυκτικού φορτίου είναι σημαντικές.

Το διάγραμμα 8.2.13 απεικονίζει τη διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας (17^η-23^η Ιουλίου) για το σύστημα χωρίς και τα συστήματα με PCM σε συνδυασμούς τοίχων. Η παρατήρηση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η χαμηλότερη εσωτερική θερμοκρασία επιτυγχάνεται όταν το στρώμα PCM βρίσκεται σε όλους τους τοίχους και η υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασία επιτυγχάνεται όταν δεν υπάρχει στρώμα PCM. Η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας για όλες τις περιπτώσεις είναι σαφέστερη στο διάγραμμα 8.2.14 το οποίο απεικονίζει τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (20^η Ιουλίου). Η εφαρμογή του στρώματος PCM σε τρεις τοίχους (νότιο, δυτικό, ανατολικό) και σε όλους τους τοίχους δίνει μεγαλύτερη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά μέσο όρο σε 0.6°C. Αναλυτικότερα, το διάγραμμα 8.2.15 δείχνει την ελάχιστη, τη μέγιστη και τη μέση τιμή της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη θερινή περίοδο στην Αθήνα για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

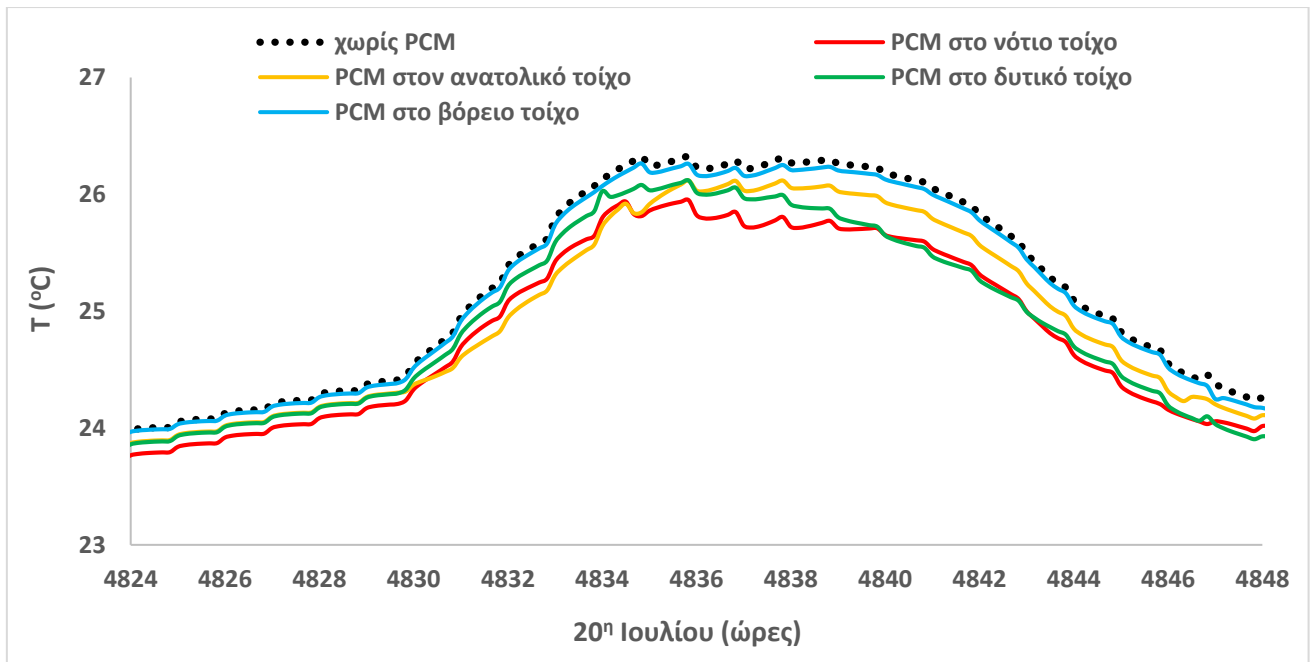
Τέλος, μπορεί να ειπωθεί ότι όλες οι εξεταζόμενες περιπτώσεις παρέχουν αποδεκτή εσωτερική θερμοκρασία στα όρια της θερμικής άνεσης.



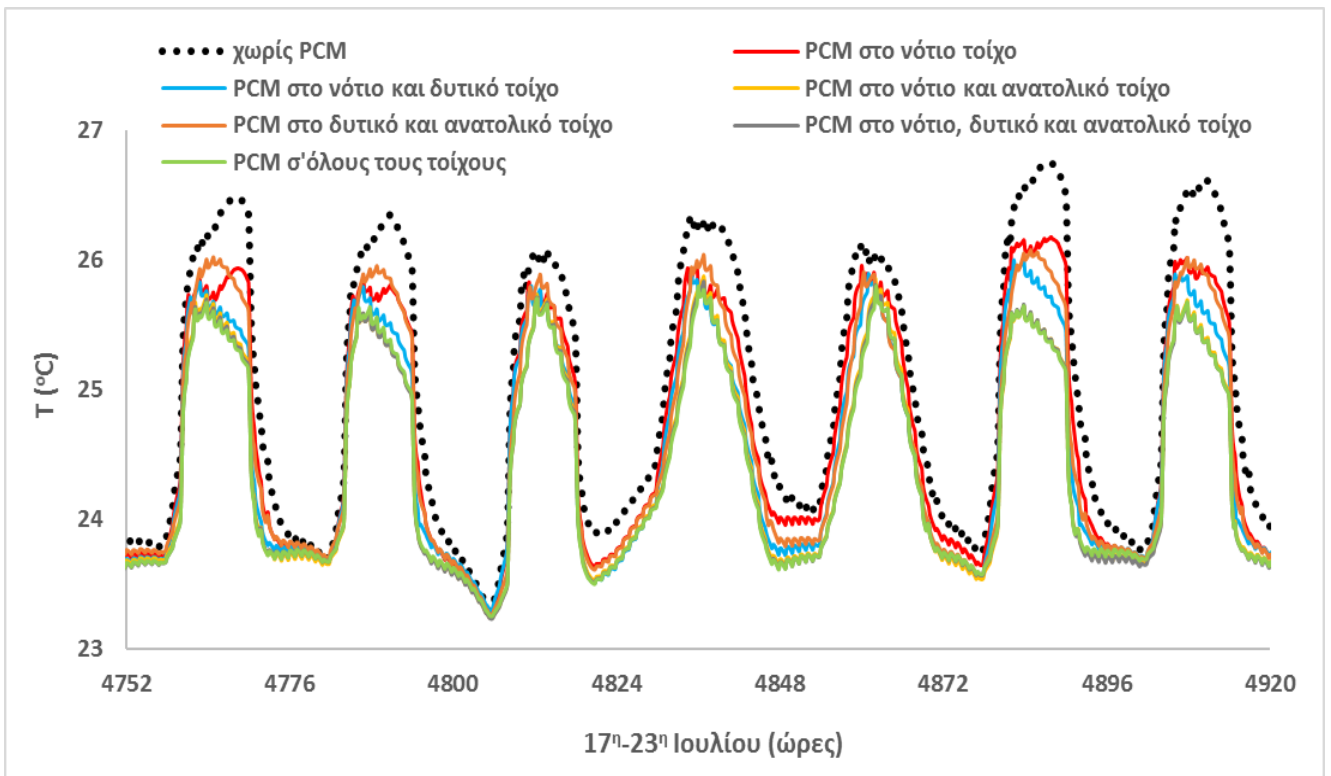
Διάγραμμα 8.2.10: Εσωτερική θερμοκρασία κτηρίου με το σύστημα χωρίς PCM και η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη θερινή περίοδο στην Αθήνα.



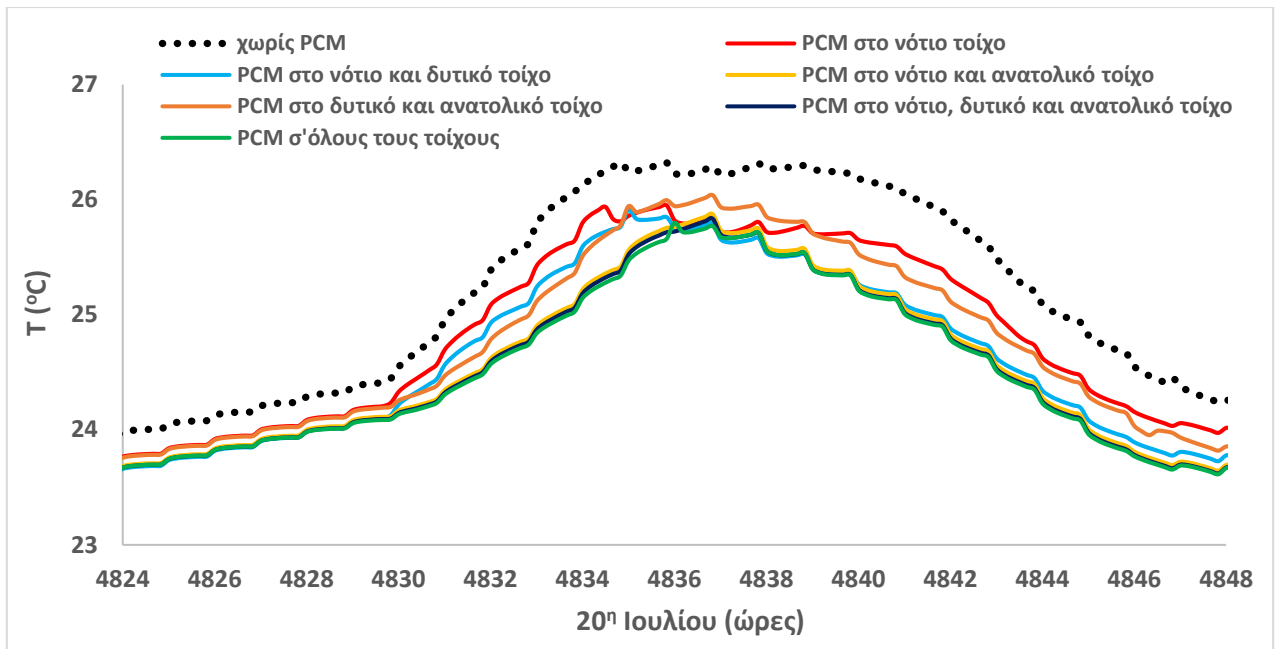
Διάγραμμα 8.2.11: Διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας (17^η -23^η Ιουλίου) με το σύστημα χωρίς PCM και με τα συστήματα με PCM σε κάθε τοίχο.



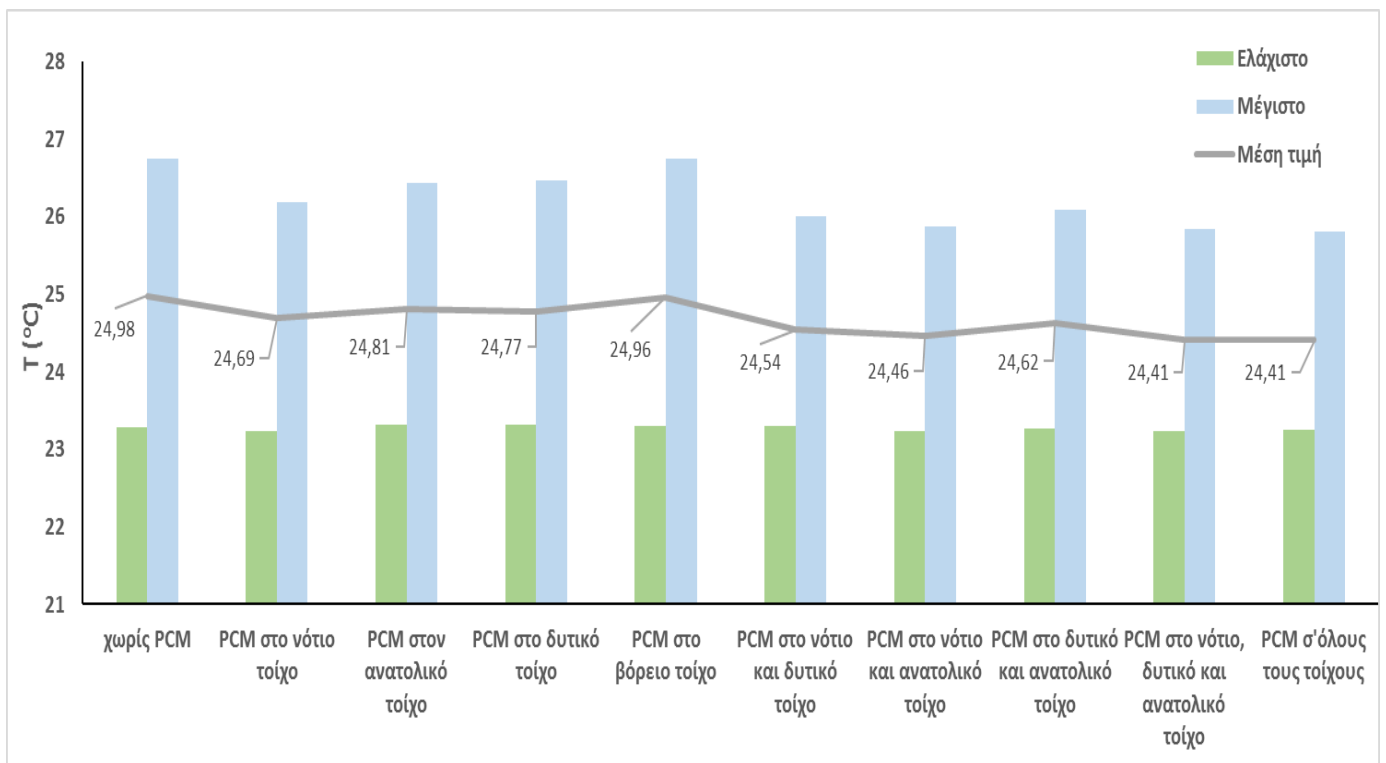
Διάγραμμα 8.2.12: Διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας για μια ημέρα (20^η Ιουλίου) με το σύστημα χωρίς PCM και με τα συστήματα με PCM σε κάθε τοίχο.



Διάγραμμα 8.2.13: Διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας (17^η -23^η Ιουλίου) με το σύστημα χωρίς PCM και με τα συστήματα με PCM σε συνδυασμό τοίχων.



Διάγραμμα 8.2.14: Διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας για μια ημέρα (20^η Ιουλίου) με το σύστημα χωρίς PCM και με τα συστήματα με PCM σε συνδυασμό τοίχων.



Διάγραμμα 8.2.15: Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου κατά τη θερινή περίοδο στην Αθήνα για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

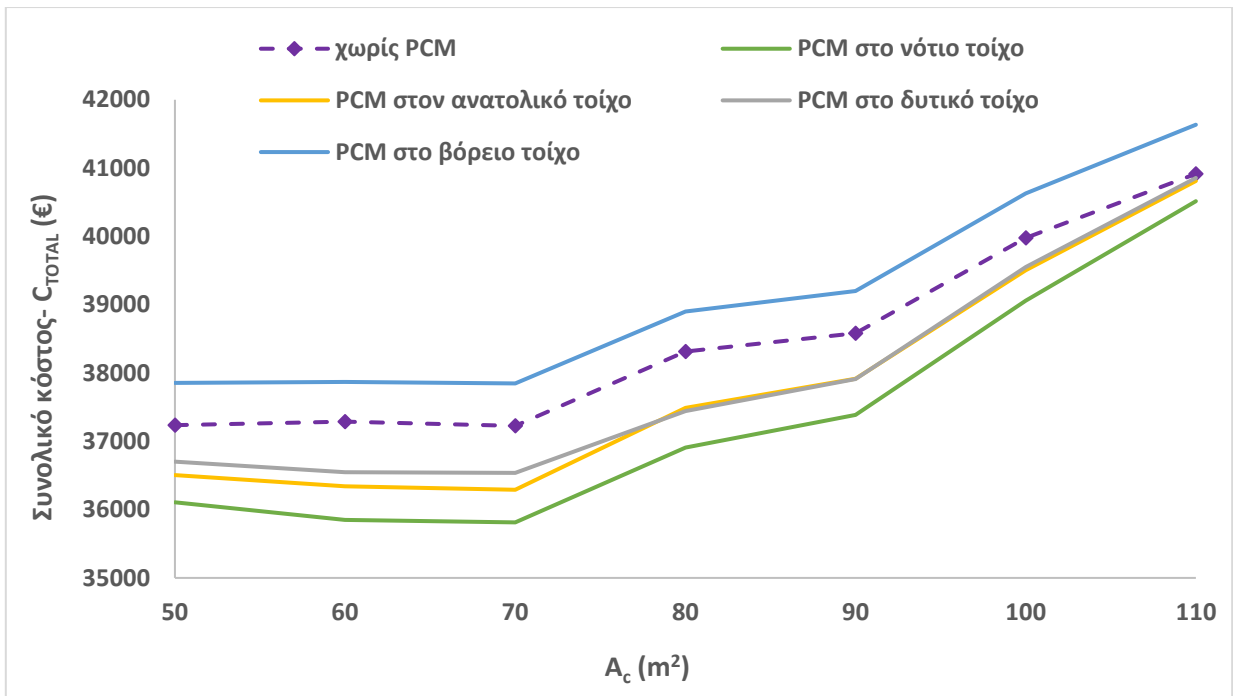
Γ) Οικονομική αξιολόγηση των εξεταζόμενων συστημάτων

Η οικονομική αξιολόγηση όλων των εξεταζόμενων περιπτώσεων δίνεται σε αυτή την παράγραφο. Το διάγραμμα 8.2.16 απεικονίζει το συνολικό κόστος (C_{total}) των συστημάτων χωρίς και με PCM σε κάθε τοίχο. Παρατηρείται ότι το στρώμα PCM στο βόρειο τοίχο οδηγεί σε υψηλότερο συνολικό κόστος ενώ το στρώμα PCM στο νότιο τοίχο οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Έτσι, όταν το PCM βρίσκεται στο βόρειο τοίχο, υπάρχει αύξηση του συνολικού κόστους σε σύγκριση με το σύστημα χωρίς PCM περίπου 2%.

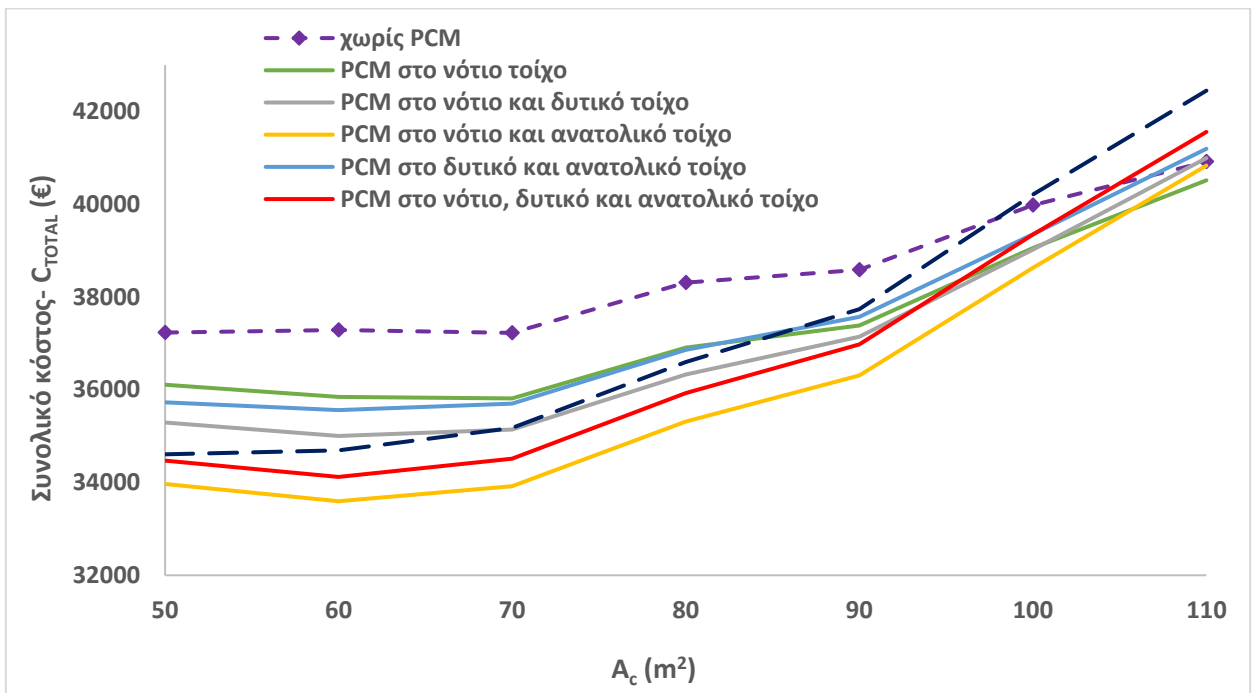
Όταν το PCM βρίσκεται σε άλλους τοίχους, υπάρχει μείωση του συνολικού κόστους. Η μεγαλύτερη μείωση είναι όταν το PCM βρίσκεται στο νότιο τοίχο και είναι κατά μέσο όρο 3%. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή, για την συλλεκτική επιφάνεια των 60 m², επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη μείωση στο συνολικό κόστος περίπου 3.9%. Ο λόγος για την αύξηση του κόστους όταν χρησιμοποιείται το PCM στο βόρειο τοίχο βασίζεται στη μικρή μείωση της κατανάλωσης της βοηθητικής ενέργειας που δεν είναι σε θέση να αντισταθμίσει το υψηλότερο επενδυτικό κόστος που οφείλεται στη χρήση του PCM.

Το διάγραμμα 8.2.17 δείχνει το συνολικό κόστος (C_{total}) των συστημάτων χωρίς και με PCM σε συνδυασμούς τοίχων. Για συλλεκτική επιφάνεια άνω των 90 m², το συνολικό κόστος αυξάνεται και συνεπώς η επένδυση σε ένα σύστημα με PCM είναι ασύμφορη. Για την συλλεκτική επιφάνεια των 90 m², υπάρχει μείωση του συνολικού κόστους. Η μεγαλύτερη μείωση (κατά μέσο όρο 6.4%) επιτυγχάνεται όταν το PCM βρίσκεται στο νότιο και στον ανατολικό τοίχο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι σε αυτή την περίπτωση, για την συλλεκτική επιφάνεια των 60 m², υπάρχει η μεγαλύτερη μείωση του συνολικού κόστους (κατά μέσο όρο 6.7%) για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα με PCM σε σύγκριση με το σύστημα χωρίς PCM.

Τέλος, η μείωση του συνολικού κόστους με τη χρήση του στρώματος PCM είναι εύλογη επειδή μειώνει την κατανάλωση ενέργειας.



Διάγραμμα 8.2.16: Συνολικό κόστος (C_{total}) για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος χωρίς PCM και των συστημάτων με PCM σε κάθε τοίχο.



Διάγραμμα 8.2.17: Συνολικό κόστος (C_{total}) για διαφορετικές συλλεκτικές επιφάνειες του συστήματος χωρίς PCM και των συστημάτων με PCM σε συνδυασμό τοίχων.

8.2.7. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα δείχνουν σαφώς ότι η εφαρμογή του στρώματος PCM στους τοίχους ακτινοβολίας οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η καλύτερη θέση του στρώματος PCM είναι στο νότιο τοίχο σε σύγκριση με τους άλλους τοίχους. Επιπλέον, οι καμπύλες ηλιακής κάλυψης δείχνουν ότι η συλλεκτική επιφάνεια των 60 m² επιτυγχάνει την υψηλότερη αύξηση (περίπου 9.7%) με τη χρήση του στρώματος PCM σε όλους τους εξεταζόμενους συνδυασμούς τοίχων. Η οικονομική αξιολόγηση των συστημάτων δείχνει ότι για την συλλεκτική επιφάνεια των 60 m² επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη μείωση του συνολικού κόστους (κατά μέσο όρο 6.7%) για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα με PCM σε σύγκριση με το σύστημα χωρίς PCM. Ο Πίνακας 8.2.4 συνοψίζει τα αποτελέσματα των περιπτώσεων για την συλλεκτική επιφάνεια των 60 m². Επιπλέον, τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου δείχνουν ότι η χρήση του στρώματος PCM δίνει μια αποδεκτή εσωτερική θερμοκρασία στα όρια της θερμικής άνεσης.

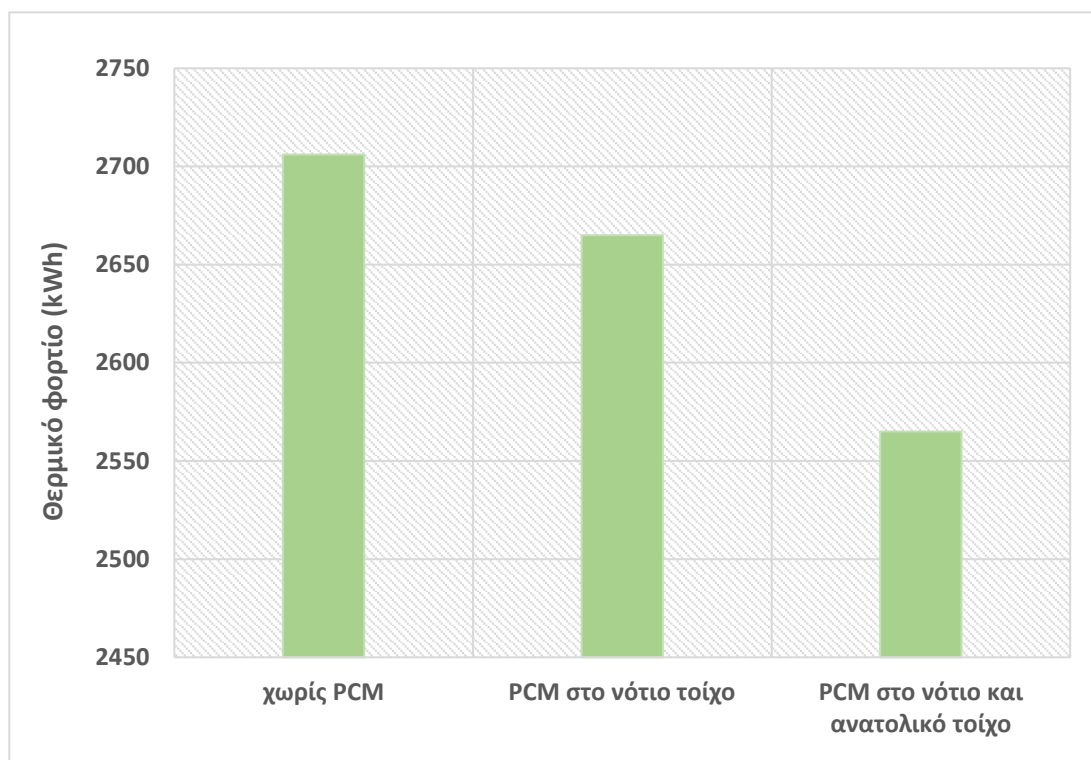
Πίνακας 8.2.4: Σύνοψη αποτελεσμάτων των περιπτώσεων με συλλεκτική επιφάνεια 60 m².

Περιπτώσεις	Κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας Q_{aux} (kWh)	Ηλιακή κάλυψη f	Συνολικό κόστος C_{total} (€)
Σύστημα χωρίς PCM	3500	70.50%	37289
Σύστημα με PCM στο νότιο τοίχο	2914	73.60%	35848
Σύστημα με PCM στο δυτικό τοίχο	3072	72.80%	36549
Σύστημα με PCM στον ανατολικό τοίχο	3012	73.30%	36340
Σύστημα με PCM στο βόρειο τοίχο	3408	71.00%	37869
Σύστημα με PCM στο νότιο και δυτικό τοίχο	2456	76.20%	35003
Σύστημα με PCM στο νότιο και ανατολικό τοίχο	2052	79.10%	33596
Σύστημα με PCM στο δυτικό και ανατολικό τοίχο	2573	75.70%	35561
Σύστημα με PCM στο νότιο, δυτικό και ανατολικό τοίχο	1987	79.50%	34120
Σύστημα με PCM σ' όλους τους τοίχους	1894	80.20%	34696

8.2.8. Ετήσια λειτουργία των συστημάτων

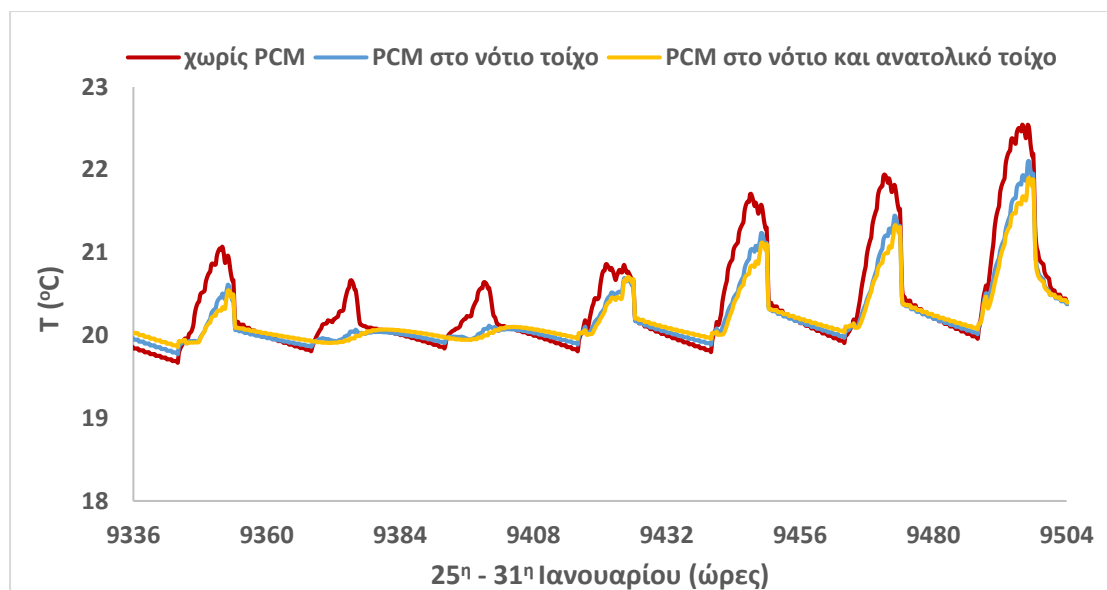
Το εξεταζόμενο σύστημα ψύξης λειτουργεί μόνο το καλοκαίρι. Τη χειμερινή περίοδο το σύστημα ψύξης ακτινοβολίας είναι κλειστό αλλά στους τοίχους υπάρχει το στρώμα PCM. Στη συνέχεια γίνεται μια μελέτη για την εύρεση των θερμικών φορτίων τη

χειμερινή περίοδο (Νοέμβριος- Μάρτιος) για τις οικονομικά βέλτιστες περιπτώσεις που είναι η χρήση του PCM μόνο στο νότιο ή στο νότιο και στον ανατολικό τοίχο. Έτσι, το διάγραμμα 8.2.18 δείχνει τα θερμικά φορτία για τις περιπτώσεις χωρίς PCM, με PCM μόνο στο νότιο τοίχο και με PCM στο νότιο και τον ανατολικό τοίχο. Παρατηρείται ότι με τη χρήση του PCM επιτυγχάνεται μια μείωση των θερμικών φορτίων κατά 1.6% με το PCM στο νότιο τοίχο και κατά 5.2% με το PCM στο νότιο και τον ανατολικό τοίχο.



Διάγραμμα 8.2.18: Ετήσια θερμικά φορτία χωρίς και με PCM.

Το διάγραμμα 8.2.19 δείχνει τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου μια εβδομάδα του ψυχρότερου μήνα του έτους, τον Ιανουάριο, όταν δεν υπάρχει PCM στους τοίχους, όταν υπάρχει μόνο στο νότιο τοίχο και όταν υπάρχει στο νότιο και τον ανατολικό τοίχο. Σημειώνεται ότι ο θερμοστάτης του χώρου για το χειμώνα είναι στους 20°C. Η σύγκριση των διακυμάνσεων δείχνει ότι με τη χρήση του PCM στους τοίχους η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι ομαλότερη. Συγκεκριμένα, όταν υπάρχει PCM στο νότιο τοίχο η θερμοκρασία φτάνει τους 22.1°C και όταν υπάρχει PCM στο νότιο και τον ανατολικό τοίχο η θερμοκρασία φτάνει τους 21.8°C. Χωρίς PCM η θερμοκρασία φτάνει τους 22.5°C.



Διάγραμμα 8.2.19: Η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας για διαφορετικές περιπτώσεις κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας (25^η -31^η Ιανουαρίου).

8.2.9. Συμπεράσματα

Η μελέτη αυτή ερευνά ενεργειακά και οικονομικά ένα ηλιακό σύστημα ψύξης με και χωρίς ενσωματωμένο PCM στα δομικά στοιχεία ακτινοβολίας ενός κτηρίου. Το κτήριο έχει εμβαδόν 100 m² και βρίσκεται στην Αθήνα. Το στρώμα PCM τοποθετείται σε κάθε τοίχο ξεχωριστά και στη συνέχεια σε συνδυασμούς. Το εξεταζόμενο κτήριο έχει ετήσια ζήτηση ψύξης περίπου 52 kWh/m² σύμφωνα με τους υπολογισμούς με το λογισμικό TRNSYS. Οι διάφορες περιπτώσεις εξετάζονται με αλλαγή της συλλεκτικής επιφάνειας και των όγκων του δοχείου αποθήκευσης. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της μελέτης έχουν δημοσιευθεί από τη συγγραφέα [8.55]. Τα κύρια συμπεράσματα είναι τα εξής:

- Η ενσωμάτωση του PCM στους τοίχους ακτινοβολίας μειώνει την κατανάλωση ενέργειας του κτηρίου.
- Η ενσωμάτωση του PCM στο νότιο τοίχο είναι η καλύτερη επιλογή μεταξύ των τεσσάρων εξωτερικών τοίχων. Σε αυτή την περίπτωση, η μείωση της βοηθητικής ενέργειας είναι 30%, η αύξηση της ηλιακής κάλυψης είναι 3.8% και η μείωση του συνολικού κόστους περίπου 3%.
- Η συλλεκτική επιφάνεια των 60 m² επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη αύξηση της ηλιακής κάλυψης με χρήση PCM που είναι περίπου 9.7%. Επιπλέον, για την ίδια συλλεκτική επιφάνεια, επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη μείωση του συνολικού κόστους

(κατά μέσο όρο 6.7%) για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα με PCM σε σύγκριση με το σύστημα χωρίς PCM.

- Στις περιπτώσεις με χρήση PCM σε συνδυασμό τοίχων, η μεγαλύτερη μείωση του συνολικού κόστους (κατά μέσο όρο 6.4%) επιτυγχάνεται όταν το PCM βρίσκεται στο νότιο και στον ανατολικό τοίχο.
- Η εφαρμογή του στρώματος PCM στο νότιο τοίχο προκαλεί μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά μέσο όρο 0.3°C ενώ η εφαρμογή του στρώματος PCM στο νότιο και ανατολικό τοίχο προκαλεί μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά μέσο όρο 0.5°C. Η εφαρμογή του στρώματος PCM σε τρεις τοίχους (νότιο, δυτικό, ανατολικό) και σε όλους τους τοίχους δίνει τη μεγαλύτερη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας που είναι κατά μέσο όρο 0.6°C.

8.3 Ψύξη κτηρίου με πάνελ οροφής και PCM

8.3.1 Γενικά

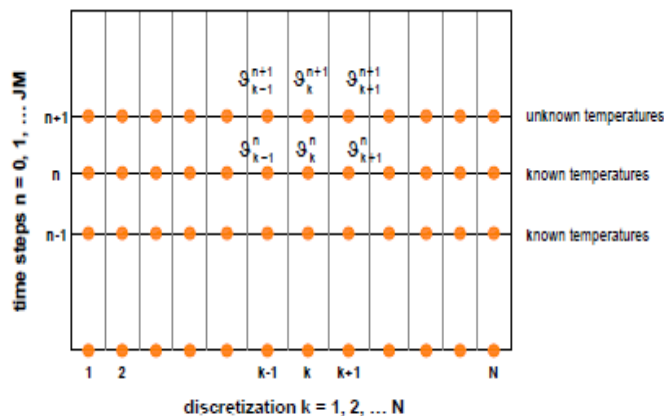
Ο συνδυασμός συστήματος ψύξης όπως πάνελ ψύξης οροφής (ψυχόμενη οροφή-chilled ceiling) και η αποθήκευση ψύξης μέσω των PCM είναι μια υποσχόμενη και πρωτότυπη τεχνολογία ψύξης. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν μερικές μελέτες για συστήματα ψύξης οροφής σε συνδυασμό με PCM. Για παράδειγμα, οι Boiting και Hollenbeck [8.56] ερεύντησαν μια ψυχόμενη οροφή με πιεσμένο PCM πάνω σε σπείρες σωληνώσεων και συνέστησαν να γίνουν περαιτέρω δυναμικές θερμικές μελέτες για μια πιο ακριβή εκτίμηση του πώς επιδρά το PCM στην οροφή. Οι Klinker et al. [8.57] διερεύνησαν τη δυναμική συμπεριφορά πρωτότυπων ψυχόμενων πάνελ με PCM. Αυτά τα πρωτότυπα πάνελ εγκαταστάθηκαν στα νέα γραφεία του Κέντρου Ενεργειακής Έρευνας και Απόδοσης (EEC) στο Würzburg στην Γερμανία [8.58-8.59]. Αυτές οι πρωτότυπες τεχνολογίες μελετώνται όχι μόνο όσον αφορά την ενεργειακή τους απόδοση [8.60-8.61], αλλά και όσον αφορά τη συμπεριφορά, την άνεση των χρηστών και την αποδοχή τους από αυτούς [8.62].

8.3.2 Μοντέλο (Type) 399 του PCM

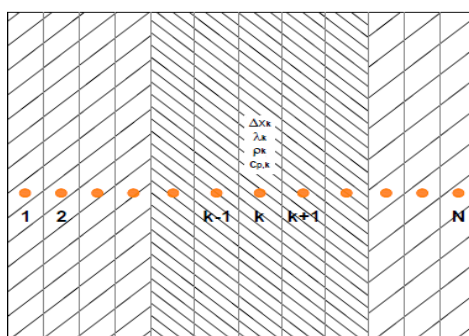
A) Γενική περιγραφή

Το μοντέλο (Type) 399 του TRNSYS μοντελοποιεί υλικά αλλαγής φάσης (PCM) που βρίσκονται μέσα σε τοιχοποιία. Αυτό το μοντέλο μοντελοποιεί παθητικά και ενεργά

συστήματα και είναι επικυρωμένο από τις πειραματικές μελέτες των Dentel et al. [8.63-8.64]. Η δομή των τοίχων μοντελοποιείται με τον αλγόριθμο Crank-Nicolson (εικόνα 8.3.1) και με την μέθοδο της απαλοιφής Gauss για την επίλυση της εξίσωσης της θερμικής αγωγιμότητας. Το σύστημα είναι μονοδιάστατο. Ο αριθμός των κόμβων εξαρτάται από το πάχος κάθε στρώματος. Μια δομή τοίχου φαίνεται στην εικόνα 8.3.2.



Εικόνα 8.3.1: Μονοδιάστατη διάταξη Crank-Nicolson [8.66].



Εικόνα 8.3.2: Μονοδιάστατο μοντέλο τοίχου με τρία διαφορετικά στρώματα (layers) και N υποστρώματα [8.66].

Το στρώμα PCM μπορεί να είναι οπουδήποτε στην κατασκευή. Ενεργητικά συστήματα (TABS) μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη μέθοδο των θερμικών αντιστάσεων έτσι για παράδειγμα είναι δυνατή η προσομοίωση πάνελ οροφής για ψύξη. Δεν υπάρχει κάποιος αλγόριθμος για την προσομοίωση των σωληνώσεων. Το σύστημα σωληνώσεων είναι σταθερά συνδεδεμένο στον πρώτο κόμβο της πρώτης στρώσης υλικού. Επιπλέον το Type 399 έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιεί τη θερμοχωρητικότητα του PCM που εξαρτάται από τη θερμοκρασία καθώς και να μοντελοποιεί το φαινόμενο της υστέρησης του PCM [8.65]. Ορισμένα υλικά PCM έχουν διαφορετικές καμπύλες ενθαλπίας για θέρμανση και ψύξη.

Β) Μοντελοποίηση της αλλαγής φάσης

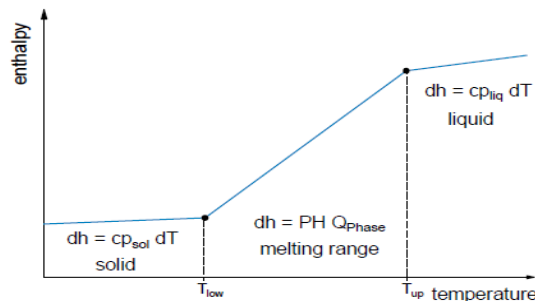
Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για να μοντελοποιηθεί η αλλαγή φάσης του PCM. Η μοντελοποίηση του PCM, χρησιμοποιώντας την ειδική θερμοχωρητικότητα και τη θερμοκρασία του υλικού που βγαίνει από την καμπύλη DSC, μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβειες στα αποτελέσματα προσομοίωσης [8.65], αν ο αλγόριθμος δε δίνει προσοχή στη φάση του υλικού (στερεό, εν μέρει τηγμένο ή πλήρως τηγμένο) και τη ροή ενέργειας (θέρμανση ή ψύξη). Το Type 399, για τη μοντελοποίηση της αλλαγής φάσης του PCM, χρησιμοποιεί την ενθαλπία ως αντιστρέψιμη συνάρτηση της θερμοκρασίας:

$$h=h(T), T=T(h)$$

Η προσέγγιση της αλλαγής φάσης με υστέρηση έγινε σύμφωνα με τον Glück [8.67]. Για την ενθαλπία ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις και το διάγραμμα 8.3.3.

$$h(T) = \begin{cases} c_{p,solid} \cdot T & T < T_{low} \\ c_{p,solid} \cdot T_{low} + PH \cdot Q_{Phase} & T_{low} \geq T \geq T_{up} \\ c_{p,solid} \cdot T + Q_{Phase} + c_{p,liquid} \cdot (T - T_{up}) & T > T_{up} \end{cases} \quad (8.3.1)$$

$$\text{όπου } PH = \frac{T - T_{low}}{T_{up} - T_{low}} \quad (8.3.2)$$



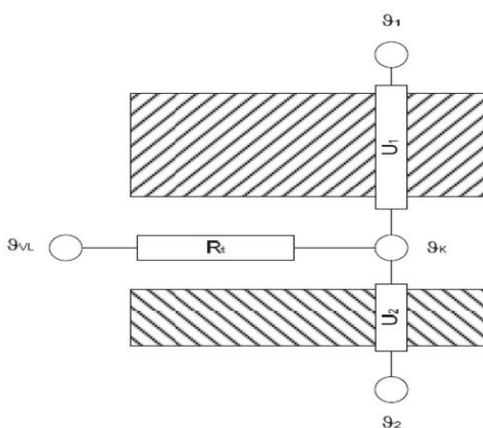
Διάγραμμα 8.3.3: Ειδική ενθαλπία $h(T)$ συναρτήσει της θερμοκρασίας του υλικού [8.66].

Γ) Μοντελοποίηση του συστήματος σωληνώσεων

Το Type 399 μπορεί να μοντελοποιήσει θερμικά ενεργητικά συστήματα κτηρίου (TABS) όπως πάνελ οροφής για ψύξη. Ο αλγόριθμος που μοντελοποιεί τους ενσωματωμένους σωλήνες στους τοίχους (πάτωμα, οροφή, κάθετοι τοίχοι) έχει αναπτυχθεί από τους Koschenz et al. [8.69], οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα δίκτυο θερμικών αντιστάσεων για να μοντελοποιήσουν ένα σύστημα σωληνώσεων (εικόνα 8.3.4). Η συνολική αντίσταση (R_t) μεταξύ της θερμοκρασίας παροχής του ψυχόμενου

πάνελ οροφής (ή το TABS) και της θερμοκρασίας πυρήνα του υλικού είναι μια σειριακή σύζευξη μεμονωμένων αντιστάσεων. Κάθε μια αντίσταση περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των σωληνώσεων του συστήματος TABS: το πλάτος του πάνελ (R_z), τη ροή θερμότητας μεταξύ σωλήνα και νερού (R_w , R_r) και η απόσταση και η διάμετρος του σωλήνα (R_x).

Επιπλέον, η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας παροχής (θ_{VL}), της θερμοκρασίας του πυρήνα του υλικού (θ_K), της θερμοκρασίας των χώρων που περιβάλλουν το ενεργό στρώμα (θ_1, θ_2), τις αντιστάσεις όλου του συστήματος σωληνώσεων (R_t) και τις αντιστάσεις των τοίχων (U_1, U_2), φαίνεται στην εικόνα 8.3.4.



Εικόνα 8.3.4: Δίκτυο αντίστασης [8.66].

Επιπλέον, με τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds (Re), το Type 399 κάνει έναν αυτόματο διαχωρισμό μεταξύ των συστημάτων TABS, τα οποία ενσωματώνονται στην μοντελοποίηση με τις εξισώσεις που φαίνονται στον πίνακα 8.3.1.

Πίνακας 8.3.1: Εξισώσεις ενεργού στρώματος στο Type 399 [8.68].

$(Re \leq 2300)$	$(Re > 2300)$
$R_t = R_z + R_w + R_r + R_x$	
$R_z = \frac{1}{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{pW}}$	
$R_r = \frac{d_x \cdot \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma - 2 \cdot d_r}\right)}{2 \cdot \lambda_r \cdot \pi}$	
$R_w = \frac{d_x}{\pi \cdot \lambda_w} \left(49,03 + 4,14 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\dot{m} \cdot c_{pW} \cdot d_x}{\lambda_w}\right)^{\frac{1}{3}}$	$R_w = d_x^{\frac{0,13}{8\pi}} \left(\frac{\sigma - 2 \cdot d_r}{\dot{m}}\right)^{0,87}$
$R_x = \frac{d_x^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d_x}{\pi \cdot \sigma}\right)}{2 \cdot \lambda_l \cdot \pi}$	$R_x = \frac{d_x \cdot \left(\frac{d_x}{\pi \cdot \sigma}\right)}{2 \cdot \lambda_l \cdot \pi}$

Οι εξισώσεις του πίνακα 8.3.1 ισχύουν μόνο για τις σχέσεις μεταξύ των διαμέτρων των σωλήνων, του πάχους και της απόστασης που φαίνονται στον πίνακα 8.3.2.

Πίνακας 8.3.2: Περιορισμοί στο δίκτυο αντίστασης για έγκυρη μοντελοποίηση [8.68].

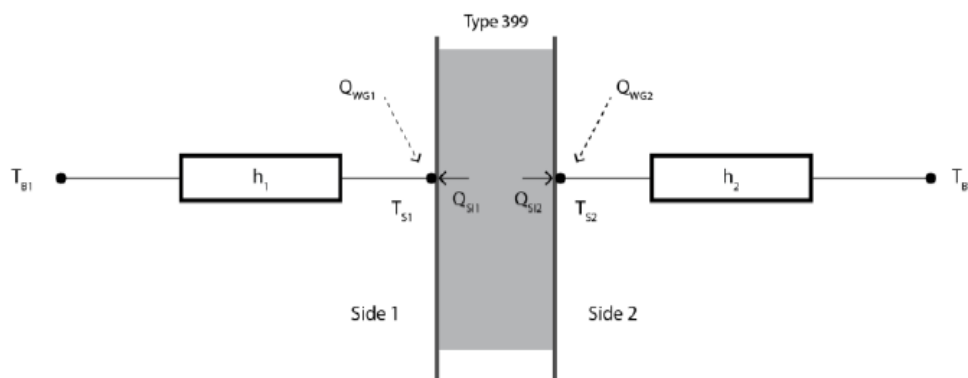
$Re \leq 2300$	$Re > 2300$	Και για τις δύο περιπτώσεις
$d_x < 5,8 \cdot \sigma$	$d_x \geq 5,8 \cdot \sigma$	$\frac{d_l}{d_x} > 0,3$ $\frac{\sigma}{d_x} < 0,2$

Δ) Σύνδεση του Type 399 με το μοντέλο κτηρίου (Type 56)

Η εικόνα 8.3.5 δείχνει την ενεργειακή ισορροπία στην επιφάνεια του Type 399. Για τη σύνδεση του μοντέλου 399 με το μοντέλο κτηρίου 56 χρειάζεται να ορισθούν είσοδοι όπως:

- T_{B1} – η οριακή θερμοκρασία της πλευράς 1 [°C]
- T_{B2} – η οριακή θερμοκρασία της πλευράς 2 [°C]
- h_1 – συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της πλευράς 1 [kJ/(hr m² K)]
- h_2 – συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της πλευράς 2 [kJ/(hr m² K)]
- Q_{WG1} – ενέργεια στην πλευρά 1 [kJ/hr]
- Q_{WG2} – ενέργεια στην πλευρά 2 [kJ/hr]

Οι τιμές αυτών των παραμέτρων εξαρτώνται από το που βρίσκεται η επιφάνεια του PCM. Στο μοντέλο του κτηρίου (Type56) ορίζεται μια επιφάνεια με μεγάλη αγωγιμότητα έτσι ώστε να μην περνά ενέργεια από τη μια πλευρά στην άλλη. Η ροή θερμότητας από το εσωτερικό προς στις δύο πλευρές της επιφάνειας δίνεται σαν έξοδος του Type 399 (Q_{S11}, Q_{S12}) και στη συνέχεια περνά σαν είσοδος στο μοντέλο του κτηρίου.

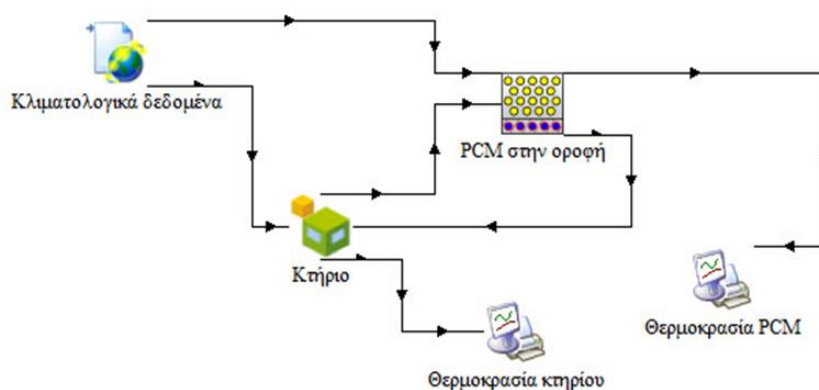


Εικόνα 8.3.5: Ενεργειακή ισορροπία της επιφάνειας του Type 399 [8.66].

8.3.3 Προσομοίωση συστήματος πάνελ οροφής-PCM για ψύξη κτηρίου

A) Γενικά

Στην παρούσα ενότητα, η ενσωμάτωση ενός στρώματος PCM με πάνελ ψύξης στην οροφή ενός κτηρίου (γραφείου) στην Αθήνα αξιολογείται θεωρητικά για την πιο ζεστή ημέρα χρησιμοποιώντας το λογισμικό TRNSYS 18. Συγκρίνονται το προφίλ της εσωτερικής θερμοκρασίας του γραφείου με το σύστημα PCM-πάνελ ψύξης στην οροφή του με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον, παρουσιάζεται η κατανομή θερμοκρασίας μέσα στο PCM και η αλλαγή φάσης του. Η εικόνα 8.3.6 δείχνει την απλή διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου (γραφείο) με το στρώμα PCM και το πάνελ ψύξης στην οροφή στο TRNSYS. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Β, η εικόνα Β7 δείχνει την ολοκληρωμένη διαμόρφωση του συστήματος στο TRNSYS.



Εικόνα 8.3.6: Απλή διαμόρφωση του μοντέλου του κτηρίου (γραφείο) με το PCM και το πάνελ ψύξης στην οροφή.

B) Περιγραφή γραφείου και PCM

Ο εξεταζόμενος χώρος είναι ένα γραφείο, το οποίο έχει εμβαδόν δαπέδου, οροφής 17 m², ύψος 3 m και αποτελείται από τέσσερις εξωτερικούς τοίχους, ενώ δεν υπάρχουν εσωτερικοί τοίχοι. Επιπλέον, υπάρχει διπλό παράθυρο στο νότιο τοίχο. Το πρόγραμμα λειτουργίας του δωματίου αρχίζει στις 8:00 π.μ. και τελειώνει στις 18:00 μ.μ. για την εξεταζόμενη περίοδο που είναι η πιο ζεστή μέρα για την Αθήνα και το Βερολίνο. Κατά τις ώρες αυτές, θεωρείται ότι 1 άτομο εργάζεται μέσα στο γραφείο, το φορτίο του εξοπλισμού είναι ίσο με 50W και το φορτίο φωτισμού είναι περίπου 100W. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εναλλαγές αέρα ανά ώρα είναι 2 για να μην υπερθερμανθεί το γραφείο, ιδιαίτερα με τη χρήση του PCM. Είναι σημαντικό να δηλωθεί ότι η επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία ρυθμίστηκε να είναι 21-24°C. Επιπλέον, η θερμοκρασία εισόδου στις

σωληνώσεις είναι σταθερή 18°C και η παροχή μάζας είναι 0.06 kg/s, η οποία αρχίζει όταν η εσωτερική θερμοκρασία του γραφείου ανεβεί πάνω από 24°C και διακόπτεται όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από 21°C, ακόμα και τις νυχτερινές ώρες, όταν υπάρχει άτομο μέσα στο γραφείο. Ο Πίνακας 8.3.3 δίνει όλες τις παραμέτρους του εξεταζόμενου γραφείου αλλά και του μοντέλου του PCM-πάνελ ψύξης [8.70]. Για την παρούσα μελέτη το PCM έχει θερμοκρασία τήξης που κυμαίνεται μεταξύ 22°C και 26°C. Ο πίνακας 8.3.4 δίνει τα υλικά τοιχοποιίας και τα πάχη τους ενώ ο πίνακας 8.3.5 δίνει τις φυσικές τους ιδιότητες.

Πίνακας 8.3.3: Παράμετροι γραφείου και μοντέλου PCM-πάνελ ψύξης [8.70].

	<i>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ</i>	<i>ΤΙΜΕΣ</i>
<i>ΓΡΑΦΕΙΟ</i>	Ύψος	3 m
	Εμβαδόν	17 m ²
	Επιφάνεια διπλού υαλοπίνακα στο νότο	6 m ²
	Αερισμός	2 εναλλαγές αέρα/ ώρα
	Φορτίο εξοπλισμού	50 W
	Αριθμός ατόμων	1
	Φωτισμός	100 W
	Συντελεστής θερμοπερατότητας των τοίχων	2.023 W/m ² K
	Συντελεστής θερμοπερατότητας νότιου τοίχου	1.581 W/m ² K
	Συντελεστής σκίασης του παραθύρου	0.50
	Συντελεστής θερμοπερατότητας του παραθύρου	1.4 W/m ² K
	Συντελεστής θερμοπερατότητας του δαπέδου	1.700 W/m ² K
<i>PCM</i>	Εύρος θερμοκρασίας τήξης	22-26°C
	Ειδική θερμοχωρητικότητα	1600 J/kgK
	Θερμική αγωγιμότητα	0.45 W/mK
	Πάχος	20 mm
	Πυκνότητα	767 kg/m ³
<i>ΠΑΝΕΛ ΨΥΞΗΣ</i>	Απόσταση σωλήνων	0.15 m
	Εξωτερική διάμετρος σωλήνων	0.02 m
	Θερμική αγωγιμότητα σωλήνα	0.35 W/mK

Πίνακας 8.3.4: Υλικά τοιχοποιίας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό περιβάλλον.

	<i>Δομικά Υλικά</i>	<i>Πάχη (mm)</i>
<i>Δάπεδο</i>	Μουσαμάς δαπέδου	2
	Τσιμεντοκονίαμα	45
	Μόνωση	12
	Μπετόν	150
<i>Νότιος Τοίχος</i>	Κοινός σοβάς	25
	Μόνωση	10
	Μπετόν	240
<i>Υπόλοιποι τοίχοι</i>	Ελαφρομπετόν	120
<i>Οροφή</i>	Ενεργό στρώμα σωληνώσεων	70
	PCM	20

Πίνακας 8.3.5: Φυσικές ιδιότητες υλικών του κτηρίου [8.70].

<i>Δομικά Υλικά</i>	<i>Πυκνότητα (kg/m³)</i>	<i>Ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kgK)</i>	<i>Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)</i>
<i>Ελαφρομπετόν</i>	1200	840	0.37
<i>Κοινός σοβάς</i>	1200	840	0.35
<i>Μόνωση</i>	25	1470	0.04
<i>Μπετόν</i>	2200	840	1.70
<i>Μουσαμάς δαπέδου</i>	1200	1400	0.17
<i>Τσιμεντοκονίαμα</i>	2000	840	1.25

Γ) Προσομοίωση και αποτελέσματα

Διακύμανση θερμοκρασιών

Το καλοκαίρι, η θερμοκρασία στο γραφείο πρέπει να είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, κοντά στα όρια της θερμικής άνεσης. Το διάγραμμα 8.3.7

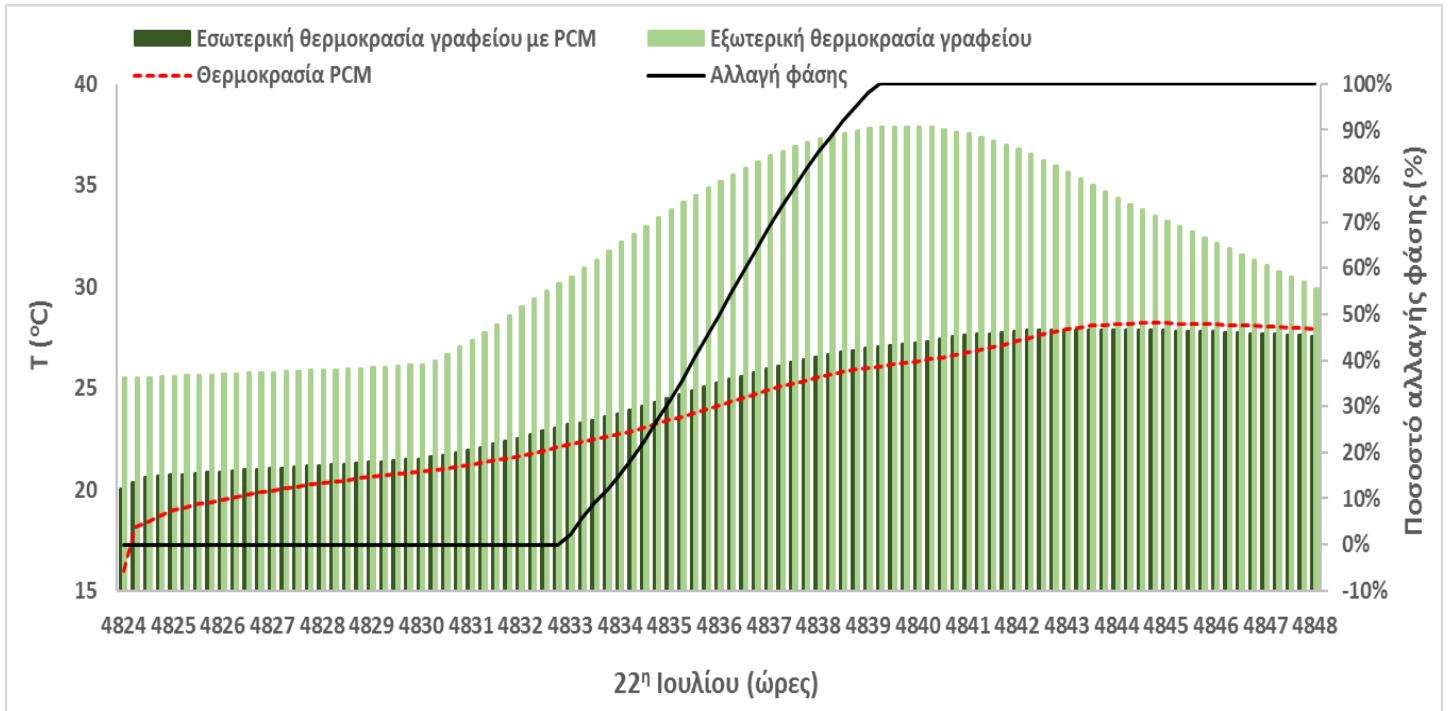
δείχνει τη διακύμανση της εσωτερικής, της εξωτερικής θερμοκρασίας γραφείου, της θερμοκρασίας του PCM και το ποσοστό αλλαγής φάσης για την πιο ζεστή ημέρα (22^η Ιουλίου) στην περιοχή της Αθήνας. Η μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία είναι 37.9°C και η μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία με τη χρήση του PCM είναι 28°C, γίνεται δηλαδή μια μείωση κατά 9.9°C. Η διακύμανση της θερμοκρασίας του PCM ακολουθεί τη διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Επιπλέον, όταν το ποσοστό αλλαγής φάσης είναι 0 τότε το PCM βρίσκεται στη στερεή φάση. Όταν το ποσοστό αλλαγής φάσης είναι μεγαλύτερο του 0 τότε το PCM είναι μερικώς υγροποιημένο και όταν το ποσοστό αλλαγής φάσης είναι ίσο ή μεγαλύτερο του 100 τότε το PCM είναι πλήρως υγροποιημένο.

Το διάγραμμα 8.3.8 δείχνει τη διακύμανση της εσωτερικής, της εξωτερικής θερμοκρασίας γραφείου, της θερμοκρασίας του PCM και το ποσοστό αλλαγής φάσης για την πιο ζεστή ημέρα (25^η Ιουνίου) στην περιοχή του Βερολίνου. Η μέγιστη εξωτερική θερμοκρασία είναι 30.6°C και η μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία με τη χρήση του PCM είναι 26.9°C, γίνεται δηλαδή μια μείωση κατά 3.7°C. Παρατηρείται λοιπόν μια μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών και μια αύξηση των ελάχιστων θερμοκρασιών. Συγκεκριμένα, η ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία είναι 12.4°C ενώ με τη χρήση του PCM η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 6.2°C και γίνεται 18.7°C. Έτσι λοιπόν, με τη χρήση του PCM επιτυγχάνονται χαμηλότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Για τη διακύμανση της θερμοκρασίας του PCM και του ποσοστού αλλαγής φάσης ισχύουν αυτά που ειπώθηκαν για την περίπτωση της Αθήνας.

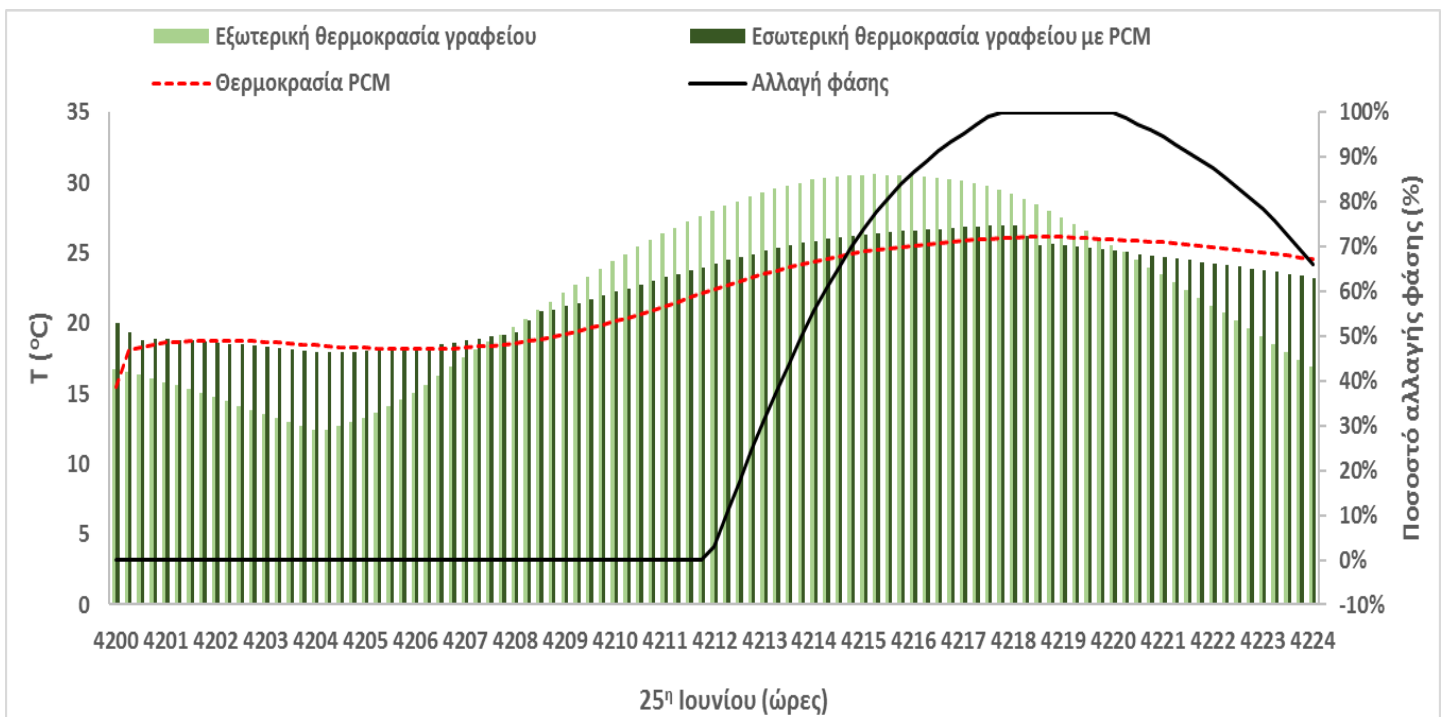
Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η χρήση του PCM οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής ημέρας.

Δ) Συμπεράσματα

○ Η χρήση του PCM αυξάνει τη θερμική μάζα του περιβλήματος του κτηρίου και αυτό οδηγεί σε ένα πιο σταθερό προφίλ εσωτερικής θερμοκρασίας και σε χαμηλότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και στις δύο εξεταζόμενες περιοχές. Ειδικότερα, η χρήση του PCM οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου, σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία, κατά τη διάρκεια της πιο θερμής καλοκαιρινής ημέρας στην Αθήνα, όπου το κλίμα είναι πιο θερμό, ενώ η χρήση του PCM μειώνει τις μέγιστες θερμοκρασίες και αυξάνει τις ελάχιστες στο Βερολίνο, όπου το κλίμα είναι πιο ψυχρό.



Διάγραμμα 8.3.7: Διακύμανση εσωτερικής, εξωτερικής θερμοκρασίας γραφείου, θερμοκρασίας του PCM και ποσοστό αλλαγής φάσης για την πιο ζεστή ημέρα (22^η Ιουλίου) στην περιοχή της Αθήνας.



Διάγραμμα 8.3.8: Διακύμανση εσωτερικής, εξωτερικής θερμοκρασίας γραφείου, θερμοκρασίας του PCM και ποσοστό αλλαγής φάσης για την πιο ζεστή ημέρα (25^η Ιουνίου) στην περιοχή του Βερολίνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 8^{ου} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [8.1] T.S. Ge, R.Z. Wang, Z.Y. Xu, Q.W. Pan, S. Du, X.M. Chen, T. Ma, X.N. Wu, X.L. Sun, J.F. Chen, Solar heating and cooling: Present and future development, *Renewable Energy* 2018;126:1126-1140.
- [8.2] E. Bellos, C. Tzivanidis, K. Moschos, K.A. Antonopoulos, Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems, *Energy Conversion and Management* 2016;15:306-319.
- [8.3] A. Shirazi, R.A. Taylor, G.L. Morrison, S.D. White, Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review, *Energy Conversion and Management* 2018;171:59–81.
- [8.4] A. Aliane, S. Abboudi, C. Seladji, B. Guendouz, An illustrated review on solar absorption cooling experimental studies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;65:443–458.
- [8.5] A. Shirazi, R.A. Taylor, S.D. White, G.L. Morrison, A systematic parametric study and feasibility assessment of solar-assisted single-effect, double-effect, and triple-effect absorption chillers for heating and cooling applications, *Energy Conversion and Management* 2016;114:258-277.
- [8.6] A. Shirazi, R.A. Taylor, G.L. Morrison, S.D. White, A comprehensive, multi-objective optimization of solar-powered absorption chiller systems for air-conditioning applications, *Energy Conversion and Management* 2017;132:281-306.
- [8.7] J.F. Chen, Y.J. Dai, R.Z. Wang, Experimental and analytical study on an air-cooled single effect LiBr-H₂O absorption chiller driven by evacuated glass tube solar collector for cooling application in residential buildings, *Solar Energy* 2017;151:110-118.
- [8.8] E. Bellos, C. Tzivanidis, C. Symeou, K.A. Antonopoulos, Energetic, exergetic and financial evaluation of a solar driven absorption chiller – a dynamic approach. *Energy Conversion and Management* 2017;137:34–48.
- [8.9] E. Bellos, C. Tzivanidis, G. Tsifis, Energetic, Exergetic, Economic and Environmental (4E) analysis of a solar assisted refrigeration system for various operating scenarios, *Energy Conversion and Management* 2017;148:1055-1069.

- [8.10] E. Bellos, C. Tzivanidis, Parametric analysis and optimization of a cooling system with ejector-absorption chiller powered by solar parabolic trough collectors, *Energy Conversion and Management* 2018;168:329–342.
- [8.11] Z. Lu, Technical engineering design, thermal experimental and economic simulation analysis of absorption cooling/heating systems in China, *Energy Conversion and Management* 2018;172:155–163.
- [8.12] L. Zhou, X. Li, Y. Zhao, Y. Dai, Performance assessment of a single/double hybrid effect absorption cooling system driven by linear Fresnel solar collectors with latent thermal storage, *Solar Energy* 2017;151:82-94.
- [8.13] Z.Y. Xu, R.Z. Wang, Simulation of solar cooling system based on variable effect LiBr-water absorption chiller, *Renewable Energy* 2017;113:907-914.
- [8.14] N.I. Ibrahim, M.M.A. Khan, I.M. Mahbubul, R. Saidur, F.A. Al-Sulaiman, Experimental testing of the performance of a solar absorption cooling system assisted with ice-storage for an office space, *Energy Conversion and Management* 2017;148:1399-1408.
- [8.15] T. Sokhansefat, D. Mohammadi, A. Kasaeian, A.R. Mahmoudi, Simulation and parametric study of a 5-ton solar absorption cooling system in Tehran, *Energy Conversion and Management* 2017;148:339-351.
- [8.16] M.S.A Khan, A.W. Badar, T. Talha, M.W. Khan, F.S. Butt, Configuration based modeling and performance analysis of single effect solar absorption cooling system in TRNSYS, *Energy Conversion and Management* 2018;157:351–363.
- [8.17] J. Romani, G. Pérez, A. De Gracia, Experimental evaluation of a cooling radiant wall coupled to a ground heat exchanger, *Energy and Buildings* 2016;129:484–490.
- [8.18] J. Romani, L.F. Cabeza, G. Perez, A.L. Pisello, A. De Gracia, Experimental testing of cooling internal loads with a radiant wall, *Renewable Energy* 2018;116:1-8.
- [8.19] Z. Liu, L. Zhang, G. Gong, T. Han, Experimental evaluation of an active solar thermoelectric radiant wall system, *Energy Conversion and Management* 2015;94: 253–260.

- [8.20] Y. Luo, L. Zhang, Z. Liu, J. Wu, Y. Zhang, Z. Wu, Numerical evaluation on energy saving potential of a solar photovoltaic thermoelectric radiant wall system in cooling dominant climates, *Energy* 2018;142:384-399.
- [8.21] T. Mikeska, S. Svendsen, Dynamic behavior of radiant cooling system based on capillary tubes in walls made of high performance concrete, *Energy and Buildings* 2015;108:92–100.
- [8.22] M. Šimko, M. Krajčák, O. Šikula, P. Šimko, D. Kalús, Insulation panels for active control of heat transfer in walls operated as space heating or as a thermal barrier: Numerical simulations and experiments, *Energy and Buildings* 2018;158:135–146.
- [8.23] Y. Jing, Z. Li, L. Liu, S. Lu, S. Lv, Exergoeconomic-optimized design of a solar absorption-subcooled compression hybrid cooling system for use in low-rise buildings, *Energy Conversion and Management* 2018;165:465–476.
- [8.24] L. Dong, Z. Yumeng, L. Changyu, W. Guozhong, Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building. *Energy Conversion and Management* 2015;100:147–156.
- [8.25] S. Jeong, J. Jeon, J. Seo, J. Lee, S. Kim, Performance evaluation of the microencapsulated PCM for wood-based flooring application, *Energy Conversion and Management* 2012;64:516-521.
- [8.26] C. Yao, X. Kong, Y. Li, Y. Du, C. Qi, Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building, *Energy Conversion and Management* 2018;155:20-31.
- [8.27] S. Mengjie, N. Fuxin, M. Ning, H. Yanxin, D. Shiming, Review on building energy performance improvement using phase change materials, *Energy and Buildings* 2018;158:776–793.
- [8.28] N. Zhu, S. Li, P. Hu, S. Wei, R. Deng, F. Lei, A review on applications of shape-stabilized phase change materials embedded in building enclosure in recent ten years, *Sustainable Cities and Society* 2018;43:251–264.
- [8.29] A. Fateh, D. Borelli, F. Devia, H. Weinläder, Summer thermal performances of PCM-integrated insulation layers for light-weight building walls: Effect of orientation

and melting point temperature, *Thermal Science and Engineering Progress* 2018;6:361–369.

[8.30] U. Stritih, V.V Tyagi, R. Stropnik, H. Paksoy, F. Haghghat, M.M. Joybari, Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings, *Sustainable Cities and Society* 2018;41:286–295.

[8.31] X. Sun, Q. Zhang, M.A. Medina, K.O. Lee, S. Liao, Parameter design for a phase change material board installed on the inner surface of building exterior envelopes for cooling in China, *Energy Conversion and Management* 2016;120:100–108.

[8.32] L. Erlbeck, P. Schreiner, K. Schlachter, P. Dörnhofer, F. Fasel, F.J. Methner, M. Rädle, Adjustment of thermal behavior by changing the shape of PCM inclusions in concrete blocks, *Energy Conversion and Management* 2018;158:256–265.

[8.33] F.B. Errebai, S. Chikh, L. Derradji, Experimental and numerical investigation for improving the thermal performance of a microencapsulated phase change material plasterboard, *Energy Conversion and Management* 2018;174:309–321.

[8.34] J. Xie, W. Wang, J. Liu, S. Pan, Thermal performance analysis of PCM wallboards for building application based on numerical simulation, *Solar Energy* 2018;162:533–540.

[8.35] G. Zhou, M. Pang, Experimental investigations on the performance of a collector-storage wall system using phase change materials, *Energy Conversion and Management* 2015;105:178–188.

[8.36] X. Wang, H. Yu, L. Li, M. Zhao, Experimental assessment on the use of phase change materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room, *Energy Conversion and Management* 2016;120:81–89.

[8.37] C. Chen, H. Ling, Z. Zhai, Y. Li, F. Yang, F. Han, S. Wei, Thermal performance of an active-passive ventilation wall with phase change material in solar greenhouses, *Applied Energy* 2018;216:602–612.

[8.38] J.F. Belmonte, M.A. Izquierdo-Barrientos, P. Eguía, A.E. Molina, J.A. Almendros-Ibáñez, PCM in the heat rejection loops of absorption chillers. A feasibility study for the residential sector in Spain, *Energy Buildings* 2014;80:331–351.

- [8.39] F. Agyenim, M. Rhodes, I. Knight, The use of phase change material (PCM) to improve the coefficient of performance of a chiller for meeting domestic cooling in Wales, in: 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Crete island, Greece, 2007.
- [8.40] C. Schweigler, S. Hiebler, C. Keil, H. Köbel, C. Kren, H. Mehling, Low-Temperature Heat Storage for Solar Heating and Cooling Applications, ASHRAE Transactions 2007;113:89–96.
- [8.41] S.B.A. Ponshanmugakumar, P. Deepak, H. Sivaraman, R. Vignesh Kumar, Numerical investigation on vertical generator integrated with phase change materials in vapour absorption refrigeration system, Applied Mechanics and Materials 2015;766–767:468–73.
- [8.42] K. Azzouz, D. Leducq, D. Gobin, Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation, International Journal of Refrigeration 2009;32:1634–44.
- [8.43] G. Sonnenrein, A. Elsner, E. Baumhögger, A. Morbach, K. Fieback, J. Vrabec, Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers, International Journal of Refrigeration 2015;51:154–60.
- [8.44] M.A. Said, H. Hassan, Effect of using nanoparticles on the performance of thermal energy storage of phase change material coupled with air-conditioning unit, Energy Conversion and Management 2018;171:903-916.
- [8.45] R. Hirmiz, M.F. Lightstone, J.S. Cotton, Performance enhancement of solar absorption cooling systems using thermal energy storage with phase change materials, Applied Energy 2018;223:11–29.
- [8.46] A. Aljehani, S.A.K. Razack, L. Nitsche, S. Al-Hallaj, Design and optimization of a hybrid air conditioning system with thermal energy storage using phase change composite, Energy Conversion and Management 2018;169:404–418.
- [8.47] BioPCM, Phase Change Energy Solutions, www.phasechange.com <accessed 2018>.

- [8.48] M.T. Plytaria, E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, Financial and energetic evaluation of solar assisted heat pump underfloor heating systems with phase change materials, *Applied Thermal Engineering* 2019;149:548-564.
- [8.49] Thermal Energy System Specialists (TESS). TESSLibs 3-Mathematical Reference. Type 1270: Phase Change Material (PCM) wall layer for Type56; 2012.
- [8.50] E. Bellos, C. Tzivanidis, Energetic and financial analysis of solar cooling systems with single effect absorption chiller in various climates, *Applied Thermal Engineering* 2017;126:809–821.
- [8.51] S.A. Kalogirou, The potential of solar industrial process heat applications, *Applied Energy* 2003;76:337–361.
- [8.52] O. Kızılkın, A. Sencan, S.A. Kalogirou, Thermoeconomic optimization of a LiBr absorption refrigeration system, *Chem. Eng. Process: Process Intensification* 2007;46:1376–1384.
- [8.53] J. Kosny, N. Shukla, A. Fallahi, Cost Analysis of Simple Phase Change Material Enhanced Building Envelopes in Southern U.S. Climates, U.S. Department of Energy’s Building America Program, Fraunhofer CSE 2013.
- [8.54] <https://www.homeadvisor.com/cost/heating-and-cooling-systems> <accessed 2018>.
- [8.55] M. T. Plytaria, E. Bellos, C. Tzivanidis, K. A. Antonopoulos, Numerical simulation of a solar cooling system with and without phase change materials in radiant walls of a building, *Energy Conversion and Management* 2019;188:40-53.
- [8.56] B. Boiting, P. Hollenbeck, PCM-Kuhldecken. *HLH Klimatechnik* 2013;64:4.
- [8.57] F. Klinker, Dynamic thermal behaviour of two newly developed PCM cooling ceiling prototypes, in: *Proceedings of the International Solar Energy Society EuroSun. Aix-les-Bains (France), 2014.*
- [8.58] H. Weinlader, F. Klinker, M. Yasin, PCM cooling ceilings in the energy efficiency center—passive cooling potential of two different system designs, *Energy and Buildings* 2015;119:7.

- [8.59] S. Weismann, Demonstration von Energieeffizienz und des Einsatzes erneuerbarer Energieträger am Neubau eines innovativen Forschungsgebäudes: DEENIF, Bavarian center for applied energy research: Wurzburg, Hannover 2014;119.
- [8.60] C.V. Konstantinidis, F. Klinker, H. Weinlaeder, EuroSun, Measurements of the Performance of the Room Integrated PCM in the New Energy Efficiency Center, International Solar Energy Society (ISES), Aix-les-Bains, France, 2014.
- [8.61] B. Chhugani, F. Klinker, H. Weinlaeder, M. Reim, Energetic performance of two different PCM wallboards and their regeneration behavior in office rooms, Energy Procedia 2017;122:5.
- [8.62] M. Reim, W. Körner, B. Chhugani, S. Weismann, Correlation between energy efficiency in buildings and comfort of the users, Energy Procedia 2017;122:457-462.
- [8.63] A. Dentel, W. Stephan, Thermal comfort in rooms with active PCM constructions. 8th International Conference on System Simulation Buildings, Liege, December 13-15, 2010.
- [8.64] A. Dentel, W. Stephan, F. Böttner. Numerical and in-situ evaluation of the thermal comfort in rooms embedded PCM in the wall construction, The 5th International Symposium of Heating, Ventilation and Air conditioning, pp 557-562, Beijing, China, 2007.
- [8.65] B. Glück, Einheitliches Nährungsverfahren zur Simulation von Latentwärmespeichern, HLH Bd. 2006a;57(7):25-30.
- [8.66] TRNSYS 18, A. Dentel, W. Stephan, G. Simon Ohm University of Applied Sciences, Institute for Energy and Building, Trnsys User Manual TYPE 399: Phase Change Material in passive and active wall constructions, Version 1.6, 2018;1-15.
- [8.67] B. Glück, Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung, Rud. Otto-Meyer Umweltstiftung, Hamburg 2006b.
- [8.68] L.J. Claros-Marfil, A. Dentel, J.F. Padiá, B. Lauret, Active and passive PCM walls simulation – a new TRNSYS PCM-Type, 1st International Congress on research in Construction and Architectural Technologies, Universidad Politécnica de Madrid. ETSAM. Madrid, 11-13 Junio de 2014.

[8.69] M. Koschenz, B. Lehmann, Thermoaktive Bauteilsysteme tabs, EMPA Dübendorf, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit, 2000.

[8.70] TRNSYS 18 Transient System Simulation Program – Volume 5, Multizone Building Modeling with Type56 and TRNBuild, 2017.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της διατριβής. Επίσης, αναφέρονται τα στοιχεία πρωτοτυπίας της διατριβής και δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

9.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται την ανάπτυξη και τη μελέτη διαφόρων ηλιακών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση και τη ψύξη κτηρίου σε συνδυασμό με την εφαρμογή Υλικών Αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials-PCM) μέσα στα δομικά του υλικά, με στόχο την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και την σύγκριση με συμβατικά συστήματα. Οι κυριότερες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν ενεργειακά και οικονομικά για την περιοχή της Αθήνας είναι η ηλιακή θέρμανση με τη σύζευξη ηλιακών συλλεκτών με βοηθητική πηγή θερμότητας ή με αντλίες θερμότητας νερού για την κάλυψη των θερμικών φορτίων και η ηλιακή ψύξη με την σύζευξη ηλιακών συλλεκτών με μηχανή απορρόφησης για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων με την ταυτόχρονη προσθήκη στρώματος PCM στο κέλυφος του κτηρίου.

Στα πρώτα πέντε κεφάλαια της διατριβής γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος. Συγκεκριμένα, αναφέρεται η σημερινή ενεργειακή κατάσταση τόσο στην Ελλάδα όσο και παγκοσμίως καθώς και η ισχύουσα κατάσταση στην Ελλάδα όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας στον κτηριακό τομέα. Στην συνέχεια, δίνονται οι βασικές αρχές της ηλιακής ακτινοβολίας, αναλύονται οι αρχές λειτουργίας ηλιακών συστημάτων καθώς και η χρήση τους στον κτηριακό τομέα για θέρμανση και για ψύξη. Επιπροσθέτως, δίνονται οι βασικές αρχές της θερμικής ενέργειας όσον αφορά τη μεταφορά θερμότητας, αναλύονται τα PCM, δηλαδή περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας τους, οι ιδιότητες, οι κατηγορίες και οι μέθοδοι ενσωμάτωσής τους, καθώς και η εφαρμογή τους στο κέλυφος αλλά και στα ενεργητικά συστήματα των κτηρίων που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο κεφάλαιο 6 έγιναν προσομοιώσεις, για θέρμανση και κλιματισμό κτηρίων με την εφαρμογή διαφορετικών PCM στο κέλυφος (οροφή, τοίχοι, δάπεδο), με το λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης TRNSYS 17. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το

μοντέλο PCM, Type 1270, το οποίο επικυρώθηκε μέσω πειραματικών δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία με την εφαρμογή του σε τοίχους και σε δάπεδο.

Στο κεφάλαιο 7 αναπτύχθηκαν και προσομοιώθηκαν πρωτότυπα συστήματα ηλιακής θέρμανσης κτηρίων με PCM στο κέλυφός τους με το λογισμικό TRNSYS 17. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το επικυρωμένο μοντέλο PCM, Type 1270. Στην αρχή πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση και βελτιστοποίηση ενός ηλιακά (συλλέκτης FPC) υποβοηθούμενου ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με βοηθητική πηγή θερμότητας και με στρώμα PCM στο δάπεδο ενός τυπικού κτηρίου στην Αθήνα. Η ιδέα του συστήματος ήταν το ζεστό νερό από έναν ηλιακό συλλέκτη να λειτουργεί ως πηγή θερμότητας για το PCM σε ένα σύστημα θέρμανσης δαπέδου. Επιπροσθέτως, έγινε οικονομική, ενεργειακή αξιολόγηση και σύγκριση τριών ενδοδαπέδιων συστημάτων θέρμανσης με στρώμα PCM στο δάπεδο και με ηλιακά διαφορετικές υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας νερού (σύστημα με FPC, σύστημα με PVT, σύστημα με FPC-PV), που βασίστηκε στις συλλεκτικές επιφάνειες, το πάχος της μόνωσης του δαπέδου και τη χρήση του στρώματος PCM στο δάπεδο. Στόχος των αξιολογήσεων και των βελτιστοποιήσεων των αναπτυσσόμενων συστημάτων είναι η μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση και το μικρότερο κόστος υλοποίησης. Επιπλέον, η επικύρωση των αποτελεσμάτων ενός απλού ηλιακού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με PCM στο δάπεδο κτηρίου έγινε με σύγκριση πειραματικών δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο κεφάλαιο 8 έγιναν προσομοιώσεις συστημάτων για ηλιακή ψύξη κτηρίων με PCM στο κέλυφός τους με το λογισμικό TRNSYS 17 και 18. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση και ανάλυση ενός ηλιακού συστήματος ψύξης με και χωρίς PCM στους τοίχους ακτινοβολίας ενός κτηρίου. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το επικυρωμένο μοντέλο PCM, Type 1270. Η σύζευξη ηλιακού συλλέκτη σωλήνων κενού με μηχανή απορρόφησης και η ταυτόχρονη τοποθέτηση στρώματος PCM στους τοίχους ακτινοβολίας κτηρίου για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων αποτελεί ένα πρωτότυπο σύστημα ψύξης. Στη συνέχεια, μελετήθηκε σύστημα ψύξης κτηρίου με πάνελ οροφής και στρώμα PCM χρησιμοποιώντας το νέο μοντέλο του TRNSYS 18 για τη μοντελοποίηση του PCM, Type 399. Συγκεκριμένα έγινε σύγκριση των διακυμάνσεων των εξωτερικών και των εσωτερικών θερμοκρασιών κτηρίου

(γραφείου) με PCM για τα μετεωρολογικά δεδομένα της Γερμανίας (Βερολίνο) και της Ελλάδας (Αθήνα).

9.2 Κυριότερα συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής πηγάζουν από τα κεφάλαια 6, 7 και 8 όπου παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών και των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Σημειώνεται ότι οι υπολογισμοί και οι προσομοιώσεις των συστημάτων έγιναν για ένα τυπικά προσομοιωμένο κτήριο εμβαδού 100 m² στην Αθήνα και επομένως τα συμπεράσματα αποτελούν μια βάση σύγκρισης για τους μελετητές.

Τα βασικότερα συμπεράσματα του κεφαλαίου 6 για ένα τυπικό κτήριο στην Αθήνα είναι τα εξής:

- ο Το PCM ως στρώμα της οροφής μειώνει τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτηρίου και βελτιώνει τη θερμική άνεση των ατόμων μέσα σ' αυτό. Η βέλτιστη περίπτωση PCM είναι όταν συνδυάζεται με μόνωση με μικρότερο πάχος. Δηλαδή με το PCM στην οροφή εξοικονομούμε ενέργεια μειώνοντας και το πάχος της μόνωσης της οροφής. Από την σύγκριση δύο PCM με διαφορετική θερμοκρασία τήξης (23°C και 25°C) παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μείωση των συνολικών ετήσιων φορτίων που φτάνει περίπου το 21%. Το χειμώνα, το PCM με θερμοκρασία τήξης 23°C είναι ελάχιστα καλύτερο από το PCM με θερμοκρασία τήξης 25°C. Το καλοκαίρι συμβαίνει το αντίθετο και η αιτία είναι το γεγονός ότι το δεύτερο PCM υγροποιείται σε υψηλότερη θερμοκρασία (25°C) απ' ότι το πρώτο. Η καλύτερη περιοχή θερμοκρασιών με τις μικρότερες διακυμάνσεις επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μόνωση σε συνδυασμό με PCM στην οροφή. Οι χρόνοι αποπληρωμής είναι σχεδόν οι ίδιοι και για τα δύο PCM με μια μικρή διαφορά της τάξεως του 0.4% και κυμαίνονται από 15 έως 28 έτη. Επιπλέον, ο μικρότερος χρόνος αποπληρωμής, τα 15 έτη, επιτυγχάνεται με πάχος μόνωσης οροφής 0.04 m γιατί σ' αυτή την περίπτωση έχουμε τη μεγαλύτερη μείωση ετήσιων φορτίων.
- ο Το PCM, με θερμοκρασία τήξης 25°C, ως στρώμα τοίχου σε συνδυασμό με τη μόνωση μειώνει τα θερμικά και τα ψυκτικά φορτία του κτηρίου και βελτιώνει τη θερμική άνεση των ατόμων μέσα σ' αυτό. Όταν το PCM τοποθετείται μόνο στο νότιο τοίχο, η ετήσια συνολική μείωση των φορτίων κυμαίνεται περίπου μεταξύ 7% και 10%. Επιπλέον, το PCM στο νότιο τοίχο λειτουργεί καλύτερα το καλοκαίρι, ανεξάρτητα από

τη θέση, αλλά το χειμώνα, λειτουργεί καλύτερα όταν βρίσκεται μετά από τη μόνωση, προς το εσωτερικό περιβάλλον. Επομένως, η καλύτερη επιλογή με μείωση θερμικών και ψυκτικών φορτίων είναι όταν το PCM τοποθετείται μετά από τη μόνωση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο μικρότερο πάχος μόνωσης έχει ο νότιος τοίχος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των θερμικών φορτίων ενώ η μείωση των ψυκτικών φορτίων δεν επηρεάζεται πολύ με τη διαφορά του πάχους της μόνωσης. Ακόμα, με τη χρήση PCM μόνο στο νότιο τοίχο και με μειωμένο πάχος μόνωσης (0.04 m) γίνεται μείωση των θερμικών φορτίων κατά 1.54% και μείωση κατά 5.90% των ψυκτικών φορτίων. Επιπλέον, όταν το PCM τοποθετείται στο νότιο και το βόρειο τοίχο, η ετήσια συνολική μείωση των φορτίων κυμαίνεται περίπου μεταξύ 10% και 16.1%. Η καλύτερη περίπτωση είναι όταν υπάρχει ένα στρώμα PCM στο νότιο και στο βόρειο τοίχο μετά από τη μόνωση, προς το εσωτερικό περιβάλλον και αυτό γιατί η μόνωση σ' αυτή την περίπτωση δεν εμποδίζει τη συναλλαγή θερμότητας του PCM με το εσωτερικό περιβάλλον και συνεπώς η αποθηκευμένη ηλιακή θερμότητα του PCM μεταδίδεται μέσα στο κτήριο. Επιπροσθέτως, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούμε να μειώσουμε το πάχος της μόνωσης των τοίχων (βόρειο και νότιο) σε 0.03 m και με τη ταυτόχρονη χρήση του PCM παρατηρούμε μείωση των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων. Επομένως, μπορούμε να επιτύχουμε μείωση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων με την ενσωμάτωση του PCM σε τοίχο με μειωμένο πάχος μόνωσης γιατί μ' αυτόν τον τρόπο το PCM συναλλάσσει ευκολότερα θερμότητα. Για το χειμώνα, η καλύτερη λύση είναι η περίπτωση που υπάρχει μόνο μόνωση (γιατί η θερμοκρασία είναι η υψηλότερη), αλλά η χρήση του PCM αυξάνει τη θερμική μάζα του περιβλήματος του κτηρίου και αυτό οδηγεί σε ένα πιο σταθερό προφίλ εσωτερικής θερμοκρασίας, δηλαδή σε χαμηλότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Για το καλοκαίρι, η καλύτερη λύση είναι η περίπτωση με το συνδυασμό της μόνωσης και του PCM. Η χρήση του PCM οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής ημέρας. Όσον αφορά την οικονομική μελέτη αποδείχθηκε ότι ο μικρότερος χρόνος αποπληρωμής, τα 11 έτη, επιτυγχάνεται με πάχος μόνωσης βόρειου και νότιου τοίχου 0.03 m γιατί σ' αυτή την περίπτωση έχουμε τη μεγαλύτερη μείωση ετήσιων φορτίων.

ο Το PCM, ως στρώμα του δαπέδου, μειώνει τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτηρίου αρκεί η θερμοκρασία τήξης του χρησιμοποιούμενου PCM να μην είναι πολύ μεγαλύτερη από τα όρια της θερμικής άνεσης. Το χειμώνα αλλά και το καλοκαίρι το PCM με θερμοκρασία τήξης 25°C είναι καλύτερο από το PCM με θερμοκρασία τήξης

29°C και αυτό γιατί το πρώτο έχει θερμοκρασία τήξης εντός των ορίων θερμικής άνεσης. Το καλοκαίρι, όπου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από το χειμώνα και θα περιμέναμε να λειτουργήσει καλύτερα το PCM με θερμοκρασία τήξης 29°C, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας τήξης αλλά παρατηρούμε ότι αυτό μειώνει λίγο τα ψυκτικά φορτία γιατί λειτουργεί στη διαφασική περιοχή και δεν υγροποιείται πλήρως. Το χειμώνα, η διακύμανση της θερμοκρασίας χωρίς PCM φτάνει να είναι μικρότερη έως και 0.5°C σε σχέση με τη διακύμανση της θερμοκρασίας με PCM. Το καλοκαίρι, η διακύμανση της θερμοκρασίας χωρίς PCM φτάνει να είναι μεγαλύτερη έως και 0.4°C σε σχέση με τη διακύμανση της θερμοκρασίας με PCM.

Σημειώνεται ότι, τα αποτελέσματα των παραπάνω μελετών (για PCM σε οροφή, τοίχους και δάπεδο) συγκρίθηκαν με αποτελέσματα άλλων μελετών από τη διεθνή βιβλιογραφία και παρατηρήθηκε μια καλή σύγκλιση αποτελεσμάτων.

Τα βασικότερα συμπεράσματα του κεφαλαίου 7 για την περίπτωση του ηλιακά υποβοηθούμενου ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με βοηθητική πηγή θερμότητας και με στρώμα PCM στο δάπεδο ενός τυπικού κτηρίου στην Αθήνα είναι τα εξής:

- Η ενεργειακή ανάλυση έδειξε ότι η βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια είναι περίπου 25 m² επειδή οι μεγαλύτερες συλλεκτικές επιφάνειες οδηγούν σε εξαιρετικά μικρή μείωση της βοηθητικής κατανάλωσης ενέργειας, δηλαδή η ποσοστιαία μείωση της βοηθητικής κατανάλωσης ενέργειας λόγω PCM μικραίνει σε συλλεκτικές επιφάνειες πάνω από 25 m².
- Ένας μεγαλύτερος όγκος δοχείου αποθήκευσης καθιστά τη ζήτηση ενέργειας υψηλότερη και έτσι ο βέλτιστος, ενεργειακά, όγκος δοχείου είναι 1 m³.
- Γενικά, διαπιστώθηκε ότι η χρήση ενός στρώματος PCM κάτω από την ενδοδαπέδια σωλήνωση με πάχος μόνωσης 0.03 m είναι το βέλτιστο σενάριο ενώ η οικονομική σύγκριση έδειξε ότι υπάρχει αύξηση του συνολικού κόστους με τη χρήση του στρώματος PCM περίπου 18%.
- Κατά τη διάρκεια των κρύων χειμωνιάτικων ημερών, η χρήση του PCM είναι σε θέση να αυξήσει το επίπεδο θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα περίπου κατά 1°C.
- Η πολύ-παραγοντική διαδικασία βελτιστοποίησης απέδειξε ότι η βέλτιστη περίπτωση επιτυγχάνεται με όγκο δοχείου αποθήκευσης 1 m³, συλλεκτική επιφάνεια 20 m² και στρώμα PCM στο δάπεδο κάτω από το ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης με μόνωση πάχους 0.03 m.

Τα βασικότερα συμπεράσματα του κεφαλαίου 7 για την περίπτωση των τριών ηλιακά υποβοηθούμενων συστημάτων ενδοδαπέδιας θέρμανσης με αντλία θερμότητας νερού με και χωρίς τη χρήση στρώματος PCM στο δάπεδο ενός τυπικού κτηρίου στην Αθήνα είναι τα εξής:

- Προκειμένου να έχουμε ικανοποιητική ηλιακή κάλυψη στην ηλεκτρική ζήτηση της αντλίας θερμότητας νερού, η βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη βρίσκεται περίπου στα 20 m².
- Η εφαρμογή στρώματος PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο περίπου 42% για το σύστημα με FPC, 67% για το σύστημα με PVT και 48% για το σύστημα με FPC-PV.
- Η ηλιακή κάλυψη με το σύστημα FPC είναι περίπου 84%, με το σύστημα PVT 85% και με το σύστημα FPC-PV 77%. Γενικά, ο COP της αντλίας θερμότητας είναι περίπου 6.3 με 20 m² συλλεκτική επιφάνεια.
- Με τη χρήση της στρώσης PCM κάτω από το σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, υπάρχει αύξηση περίπου 1°C στην εσωτερική θερμοκρασία. Η αύξηση αυτή βελτιώνει τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του κτηρίου.
- Η οικονομική σύγκριση αποδεικνύει ότι υπάρχει μείωση του μεταβλητού κόστους στα συστήματα με τη χρήση του PCM. Για τη βέλτιστη συλλεκτική επιφάνεια των 20 m² υπάρχει μια μείωση από 5.6% έως 20%. Όσον αφορά το συνολικό κόστος, σημειώνεται αύξηση περίπου 15 έως 20%. Το σύστημα FPC+PCM έχει το χαμηλότερο συνολικό κόστος μεταξύ των άλλων συστημάτων με PCM.
- Η μικρότερη περίοδος αποπληρωμής (SPP) μεταξύ των περιπτώσεων με PCM, σε σύγκριση με το κόστος επένδυσης αναφοράς ενός συστήματος με λέβητα, επιτυγχάνεται με την περίπτωση με FPC και μόνωση πάχους 3 cm. Στην περίπτωση αυτή, η μικρότερη περίοδος αποπληρωμής είναι 18.3 έτη. Ωστόσο, είναι υψηλότερη από την περίπτωση του συστήματος FPC χωρίς PCM όπου η απλή περίοδος αποπληρωμής είναι 10.2 έτη.

Συμπερασματικά, η χρήση του PCM στο κέλυφος του κτηρίου, σε συνδυασμό με ηλιακά συστήματα, είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας και δημιουργίας καλύτερων συνθηκών θερμικής άνεσης μέσα στο κτήριο. Ωστόσο, το επενδυτικό κόστος του PCM είναι υψηλό και δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από το μειωμένο λειτουργικό κόστος λόγω της χαμηλότερης ζήτησης ενέργειας.

Τα βασικότερα συμπεράσματα του κεφαλαίου 8 για την περίπτωση του ηλιακού συστήματος ψύξης με και χωρίς PCM στους τοίχους ακτινοβολίας ενός τυπικού κτηρίου στην Αθήνα είναι τα εξής:

- Η ενσωμάτωση του PCM στους τοίχους ακτινοβολίας μειώνει την κατανάλωση ενέργειας του κτηρίου.
- Η ενσωμάτωση του PCM στο νότιο τοίχο είναι η καλύτερη επιλογή μεταξύ των τεσσάρων εξωτερικών τοίχων. Σε αυτή την περίπτωση, η μείωση της βοηθητικής ενέργειας είναι 30%, η αύξηση της ηλιακής κάλυψης είναι 3.8% και η μείωση του συνολικού κόστους περίπου 3%.
- Η συλλεκτική επιφάνεια των 60 m² επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη αύξηση της ηλιακής κάλυψης με χρήση PCM που είναι περίπου 9.7%. Επιπλέον, για την ίδια συλλεκτική επιφάνεια, επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη μείωση του συνολικού κόστους (κατά μέσο όρο 6.7%) για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα με PCM σε σύγκριση με το σύστημα χωρίς PCM.
- Στις περιπτώσεις με χρήση PCM σε συνδυασμό τοίχων, η μεγαλύτερη μείωση του συνολικού κόστους (κατά μέσο όρο 6.4%) επιτυγχάνεται όταν το PCM βρίσκεται στο νότιο και στον ανατολικό τοίχο.
- Η εφαρμογή του στρώματος PCM στο νότιο τοίχο προκαλεί μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά μέσο όρο 0.3°C ενώ η εφαρμογή του στρώματος PCM στο νότιο και ανατολικό τοίχο προκαλεί μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας κατά μέσο όρο 0.5°C. Η εφαρμογή του στρώματος PCM σε τρεις τοίχους (νότιο, δυτικό, ανατολικό) και σε όλους τους τοίχους δίνει τη μεγαλύτερη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας που είναι κατά μέσο όρο 0.6°C.

Τα βασικότερα συμπεράσματα του κεφαλαίου 8 για την περίπτωση του συστήματος ψύξης κτηρίου, στην Αθήνα και το Βερολίνο, με πάνελ οροφής και στρώμα PCM είναι τα εξής:

- Η χρήση του PCM αυξάνει τη θερμική μάζα του περιβλήματος του κτηρίου και αυτό οδηγεί σε ένα πιο σταθερό προφίλ εσωτερικής θερμοκρασίας και σε χαμηλότερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και στις δύο εξεταζόμενες περιοχές. Ειδικότερα, η χρήση του PCM οδηγεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου, σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία, κατά τη διάρκεια της πιο θερμής καλοκαιρινής ημέρας

στην Αθήνα, όπου το κλίμα είναι πιο θερμό, ενώ η χρήση του PCM μειώνει τις μέγιστες θερμοκρασίες και αυξάνει τις ελάχιστες στο Βερολίνο, όπου το κλίμα είναι πιο ψυχρό.

9.3 Στοιχεία πρωτοτυπίας της διατριβής

Στην παρούσα παράγραφο συνοψίζονται τα στοιχεία πρωτοτυπίας της διδακτορικής διατριβής:

- Το Type 1270 του λογισμικού TRNSYS 17, που μοντελοποιεί ένα στρώμα PCM, επικυρώθηκε με την σύγκριση πειραματικών δεδομένων από τη διεθνή βιβλιογραφία, όχι μόνο για την εφαρμογή του σε τοίχους κτηρίου αλλά και για την εφαρμογή του σε δάπεδο. Συγκεκριμένα για την εφαρμογή του PCM σε τοίχους, εκτός από τη σύγκριση με πειραματικά δεδομένα έγινε και σύγκριση αποτελεσμάτων από το λογισμικό EnergyPlus.
- Αξιολογείται η χρήση του PCM ως δομικό υλικό ενός τυπικού κτηρίου στην Αθήνα. Αρχικά μελετάται η ενεργειακή επίδραση της ενσωμάτωσης στρώματος PCM στην οροφή του κτηρίου και η πρωτοτυπία αυτής της μελέτης βασίζεται στη εξέταση και σύγκριση PCM με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης, στην αλλαγή του πάχους της μόνωσης της οροφής και τέλος στην οικονομική αξιολόγηση. Στη συνέχεια, μελετάται η επίδραση στα θερμικά και ψυκτικά φορτία κτηρίου από την ενσωμάτωση στρώματος PCM στο νότιο και στο βόρειο τοίχο. Η πρωτοτυπία αυτής της δεύτερης μελέτης βασίζεται στην εξέταση διαφορετικών σεναρίων με τη θέση του PCM, στην αλλαγή του πάχους της μόνωσης στους δύο τοίχους και τέλος στην οικονομική αξιολόγηση. Επιπλέον, διενεργείται μια τρίτη μελέτη κατά την οποία παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα θερμικά, ψυκτικά φορτία και τα προφίλ της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτηρίου, χωρίς και με ενσωμάτωση στρώματος PCM στο δάπεδο. Η πρωτοτυπία αυτής της μελέτης βασίζεται στην εξέταση και σύγκριση PCM με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης και στην αλλαγή του πάχους της μόνωσης του δαπέδου.
- Πραγματοποιήθηκε επικύρωση ενός απλού ηλιακού ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με PCM στο δάπεδο κτηρίου ύστερα από την σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία.
- Διερευνάται, από ενεργειακής και οικονομικής άποψης, η λειτουργία ενός ηλιακά υποβοηθούμενου ενδοδαπέδιου συστήματος θέρμανσης με βοηθητική πηγή θερμότητας και με στρώμα PCM στο δάπεδο κτηρίου στην Αθήνα. Το σύστημα θέρμανσης περιλαμβάνει επίπεδους συλλέκτες (FPC), δοχείο αποθήκευσης και

βοηθητική πηγή θερμότητας για την παροχή πρόσθετης θέρμανσης όταν δεν υπάρχει επαρκές ηλιακό δυναμικό. Συγκεκριμένα γίνεται παραμετρική ανάλυση προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός του συστήματος. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης είναι η συλλεκτική επιφάνεια, ο όγκος του δοχείου αποθήκευσης, το πάχος της μόνωσης και η θέση του στρώματος PCM (πάνω ή κάτω από τις σωληνώσεις του ενδοδαπέδιου συστήματος). Επιπλέον γίνεται μια πολύ-παραγοντική αξιολόγηση του συστήματος χωρίς και με PCM χρησιμοποιώντας τα κριτήρια της καταναλισκόμενης ενέργειας και του συνολικού κόστους για διαφορετικούς όγκους δοχείου αποθήκευσης.

- ο Μελετώνται ενεργειακά και οικονομικά, για ένα τυπικό κτήριο στην Αθήνα, τρία διαφορετικά συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης με ηλιακά υποβοηθούμενες αντλίες θερμότητας νερού με και χωρίς τη χρήση στρώματος PCM στο δάπεδο. Οι ηλιακοί συλλέκτες όπως ο επίπεδος συλλέκτης (FPC), ο θερμο-φωτοβολταϊκός συλλέκτης (PVT) και ο φωτοβολταϊκός συλλέκτης (PV) είναι οι εξεταζόμενες ηλιακές τεχνολογίες για την τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας με θερμότητα και ηλεκτρισμό. Τα συστήματα αναλύονται ενεργειακά, με μια παραμετρική μελέτη που βασίζεται στις συλλεκτικές επιφάνειες και το πάχος της μόνωσης του δαπέδου, και οικονομικά, με μια παραμετρική μελέτη που βασίζεται στις συλλεκτικές επιφάνειες και τη χρήση του στρώματος PCM στο δάπεδο. Επιπλέον, για πρώτη φορά πραγματοποιείται μια πολύ-παραγοντική αξιολόγηση των συστημάτων με και χωρίς PCM χρησιμοποιώντας ως κριτήρια την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και του συνολικού κόστους. Ακόμα γίνεται μια σύγκριση του κόστους με ένα σύστημα λέβητα. Η πρωτοτυπία αυτής της μελέτης βασίζεται στον συνδυασμό ηλιακά υποβοηθούμενης αντλίας θερμότητας με την ενσωμάτωση ενός στρώματος PCM στο σύστημα ενδοδαπέδιας θέρμανσης που αποτελεί μια ενδιαφέρουσα ιδέα για τη μείωση της ζήτησης φορτίων θέρμανσης του κτηρίου. Δεν υπάρχει άλλη μελέτη που να εξετάζει και να συγκρίνει ενδοδαπέδια συστήματα θέρμανσης με τη χρήση ηλιακά υποβοηθούμενων αντλιών θερμότητας με στρώμα PCM στο δάπεδο κτηρίου, το οποίο χρησιμοποιείται για την αύξηση της χωρητικότητας αποθήκευσης και την αποφυγή της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας κατά τη διάρκεια της περιόδου της μέγιστης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς αυτή η μελέτη παρουσιάζει σημαντική πρωτοτυπία.

- ο Διερευνάται, ενεργειακά και οικονομικά, ένα ηλιακό σύστημα ψύξης με συλλέκτες σωλήνων κενού (ETC) συνδεδεμένο με έναν μονοβάθμιο ψύκτη απορρόφησης, ο οποίος τροφοδοτεί τέσσερις τοίχους ακτινοβολίας με και χωρίς μία

στρώση PCM αντίστοιχα για ένα τυπικό κτήριο στην Αθήνα. Το σύστημα ψύξης περιλαμβάνει συλλέκτες σωλήνων κενού (ETC), δοχείο αποθήκευσης, μονοβάθμιο ψύκτη απορρόφησης και βοηθητική πηγή θερμότητας για την παροχή πρόσθετης θερμότητας στο νερό που πηγαίνει προς τον ψύκτη απορρόφησης. Αρχικά γίνεται ανάλυση ώστε να διαπιστωθεί ο βέλτιστος όγκος δοχείου αποθήκευσης για την κάθε συλλεκτική επιφάνεια, ο οποίος οδηγεί στην ελαχιστοποίηση της βοηθητικής ενέργειας. Ακολουθεί παραμετρική μελέτη με μεταβλητές την συλλεκτική επιφάνεια και την τοποθέτηση του στρώματος PCM σε κάθε τοίχο ακτινοβολίας ξεχωριστά ή σε συνδυασμό αυτών. Η πρωτοτυπία αυτής της μελέτης είναι ο συνδυασμός τριών τεχνολογιών: ένας ηλιακά-υποβοηθούμενος ψύκτης απορρόφησης, οι τοίχοι ακτινοβολίας και η ενσωμάτωση του στρώματος PCM σε αυτούς. Το στρώμα PCM χρησιμοποιείται στους τοίχους ακτινοβολίας, προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα αποθήκευσης και να μειωθεί η λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης. Δεν υπάρχει άλλη μελέτη που να διερευνά την παρούσα διαμόρφωση του εξεταζόμενου συστήματος και έτσι η μελέτη αυτή έρχεται να παρουσιάσει ένα νέο τρόπο για την παραγωγή ψυκτικού φορτίου κτηρίου με μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και να συνδυάσει ένα βελτιωμένο κέλυφος κτηρίου με αυξημένη χωρητικότητα αποθήκευσης.

- Τέλος, μελετάται σύστημα ψύξης με πάνελ οροφής και στρώματος PCM σε κτήριο (γραφείο). Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση της χρήσης στρώματος PCM στην εσωτερική θερμοκρασία γραφείου 17 m² που βρίσκεται στο Βερολίνο και στην Αθήνα. Η μοντελοποίηση του PCM γίνεται με το νέο Type 399 του TRNSYS 18 το οποίο έχει ελάχιστα χρησιμοποιηθεί.

9.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στη παρούσα διατριβή εξετάστηκαν τρία PCM με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης ανάλογα με το εξεταζόμενο-πρωτότυπο κάθε φορά ηλιακό σύστημα για θέρμανση ή για ψύξη ενός τυπικού κτηρίου στην Αθήνα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αρκετές προτάσεις για μελλοντική έρευνα όπως για παράδειγμα:

- Μελέτη για τη δημιουργία PCM με πιο ευνοϊκή ειδική θερμική αγωγιμότητα και με μικρότερο κόστος.
- Τα σύνθετα PCM μπορούν να αποτελέσουν το αντικείμενο μελλοντικών μελετών για τις ηλιακές εφαρμογές για τον προσδιορισμό της επίδρασης των

συστατικών τους στοιχείων στην απόδοση των ενεργητικών και παθητικών ηλιακών συστημάτων.

- Η χρήση PCM σε φωτοβολταϊκά-θερμικά συστήματα που βασίζονται σε νανο-ρευστά δεν έχει μελετηθεί εκτενώς από ερευνητές.
- Για τις εφαρμογές στα κτήρια, τα μακρο-ενσωματωμένα PCM θα ήταν πιο ενεργειακά αποδοτικά εάν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τόσο το καλοκαίρι όσο και το χειμώνα. Ωστόσο, ένα PCM είναι δύσκολο να ικανοποιήσει τόσο τις απαιτήσεις θέρμανσης όσο και ψύξης, καθώς η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης το καλοκαίρι είναι διαφορετική από εκείνη του χειμώνα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, η χρήση δύο τύπων PCM με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης προτάθηκε μέσω της δημιουργίας πίνακα πάνελ δύο στρώσεων PCM. Αναπόφευκτα, η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας των δύο PCM επηρεάζει το ένα από το άλλο, μειώνοντας έτσι τη θερμική απόδοση. Περισσότερες μελέτες είναι απαραίτητες για την υπέρβαση αυτού του περιορισμού. Η εφαρμογή φορητών PCM για εποχιακή αλλαγή θα μπορούσε να αποτελέσει πιθανή λύση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΑΔημοσιεύσεις συγγραφέα**Περιοδικά/ Journals**

- 1) **M.T. Plytaria**, C. Tzivanidis, E. Bellos, K.A. Antonopoulos, Energetic investigation of solar assisted heat pump underfloor heating systems with and without phase change materials, *Energy Conversion and Management* 2018;173:626–639.
- 2) **M.T. Plytaria**, E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, Numerical simulation of a solar cooling system with and without phase change materials in radiant walls of a building, *Energy Conversion and Management* 2019;188:40-53.
- 3) **M.T. Plytaria**, E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, Financial and energetic evaluation of solar assisted heat pump underfloor heating systems with phase change materials, *Applied Thermal Engineering* 2019;149:548-564.
- 4) **M.T. Plytaria**, C. Tzivanidis, E. Bellos, K.A. Antonopoulos, Parametric analysis and optimization of an underfloor solar assisted heating system with phase change materials, *Thermal Science and Engineering Progress* 2019;10:59-72.
- 5) **M.T. Plytaria**, C. Tzivanidis, E. Bellos, I. Alexopoulos, K.A. Antonopoulos, Thermal behavior of a building with incorporated phase change materials in the south and the north wall, *Computational Engineering Journal* 2019;7(2):1-13.
- 6) **M.T. Plytaria**, C. Tzivanidis, I. Alexopoulos, E. Bellos, K.A. Antonopoulos, Comparison of two solar-assisted underfloor heating systems with Phase Change Materials, *International Journal of Thermodynamics (IJOT)* 2019, Under Review.

Συνέδρια/ Conferences

- 1) **M.T. Plytaria**, C. Tzivanidis, E. Bellos, K.A. Antonopoulos, Thermal analysis of a building in Athens with phase change materials in roof using simulation program TRNSYS 17, In Proceedings of 7th International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization, Vol II, pp. 509-518, July 5-18, 2017 Athens, Greece.
- 2) **M.T. Plytaria**, C. Tzivanidis, I. Alexopoulos, E. Bellos, K.A. Antonopoulos, Application of phase change materials on the underfloor heating system of a building in

Athens using TRNSYS simulation software, In Proceedings of 31th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2018), June 17-22, 2018 Guimaraes, Portugal.

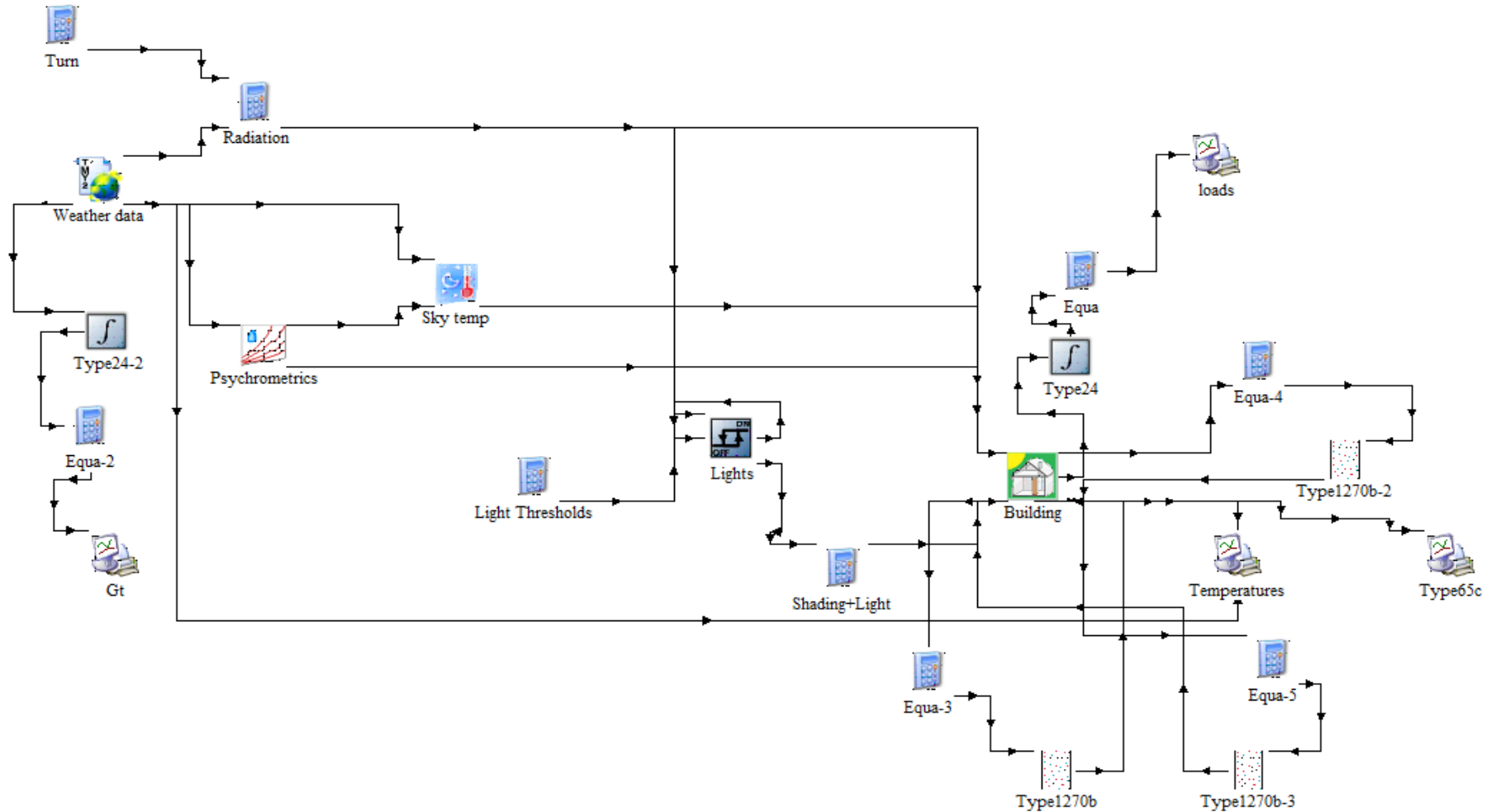
3) **M.T. Plytaria**, C. Tzivanidis, E. Bellos, I. Alexopoulos, K.A. Antonopoulos, The impact of phase change materials in the heating and the cooling loads of a building, In Proceedings of 8th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering, July 4-7, 2018 Athens, Greece.

4) E. Bellos, C. Tzivanidis, **M.T. Plytaria**, Analytical Expression for Thermal Efficiency Coefficients of Parabolic Trough Collectors, In Proceedings of 7th International Conference on Experiments/ Process/ System Modelling/Simulation/Optimization, Vol I, pp. 67-74, July 5-8, 2017 Athens, Greece.

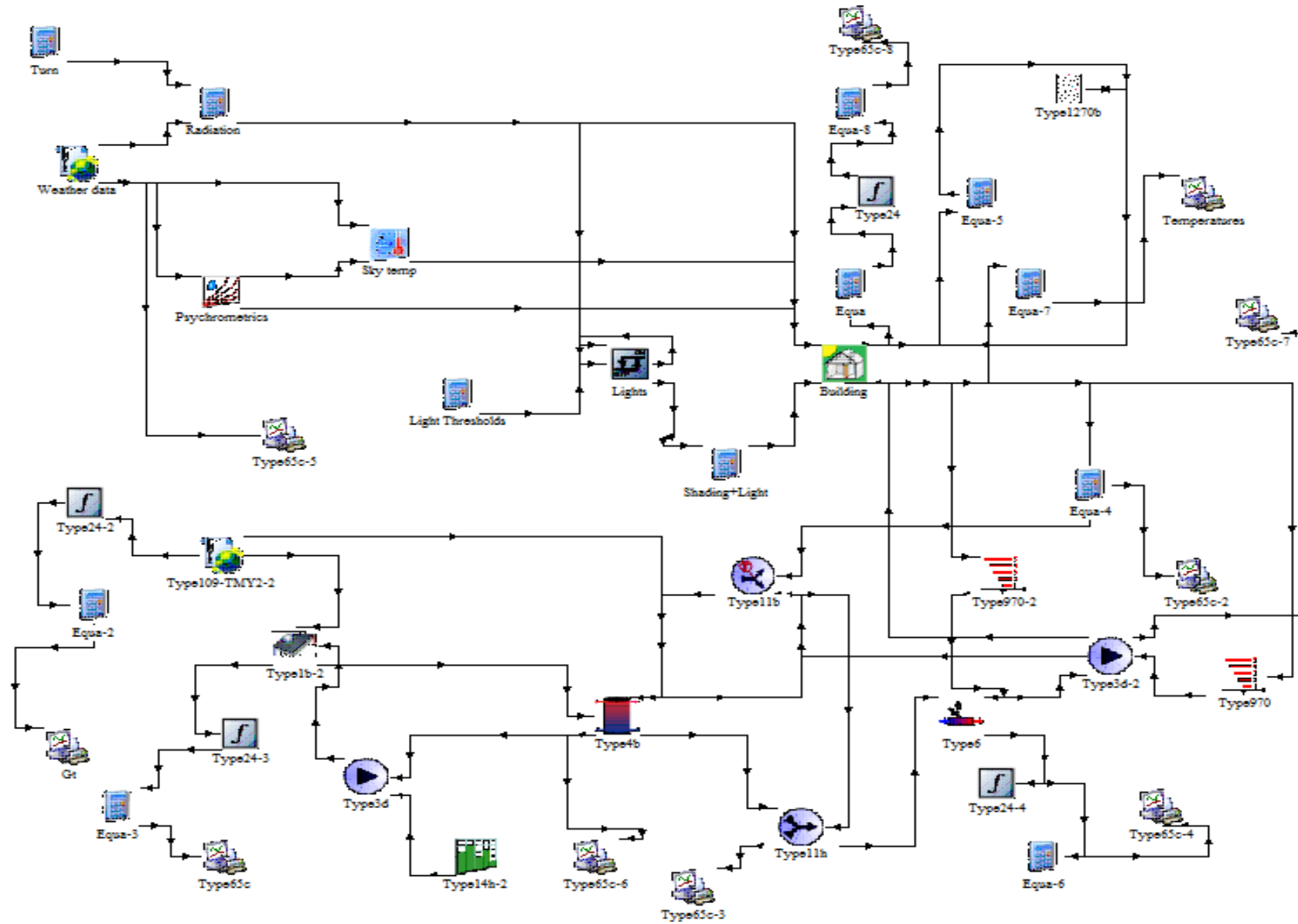
5) I. Alexopoulos, C. Tzivanidis, **M.T. Plytaria**, The impact of fins on the operation of a heat tank with Phase Change Materials (PCM), In Proceedings of 31th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2018), June 17-22, 2018 Guimaraes, Portugal.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

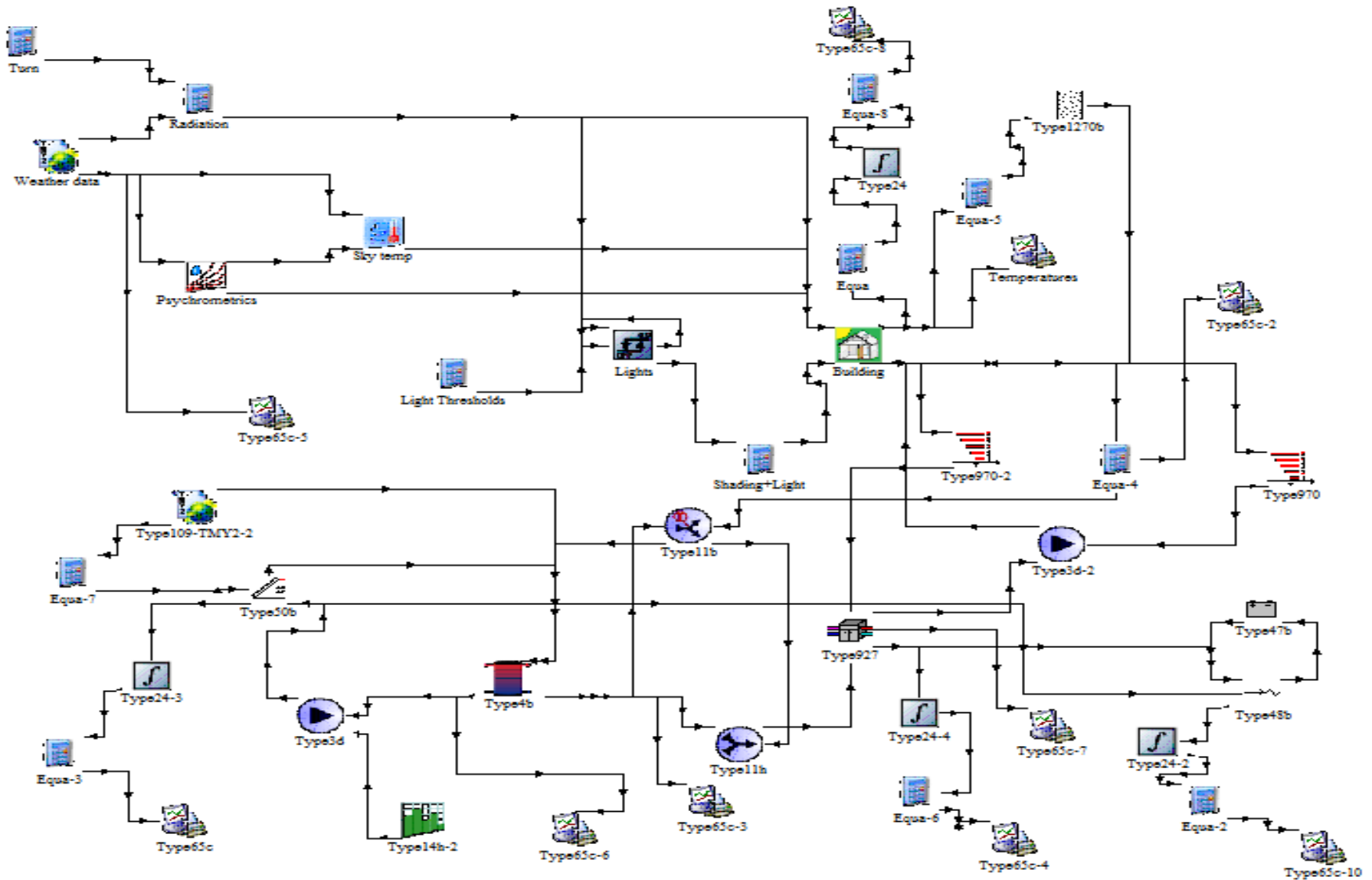
Ολοκληρωμένη διαμόρφωση εξεταζόμενων συστημάτων στο TRNSYS



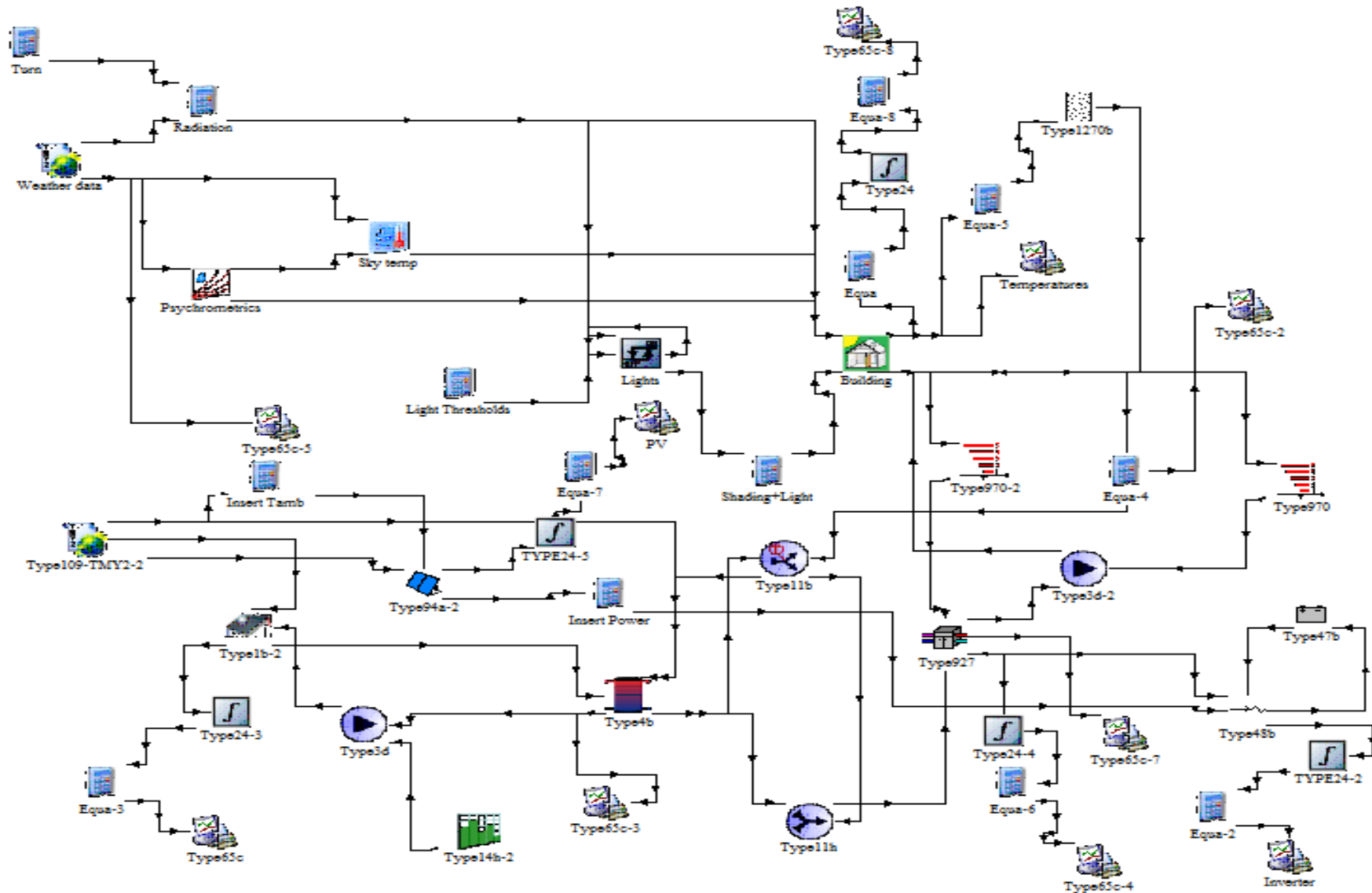
Εικόνα Β1: Ολοκληρωμένη διαμόρφωση συστήματος κεφαλαίου 6, παράγραφος 6.2.1.



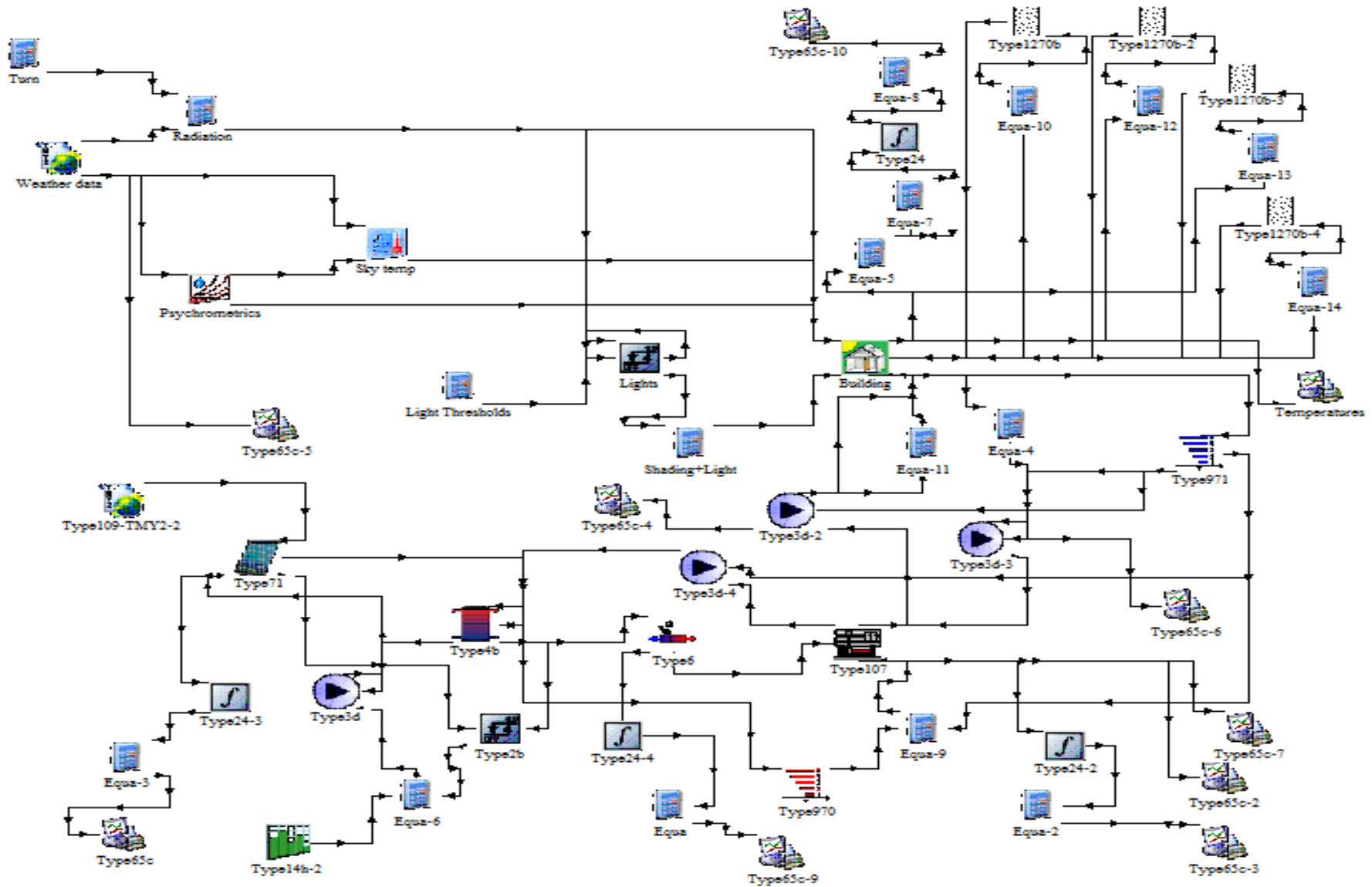
Εικόνα Β2: Ολοκληρωμένη διαμόρφωση συστήματος με PCM κεφαλαίου 7, παράγραφος 7.3.3.



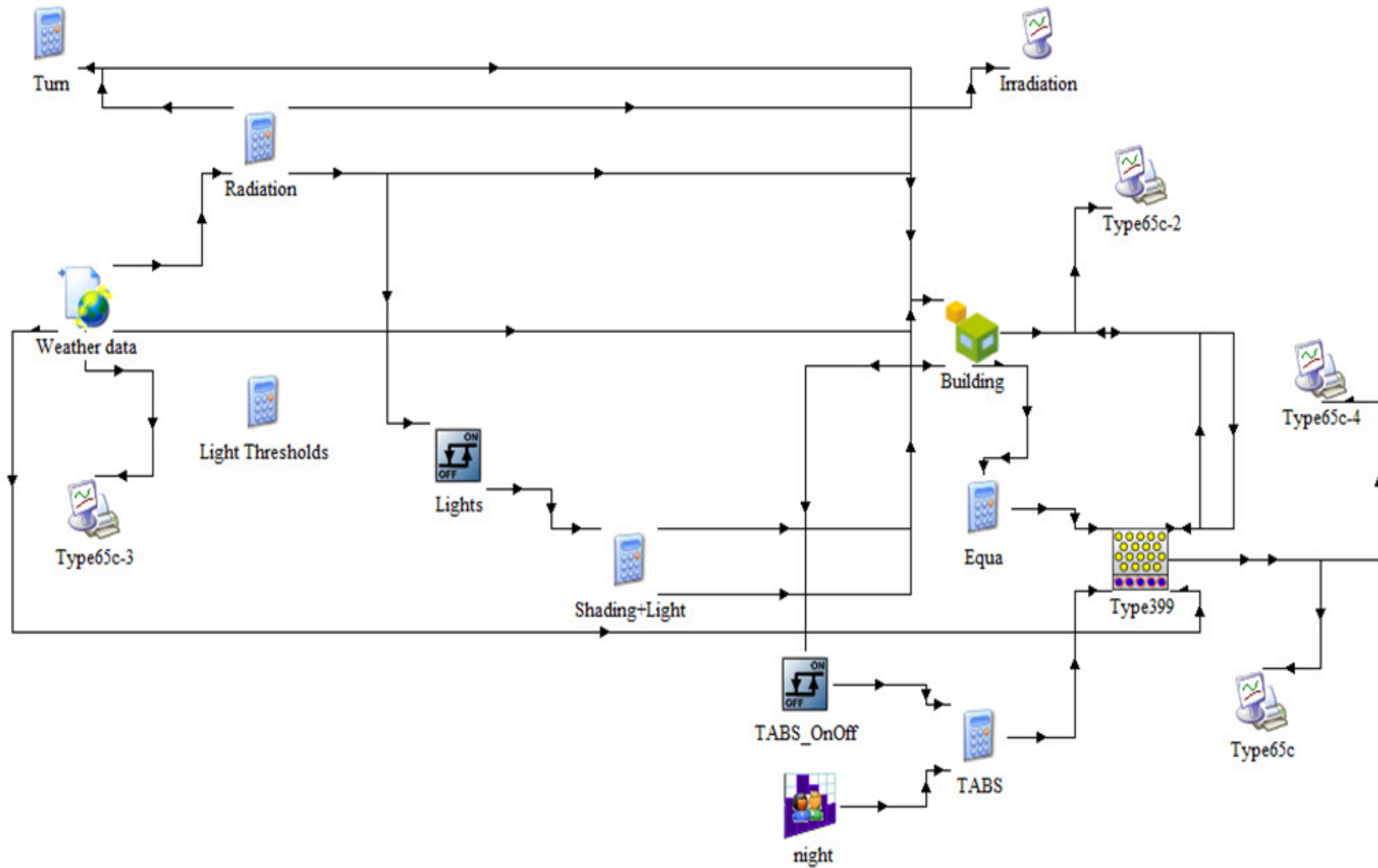
Εικόνα Β4: Ολοκληρωμένη διαμόρφωση συστήματος με PCM κεφαλαίου 7, παράγραφος 7.4.2B.



Εικόνα Β5: Ολοκληρωμένη διαμόρφωση συστήματος με PCM κεφαλαίου 7, παράγραφος 7.4.2Γ.



Εικόνα Β6: Ολοκληρωμένη διαμόρφωση συστήματος με PCM κεφαλαίου 8, παράγραφος 8.2.3.2.



Εικόνα Β7: Ολοκληρωμένη διαμόρφωση συστήματος με PCM κεφαλαίου 8, παράγραφο 8.3.3.