



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

*«Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων με
χρήση Υλικών Αλλαγής Φάσης ενσωματωμένων στη
δομή του κτηρίου»*

Μεταπτυχιακή Διατριβή του

Λημναίου Γεώργιου του Προκοπίου

Επιβλέπων καθηγητής

Επίκουρος Καθηγητής Τσούτσος Θεοχάρης



Φεβρουάριος 2010

*Αφιερώνεται στην αγαπημένη μου
Αγγελική για την υποστήριξή της
και στους μικρούς μου Μάνο και
Δημήτρη για τον χρόνο που έλειψα
από τα παιχνίδια μας*

Περίληψη

Η ζήτηση ενέργειας και το ενεργειακό κόστος αυξάνονται με ανησυχητικούς ρυθμούς καθώς η παγκόσμια οικονομία αναπτύσσεται. Η παραγωγή περισσότερης ενέργειας για να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση αποτελεί κεντρική πολιτική των περισσότερων κρατών του πλανήτη. Σαν αποτέλεσμα αυξάνονται θεαματικά τόσο η χρήση περισσότερων πηγών ορυκτών καυσίμων και πυρηνικής ενέργειας όσο και η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η χρήση των τελευταίων αποτελεί πρωταρχικό μέσο για την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και την αποφυγή των επιπτώσεων που αυτό θα έχει στην παγκόσμια κοινότητα. Προκειμένου ωστόσο να επιτευχθεί ο στόχος αυτός και κυρίως να διατηρηθεί, είναι ζωτική η βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας τόσο σε εμπορικό όσο και σε οικιακό επίπεδο.

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η βελτίωσης που μπορεί να επιτευχθεί στην ενεργειακή απόδοση κτηρίων με την χρήση υλικών αλλαγής φάσης (ΥΑΦ) στον σκελετό του κτηρίου. Η χρήση των ανωτέρω υλικών τόσο στη φάση της επιλογής όσο και στον τρόπο εφαρμογής τους, απαιτεί ρεαλιστική προσομοίωση της ενεργειακής απόκρισης του κτηρίου. Η προσομοίωση έγινε με το υπολογιστικό πακέτο TRNSYS. Συγκεκριμένα το μοντέλου πολυζωνικού κτηρίου (Type 56) του TRNSYS τροποποιήθηκε με την προσαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου υλοποιημένου σε Fortran για την προσομοίωση των υλικών ΥΑΦ. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή η ρεαλιστική προσομοίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς κτηρίων με ενσωματωμένα υλικά ΥΑΦ.

Διερευνήθηκε η απόκριση τριών διαφορετικών τύπων κτηρίων που συναντώνται στην Ελλάδα και διερευνήθηκαν οι επιδράσεις παραγόντων όπως το πάχος του εφαρμοζόμενου ΥΑΦ, η χρήση νυχτερινού αερισμού, η επίδραση τοπικών κλιματικών συνθηκών και η επίδραση της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης.

Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι με την ενσωμάτωση ΥΑΦ στη δομή κτηρίων στην Ελλάδα είναι δυνατή η επίτευξη σημαντικής εξοικονόμησης στην απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης αλλά και ψύξης.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Βασική αρχή λειτουργίας για την ενσωμάτωση ΥΑΦ σε δομικά στοιχεία κτηρίων.....	2
2. Επισκόπηση Βιβλιογραφίας.....	7
2.1 Αποθήκευση θερμότητας.....	7
2.2 Υλικά αλλαγής Φάσης (Phase Change Materials).....	8
2.2.1 Θερμο-Φυσικές.....	9
2.2.2 Κινητικές.....	9
2.2.3 Χημικές.....	9
2.2.4 Οικονομικές.....	10
2.3 Ανάλυση και Ποιοτικός έλεγχος.....	10
2.4 Κατηγοριοποίηση διαθέσιμων ΥΑΦ – μέθοδοι συσκευασίας.....	11
2.5 Εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials) σε κτήρια.....	14
2.6 Επίλυση προβλήματος μεταφοράς θερμότητας σε ΥΑΦ.....	22
3. Μεθοδολογία έρευνας.....	25
3.1 Επιλογή μοντέλου και περιβάλλοντος προσομοίωσης.....	26
3.2 Αναλυτική περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης.....	27
3.2.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά ζωνών.....	28
3.2.2 Προσομοίωση Υλικών ΥΑΦ.....	29
4. Αποτελέσματα Προσομοίωσης και Ανάλυση.....	35
4.1 Προσομοίωση ζωνών με παθητικό κλιματισμό.....	35
4.2 Προσομοίωση σύγχρονων κατασκευών.....	41

4.2.1 Επίδραση πάχους εφαρμοζόμενου ΥΑΦ.....	44
4.2.2 Επίδραση εσωτερικών φορτίων.....	49
4.2.3 Επίδραση νυχτερινού αερισμού.....	54
4.2.4 Επίδραση τοπικών κλιματικών συνθηκών.....	58
4.2.5 Επίδραση θερμοκρασίας αλλαγής φάσης.....	60
4.3 Προσομοίωση παλαιότερων κατασκευών.....	61
4.4 Προσομοίωση προκατασκευασμένων κτηρίων.....	66
5. Συμπεράσματα.....	70
6. Προτάσεις για περαιτέρω αξιοποίηση της μελέτης.....	73

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1. Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ζωνών.....	41
Πίνακας 4.2. Πάχη εφαρμοζόμενου ΥΑΦ στη βιβλιογραφία.....	44
Πίνακας 4.3. Επίδραση πάχους εφαρμοζόμενου ΥΑΦ σε απαιτούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία.....	46
Πίνακας 4.4. Πρότυπα εσωτερικών φορτίων.....	49
Πίνακας 4.5. Μεταβολή (% της αρχικής) απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης για διάφορα εσωτερικά φορτία (θετικό πρόσημο υποδηλώνει μείωση).....	50
Πίνακας 4.6. Μεταβολή (% της αρχικής) απαιτούμενων φορτίων ψύξης για διάφορα εσωτερικά φορτία (θετικό πρόσημο υποδηλώνει μείωση).....	50
Πίνακας 4.7. Μεταβολή (% της αρχικής) απαιτούμενων φορτίων ψύξης για διάφορα εσωτερικά φορτία (θετικό πρόσημο υποδηλώνει μείωση), με εφαρμογή νυχτερινού αερισμού.....	54
Πίνακας 4.8. Μεταβολή (% επί της αρχικής) απαιτούμενων φορτίων ψύξης και θέρμανσης για εσωτερικά φορτία γραφείου για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης (γίνεται εφαρμογή νυχτερινού αερισμού). Πάχος ΥΑΦ 3 cm.....	60
Πίνακας 4.9. Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ζωνών (κτήρια χωρίς μόνωση).....	61
Πίνακας 4.10 Σύγκριση ενεργειακής απόδοσης ζωνών με την προσθήκη ΥΑΦ και συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης (Kelyfos).....	64
Πίνακας 4.11. Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ζωνών (προκατασκευασμένα κτήρια).....	66

Κατάλογος Εικόνων-Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1. Μεταβολή εσωτερικής-εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα και απαιτούμενα θερμικά/ψυκτικά φορτία.....	3
Διάγραμμα 1.2. Μεταβολή εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα σε κτήριο με οπλισμένο σκυρόδεμα και ιδεατά υλικά.....	4
Διάγραμμα 1.3. Μεταβολή εσωτερικής θερμοκρασίας τοίχων με ΥΑΦ για διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης και ενθαλπία αλλαγής φάσης (Heat of Fusion).....	5
Διάγραμμα 2.1. Αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.....	7
Διάγραμμα 2.2. Αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.....	8
Εικόνα 2.1. Κατηγορίες διαθέσιμων ΥΑΦ με τυπικές τιμές λανθάνουσας θερμότητας και εύρος θερμοκρασιών τήξης.....	12
Εικόνα 2.2. Κατηγοριοποίηση των ΥΑΦ.....	12
Εικόνα 2.3. Ενσωμάτωση παραφίνης σε κάψουλες (micro-encapsulation)-Υλικό Micronal ΥΑΦ.....	13
Εικόνα 2.4. Οικίσκοι στο πανεπιστήμιο της Lleida.....	15
Εικόνα 2.5. Σχηματική αναπαράσταση τοίχου μάζας (Tromble Wall).....	16
Εικόνα 2.6. Χρήσεις ΥΑΦ στη δομή κτηρίων.....	17
Εικόνα 2.7. Σκίαστρο (α) και παράθυρο (β) με ΥΑΦ.....	18
Εικόνα 2.8. Σύστημα κλιματισμού με ΥΑΦ (Yamaha&MIsaki).....	19
Εικόνα 2.9. Ηλεκτρικά θερμαινόμενο πάτωμα με ΥΑΦ.....	19
Εικόνα 2.10. Διάρκεια αποπληρωμής επένδυσης ως συνάρτηση της τιμής του ΥΑΦ και των χρεώσεων ενέργειας.....	20

Εικόνα 2.11. Διάρκεια αποπληρωμής επένδυσης ως συνάρτηση της επιδότησης της εξοικονομούμενης ενέργειας.....	20
Εικόνα 2.12. Ηλιακό σύστημα θέρμανσης με ΥΑΦ ενσωματωμένο σε οροφή.....	21
Εικόνα 2.13. Θερμικά ενεργή ψευδο-οροφή με ΥΑΦ για ψύξη.....	22
Εικόνα 3.1. Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων Πολυτεχνείου Κρήτης.....	29
Εικόνα 3.2. Διάταξη κόμβων στο χώρο στο μοντέλο ΥΑΦ Type 204.....	30
Διάγραμμα 3.1. Πειραματική καμπύλη (ενδεικτική) μεταβολής θερμικής χωρητικότητας υλικού ΥΑΦ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.....	31
Διάγραμμα 3.2. Καμπύλη μεταβολής θερμικής χωρητικότητας υλικού ΥΑΦ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας στο μοντέλο Type 204.....	31
Εικόνα 3.3. Επικονίαμα (Σοβάς) με ΥΑΦ (Maxit Clima).....	32
Εικόνα 3.4. Γυψοσανίδα με ΥΑΦ (Micronal ΥΑΦ Smartboard).....	33
Εικόνα 3.5. Μοντέλο των δύο ζωνών με ενσωματωμένο το μοντέλο ΥΑΦ Type 204.....	34
Διάγραμμα 4.1. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες ως συνάρτηση της θερμοκρασία περιβάλλοντος.....	35
Διάγραμμα 4.2 (α) Θερμοκρασία ζώνης με ΥΑΦ και συμβατικής κατασκευής (πάχος ΥΑΦ 5 mm) σε συνθήκες της Ελλάδας από 15 Αυγούστου έως 6 Σεπτεμβρίου (β) Θερμοκρασία τοίχου με ΥΑΦ σε σύγκριση με ένα συμβατικό τοίχο και (γ) Κατανομή θερμοκρασιών εσωτερικά του τοίχου με ΥΑΦ....	37
Διάγραμμα 4.3. Μεταβολή θερμοκρασίας εσωτερικά του ΥΑΦ σε συνεχή θέρμανση (α) TRNSYS και (β) BSim.....	39
Διάγραμμα 4.4. Μεταβολή θερμοκρασίας εσωτερικά του ΥΑΦ κατά την ψύξη (α) TRNSYS και (β) BSim.....	40
Διάγραμμα 4.5. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις	

δύο ζώνες με απενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης.....	42
Διάγραμμα 4.6. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 1.5 cm).....	43
Διάγραμμα 4.7. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ε νεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 1.5 cm).....	43
Διάγραμμα 4.8. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....	44
Διάγραμμα 4.9. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....	45
Διάγραμμα 4.10. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).....	46
Διάγραμμα 4.11. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).....	47
Διάγραμμα 4.12. Μείωση απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης ως συνάρτηση του πάχους του εφαρμοζόμενου ΥΑΦ.....	47
Διάγραμμα 4.13. Μείωση απαιτούμενων φορτίων ψύξης ως συνάρτηση του πάχους του εφαρμοζόμενου ΥΑΦ.....	48
Διάγραμμα 4.14. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....	50

Διάγραμμα 4.15. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....	51
Διάγραμμα 4.16. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).....	51
Διάγραμμα 4.17. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).....	52
Διάγραμμα 4.18. Μείωση (%) των απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης και της διάστασης του συστήματος θέρμανσης ως συνάρτηση των εσωτερικών θερμικών φορτίων και του πάχους εφαρμοζόμενου ΥΑΦ.....	53
Διάγραμμα 4.19. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).....	54
Διάγραμμα 4.20. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).....	55
Διάγραμμα 4.21. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....	55
Διάγραμμα 4.22. Μεταβολή θερμοκρασίας του τοίχου με ΥΑΦ με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).....	56
Διάγραμμα 4.23. Μείωση (%) των απαιτούμενων φορτίων ψύξης και της	

διάστασης του συστήματος ψύξης ως συνάρτηση των εσωτερικών θερμικών φορτίων και του πάχους εφαρμοζόμενου ΥΑΦ.....57

Διάγραμμα 4.24. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία. Κλιματικές συνθήκες Σούδας - απαιτούμενα θερμικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3cm).....58

Διάγραμμα 4.25. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία. Κλιματικές συνθήκες Σούδας - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....59

Διάγραμμα 4.26. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά εσωτερικά φορτία και χρήση νυχτερινού αερισμού. Κλιματικές συνθήκες Σούδας - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....59

Διάγραμμα 4.27. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα θερμικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....62

Διάγραμμα 4.28. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα θερμικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm και μόνωσης 2 cm)..64

Διάγραμμα 4.29. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm και μόνωσης 2 cm).....65

Διάγραμμα 4.30. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά εσωτερικά φορτία και χρήση νυχτερινού αερισμού- απαιτούμενα ψυκτικά φορτία

(Πάχος ΥΑΦ 3 cm και μόνωσης 2 cm).....65

Διάγραμμα 4.31. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά εσωτερικά φορτία

- απαιτούμενα θερμικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....67

Διάγραμμα 4.32. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά

εσωτερικά φορτία και χωρίς τη χρήση νυκτερινού αερισμού –

απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....68

Διάγραμμα 4.33. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά εσωτερικά

φορτία και τη χρήση νυκτερινού αερισμού –

απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).....69

1. Εισαγωγή

Ο κύριος ρόλος των κτηρίων είναι η προστασία του ανθρώπου από τις ακραίες κλιματικές συνθήκες. Ολόκληρη η ιστορία του ανθρώπου αποδεικνύει τη συνεχή προσπάθειά του να επιλέξει ή να κατασκευάσει κατάλληλα καταφύγια. Έτσι οι παραδοσιακές μορφές δόμησης έδιναν ιδιαίτερη προσοχή στις κλιματικές συνθήκες και χρησιμοποιούσαν παθητικές τεχνικές ώστε να εξασφαλίσουν δροσερές συνθήκες το καλοκαίρι και επαρκή θέρμανση το χειμώνα στον εσωτερικό χώρο των κτηρίων. Η μοντέρνα αρχιτεκτονική αντίθετα αγνόησε σε μεγάλο βαθμό της τεχνικές αυτές στηριζόμενη σε ενεργοβόρες, μηχανικές μεθόδους θέρμανσης και ψύξης.

Ως συνέπεια του γεγονότος αυτού ο κτηριακός, θεωρείται ένας από τους πιο ενεργοβόρους τομείς, όντας υπεύθυνος για το 25-40% της συνολικής ζήτησης ενέργειας στις χώρες του οργανισμού οικονομικής συνεργασίας και ανάπτυξης (μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα) και για το 40% της καταναλισκόμενης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο [Zhu et al., 2009]. Επιπρόσθετα οι απαιτήσεις αυτές σε ενέργεια αυξάνονται με ρυθμό γεωμετρικής προόδου ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται σημαντικά και η μεταβλητότητα της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (και συνεπώς και οι απαιτήσεις για μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ) δημιουργώντας πολλά προβλήματα στο δίκτυο παραγωγής και διανομής. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι ο όλο και μεγαλύτερος ανταγωνισμός για την εκμετάλλευση πηγών ορυκτών καυσίμων.

Ταυτόχρονα η συνεχιζόμενη άνοδος των επιπέδων των αερίων του θερμοκηπίου και η αύξηση των τιμών των ορυκτών καυσίμων είναι η κύρια κινητήρια δύναμη πίσω από τις προσπάθειες για την όλο και πιο αποτελεσματική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε πολλές χώρες του κόσμου η ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται από τις περισσότερο υποσχόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενώ επιστήμονες από όλο τον κόσμο ερευνούν για νέες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Προκειμένου να επιτευχθούν, και κυρίως να διατηρηθούν, οι στόχοι μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ζωτική η αναθεώρηση του τρόπου που η ενέργεια αυτή καταναλώνεται στον εμπορικό και οικιακό τομέα.

Η αξιοποίηση μεθόδων εξοικονόμησης και αποθήκευσης ενέργειας είναι ουσιαστικά το ίδιο σημαντική όσο και η ανάπτυξη νέων πηγών. Έτσι τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια νέα τάση στη δόμηση που αναζητεί την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης με ελαχιστοποίηση της χρήσης συμβατικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό εντάσσεται και η χρήση των υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials (PCMs) ή ΥΑΦ) στη δόμηση. Μέσω της λανθάνουσας θερμότητας (latent heat) τα υλικά αυτά μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ μεγαλύτερη θερμική ενέργεια σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά (τούβλο, Μπετόν, πέτρα), που στηρίζονται μόνο στην αισθητή θερμότητα (sensible heat), με αποτέλεσμα να μπορούν να προσθέσουν πολύ μεγαλύτερη θερμική μάζα ανάλογα με τον όγκο τους, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα ότι η αποθήκευση της ενέργειας αυτής και η ανάκτησή της γίνονται σχεδόν ισοθερμικά.

Τα χαρακτηριστικά αυτά τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές ψύξης/θέρμανσης χώρων.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται τα πιθανά ενεργειακά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την ενσωμάτωση ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία κτηρίων. Εμπορικά διαθέσιμα ΥΑΦ (της εταιρείας maxit clima) ενσωματώθηκαν στο εσωτερικό τυπικών κτηρίων που βρίσκονται στην Ελλάδα. Το μοντέλο προσομοιώνει την συμπεριφορά των κτηρίων ολόκληρο τον χρόνο στις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας και βασίζεται στο υπολογιστικό πακέτο TRNSYS. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να εξάγουμε ποσοτικά αποτελέσματα της συμπεριφοράς ολόκληρου του κτηρίου που δύσκολα μπορούν να εξαχθούν στο εργαστήριο και θα μπορούσαν να αποτελέσουν την βάση για μια πιλοτική εφαρμογή. Η μελέτη εστιάστηκε στη καθαρή μείωση του απαιτούμενου φορτίου ψύξης και θέρμανσης σε ένα περιβάλλον ενεργητικής ψύξης/θέρμανσης με την χρήση των ΥΑΦ. Οι κύριες παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν τα χαρακτηριστικά του ΥΑΦ (όπως το πάχος του υλικού εφαρμογής και το εύρος των θερμοκρασιών τήξης-πήξης), τα εσωτερικά φορτία (φορτία που παράγονται από τους χρήστες, τον φωτισμό τις ηλεκτρικές συσκευές κ.α.), η επίδραση παθητικών τεχνικών (νυχτερινός αερισμός) και η θερμική μάζα των κτηρίων όπου γίνεται η επέμβαση.

1.1 Βασική αρχή λειτουργίας για την ενσωμάτωση ΥΑΦ σε δομικά στοιχεία κτηρίων

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την εσωτερική θερμοκρασία αέρα στα κτήρια. Σε αυτούς περιλαμβάνονται:

- (α) οι κλιματικές συνθήκες (εξωτερική θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία κ.α.),
- (β) η δομή του κτηρίου, ο προσανατολισμός και τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των υλικών του (πάχος τοίχων, μέγεθος παραθύρων, θερμική αγωγιμότητα και χωρητικότητα των υλικών των τοίχων κ.α.)
- (γ) οι εσωτερικές πηγές θερμότητας (φορτία)
- (δ) Ο ρυθμός αερισμού (Air Change rate per Hour, ACH)
- (ε) τα συστήματα ψύξης και θέρμανσης κ.α.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1 [Zhang et al., 2007], η διαφορά μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας και της ζώνης θερμικής άνεσης καθορίζει τα θερμικά και ψυκτικά φορτία που απαιτούνται για τη θέρμανση και ψύξη του χώρου. Επομένως τα φορτία αυτά θα μειωθούν με την μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς.

Για ένα δεδομένο κτήριο που βρίσκεται σε μια δεδομένη περιοχή, οι παραπάνω παράμετροι είναι γνωστές. Η εξωτερική θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να υπολογιστούν κάθε στιγμή κατά τη διάρκεια ενός τυπικού μετεωρολογικού έτους με τη βοήθεια ενός από τα πολλά υπολογιστικά πακέτα όπως το Medha (Meteorological Data Producer for HVAC Analysis), TRNSYS, ESP-r κ.α. Για ένα δεδομένο εσωτερικό φορτίο η θερμοκρασία του δωματίου (χωρίς τη χρήση συστήματος θέρμανσης/ψύξης) t_{in} είναι μια συνάρτηση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των υλικών του κτηρίου (δηλαδή της

θερμικής αγωγιμότητας k και του γινομένου της ειδικής θερμοχωρητικότητας με την πυκνότητα ρc_p). Με άλλα λόγια,

$$t_{in} = f_1(ACH, k, \rho c_p)$$

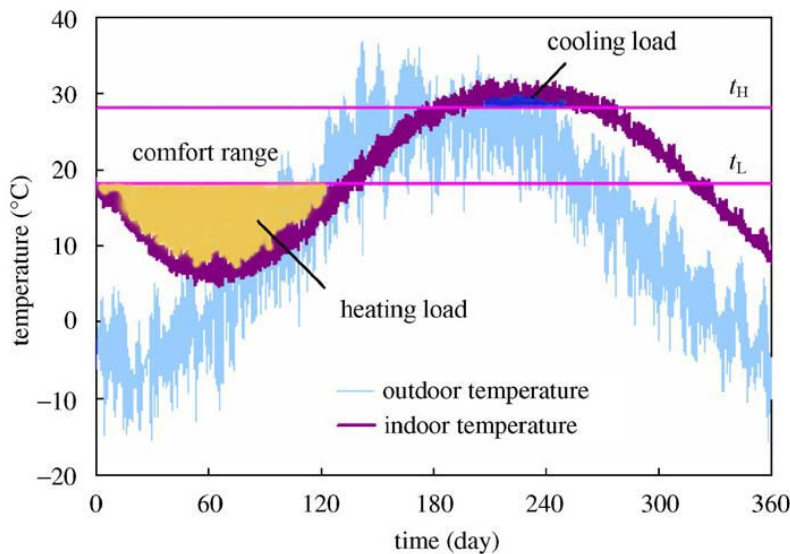
Οπότε:

$$k = f_2(ACH, t_{in}, \rho c_p)$$

ή

$$\rho c_p = f_3(ACH, t_{in}, k)$$

Δηλαδή μπορούμε να υπολογίσουμε τις επιθυμητές τιμές της θερμικής αγωγιμότητας k , και του γινομένου πυκνότητας επί την ειδική θερμοχωρητικότητα ρc_p , ώστε για δεδομένο ρυθμό αερισμού (ACH), η εσωτερική θερμοκρασία του κτηρίου t_{in} να παραμείνει εντός των ορίων που ορίζουν την περιοχή θερμικής άνεσης (t_L , t_H στο διάγραμμα 1.1). Βέβαια θα πρέπει να τονιστεί ότι γενικά η θερμική άνεση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες εκτός της θερμοκρασίας αέρα, όπως η θερμοκρασία των τοίχων, η υγρασία κ.α. ωστόσο για να απλοποιήσουμε τα πράγματα μπορούμε να αγνοήσουμε αυτή την εξάρτηση. Για τη συγκεκριμένη εργασία οι τιμές θερμοκρασίας αέρα που χαρακτηρίζουν το επίπεδο θερμικής άνεσης ορίστηκαν 20 και 26 °C, ωστόσο τα όρια μπορούν να είναι πιο ελαστικά μεταξύ των 18 και 28 °C.



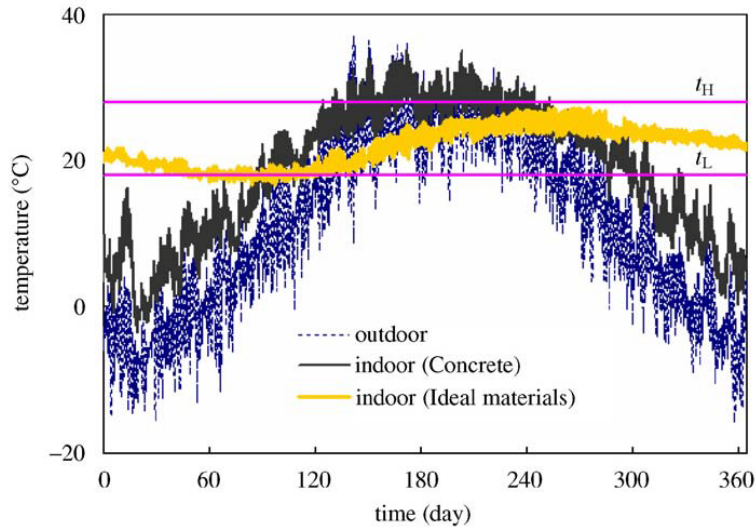
Διάγραμμα 1.1. Μεταβολή εσωτερικής-εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα και απαιτούμενα θερμικά/ψυκτικά φορτία. [Zhu et al., 2006]

Μπορούμε για ευκολία να υιοθετήσουμε τον ορισμό δύο παραμέτρων I_{win} , I_{sum} ώστε να μελετήσουμε την επίδραση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων διαφορετικών υλικών στην θερμική άνεση [Zhang et al., 2006]:

$$I_{sum} = \int_{year} (t_{in} - t_H) d\tau \text{ όταν } t_{in} > t_H$$

$$I_{win} = \int_{year} (t_L - t_{in}) d\tau \text{ όταν } t_{in} < t_L$$

Οι δύο αυτές παράμετροι περιγράφουν το επίπεδο έλλειψης θερμικής άνεσης του κτηρίου το καλοκαίρι και τον χειμώνα αντίστοιχα. Είναι φανερό από τα παραπάνω ότι αν μπορούσαμε να επιλέξουμε υλικά των οποίων τα χαρακτηριστικά (k , ρc_p) ήταν τέτοια ώστε να ικανοποιούν τη συνθήκη $I_{sum} = I_{win} \approx 0$, τότε η εσωτερική θερμοκρασία του κτηρίου θα παρέμενε πάντα μέσα στη ζώνη άνεσης και τα υλικά αυτά είναι ιδεατά. Στο διάγραμμα 1.2 φαίνεται συγκριτικά η συμπεριφορά των ιδεατών υλικών και μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα στις κλιματικές συνθήκες του Πεκίνου. Στις συνθήκες αυτές τα χαρακτηριστικά των ιδεατών υλικών υπολογίστηκαν [Zhang 2006] να είναι $k_1=0.05W/(m^0C)$ [η θερμική αγωγιμότητα του εξωτερικού τοίχου], $k_2=0.5W/(m^0C)$ [η θερμική αγωγιμότητα του εσωτερικού τοίχου] και $\rho c_p=100MJ/(m^3^0C)$. Μπορεί εύκολα κανείς να δει πως τα ιδεατά υλικά έχουν σαν αποτέλεσμα τη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας σε επίπεδα θερμικής άνεσης.

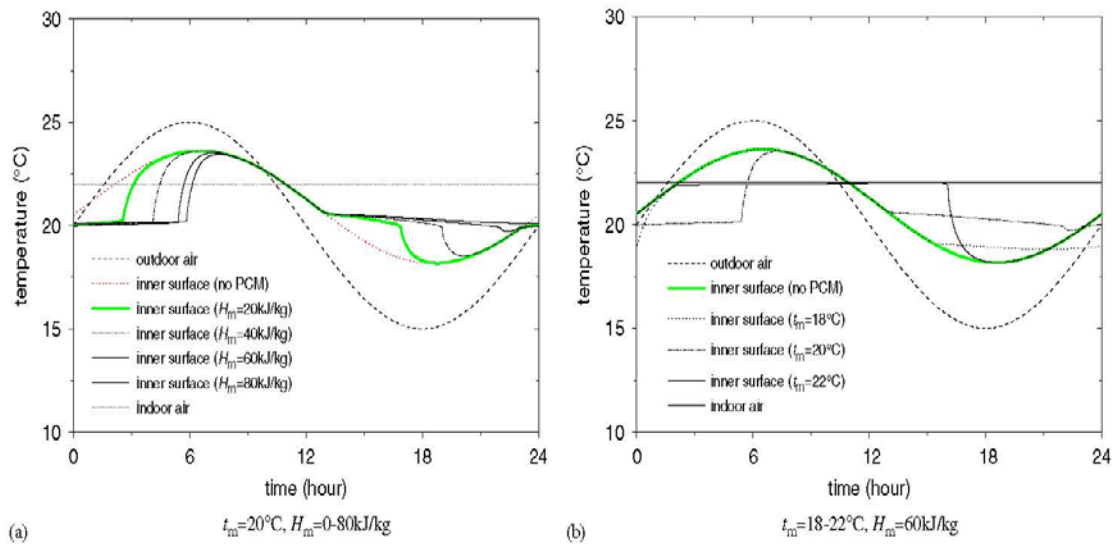


Διάγραμμα 1.2. Μεταβολή εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα σε κτήριο με οπλισμένο σκυρόδεμα και ιδεατά υλικά [Zhu et al., 2009].

Στην πράξη βέβαια τέτοια ιδεατά υλικά, με τόσο υψηλή τιμή ρc_p ($=100MJ/(m^3^0C)$), δεν υπάρχουν, ωστόσο καταλαβαίνει κανείς γιατί τα ΥΑΦ που μπορούν να αποθηκεύσουν μια ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητα θερμικής ενέργειας σε ένα μικρό εύρος θερμοκρασιών θεωρούνται από πολλούς ερευνητές υλικά κατάλληλα για ενσωμάτωση σε κτήρια.

Εκτός όμως από τα παραπάνω, η ενσωμάτωση των ΥΑΦ στους εσωτερικούς τοίχους κατασκευών έχει ως συνέπεια τη διατήρηση της θερμοκρασίας τους σε επιθυμητά επίπεδα (κοντά στο σημείο τήξης). Όπως έχει

δειχθεί και πειραματικά [Asan et al., 1998], με την προσθήκη ΥΑΦ η μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας των τοίχων παρουσιάζει μη-γραμμικά φαινόμενα που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία τήξης και την ενθαλπία αλλαγής φάσης (Heat of Fusion), σε αντίθεση με την πλήρως γραμμική απόκριση των συμβατικών τοίχων (διάγραμμα 1.3).



Διάγραμμα 1.3. Μεταβολή εσωτερικής θερμοκρασίας τοίχων με ΥΑΦ για διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης και ενθαλπία αλλαγής φάσης (Heat of Fusion).

Η διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας των τοίχων σε σταθερό επίπεδο εμποδίζει την μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα και συνεπώς με την κατάλληλη επιλογή της θερμοκρασίας τήξης και ενθαλπίας αλλαγής φάσης μπορεί κανείς να διατηρήσει την εσωτερική θερμοκρασία σε επίπεδα θερμικής άνεσης.

Με βάση τα παραπάνω η επιλογή του κατάλληλου ΥΑΦ για εφαρμογή σε δομικά στοιχεία κτηρίων βασίζεται σε τρία κριτήρια:

(1) Η ενθαλπία αλλαγής φάσης θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε η εσωτερική επιφάνεια του τοίχου που περιέχει ΥΑΦ να παραμένει στη θερμοκρασία τήξης σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.

(2) Η θερμική αγωγιμότητα του υλικού ΥΑΦ θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί αυτό εύκολα να απορροφά θερμότητα αλλά και να την αποδίδει στο περιβάλλον κατά την αποφόρτιση. Η δυνατότητα του υλικού να εκτελεί έναν πλήρη κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης στη διάρκεια της μέρας είναι κρίσιμη για την επιτυχή εφαρμογή του.

(3) Η θερμοκρασία τήξης θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στη ζώνη θερμικής άνεσης. Η ακριβής επιλογή της θερμοκρασίας αυτής εξαρτάται από το κλίμα της περιοχής εφαρμογής αλλά και τον τρόπο λειτουργίας του κτηρίου. Στην περίπτωση ενεργού κλιματισμού αν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ υψηλή ή χαμηλή το ΥΑΦ δεν θα χρησιμοποιείται καθόλου ή ελάχιστα αφού το σύστημα θέρμανσης/ψύξης δεν θα επιτρέπει στον τοίχο με ΥΑΦ να φτάσει στη

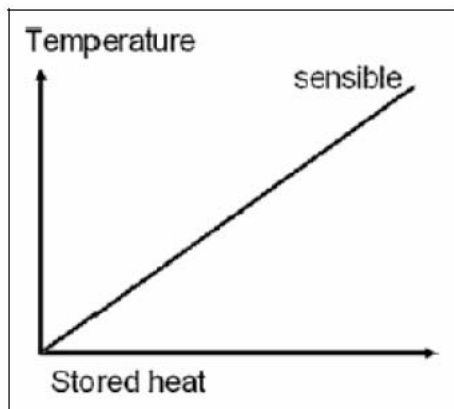
θερμοκρασία τήξης. Για θέρμανση έχει βρεθεί [Heim & Clark 2004] ότι η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης είναι 22°C, 2 °C πάνω από την θερμοκρασία που ενεργοποιεί το σύστημα θέρμανσης.

2. Επισκόπηση Βιβλιογραφίας

2.1 Αποθήκευση θερμότητας

Η αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή θερμότητας είναι μια τεχνολογία που μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και την εξισορρόπηση παροχής και ζήτησης ενέργειας ιδιαίτερα στον τομέα της θέρμανσης ή ψύξης χώρων. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας διάφορες χημικές ή φυσικές διεργασίες που η κάθε μια έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης θερμότητας είναι υπό τη μορφή της αισθητής θερμότητας. Στο διάγραμμα 2.1 που ακολουθεί, φαίνεται ότι καθώς αποθηκεύεται θερμότητα υπό τη μορφή αισθητής θερμότητας, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού.

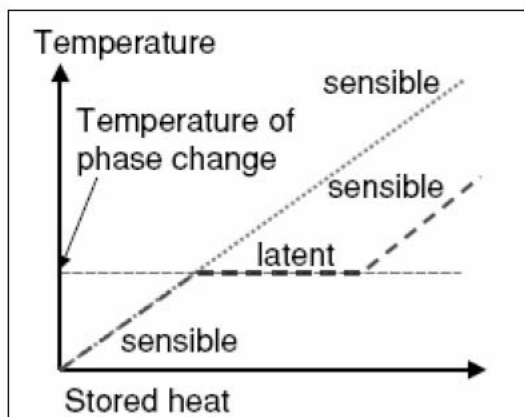


Διάγραμμα 2.1. Αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [Mehling and Cabeza, 2008]

Η αύξηση θερμοκρασίας μπορεί να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα και η θερμότητα που αποθηκεύεται ονομάζεται αισθητή θερμότητα. Η αποθήκευση θερμότητας υπό μορφή αισθητής θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο σε στερεά δομικά στοιχεία, όπως τούβλο, πέτρα κα, καθώς επίσης και σε υγρά, όπως το νερό. Τα αέρια λόγω της χαμηλής θερμοχωρητικότητάς τους δεν χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Στα σύγχρονα κτήρια το μεγάλο κόστος είναι ο κύριος παράγοντας που εμποδίζει την ανάπτυξη τεχνικών αποθήκευσης με τη μέθοδο της αισθητής θερμότητας καθώς απαιτείται μεγάλη μάζα υλικού για την επίτευξη ικανοποιητικής χωρητικότητας αποθήκευσης.

Μια άλλη τεχνική αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι η αποθήκευση με τη μορφή λανθάνουσας ενέργειας (latent heat), δηλαδή με την αλλαγή φάσης του υλικού στο οποίο αποθηκεύουμε θερμότητα (διάγραμμα 2.2). Όσο και αν αυτό

φαίνεται παράξενο, αυτή είναι μια πανάρχαια τεχνική αφού ένα από τα πρώτα μέσα αποθήκευσης θερμότητας (κρύου) υπήρξε ο πάγος.



Διάγραμμα 2.2. Αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή λανθάνουσας θερμότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [Mehling and Cabeza, 2008]

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι αποθήκευσης που χαρακτηρίζονται από τον τύπο της αλλαγής φάσης. Γενικά για εφαρμογές κτηρίων η μετάβαση από στερεό ή υγρό σε αέριο δεν εφαρμόζεται λόγω των υψηλών πιέσεων (ή του μεγάλου όγκου) που απαιτούνται όταν το υλικό είναι στην αέρια φάση. Η μετάβαση από στερεό σε στερεό (όταν η αποθηκευόμενη ενέργεια αλλάζει την κρυσταλλική δομή του υλικού) αφορά μικρή αλλαγή όγκου και παρέχει μεγαλύτερη ευχέρεια στους σχεδιαστές, ωστόσο αφορά συνήθως μικρές ποσότητες λανθάνουσας θερμότητας που την καθιστούν ασύμφορη [Regin et al., 2008]. Η μετάβαση από στερεό σε υγρό αποθηκεύει συγκριτικά μικρότερα ποσά λανθάνουσας ενέργειας σε σχέση με τη μετάβαση από υγρό σε αέριο, ωστόσο οι μικρότερες μεταβολές όγκων που εμπλέκονται την καθιστούν οικονομικά πιο συμφέρουσα. Όλες οι παραπάνω αλλαγές φάσης πρέπει να είναι αντιστρέψιμες με σχεδόν ισοθερμική μετάβαση [Sharma et al., 2009].

2.2 Υλικά αλλαγής Φάσης

Τα υλικά που αλλάζουν φάση στο εύρος των θερμοκρασιών της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται ονομάζονται Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ). Τα ΥΑΦ είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, που χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα, ωστόσο αποθηκεύουν και αισθητή θερμότητα. Κάθε ΥΑΦ έχει μια θερμοκρασία τήξης στην οποία αλλάζει φάση αποθηκεύοντας ενέργεια σε μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Όταν η θερμοκρασία κατέβει χαμηλότερα από το σημείο τήξης το υλικό στερεοποιείται εκλύοντας την αποθηκευμένη ενέργεια στο περιβάλλον σε σταθερή θερμοκρασία. Σε θερμοκρασίες μακριά από το σημείο τήξης το ΥΑΦ λειτουργεί όπως και τα συμβατικά υλικά αποθηκεύοντας αισθητή θερμότητα. Σε

αντίθεση ωστόσο με τα συμβατικά υλικά όπως το τούβλο, το Μπετόν ή το νερό, μπορεί να αποθηκεύσει 5-14 φορές περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου.

Είναι προφανές ότι προκειμένου ένα ΥΑΦ να χρησιμοποιηθεί εμπορικά για κάποια εφαρμογή, θα πρέπει να ικανοποιεί κάποια κριτήρια και να επιδεικνύει συγκεκριμένες θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές ιδιότητες. Επιπλέον οικονομικά κριτήρια όπως η διαθεσιμότητα του υλικού θα πρέπει να εξεταστούν. Οι κύριες ιδιότητες που θα πρέπει να ικανοποιούνται με έμφαση στην χρήση των ΥΑΦ στα κτήρια είναι οι παρακάτω:

2.2.1 Θερμο-Φυσικές

Είναι πολύ σημαντικό η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του ΥΑΦ να βρίσκεται μέσα στο εύρος θερμοκρασιών της συγκεκριμένης εφαρμογής. Η διαδικασία τήξης που λαμβάνει χώρα στη θερμοκρασία αυτή θα πρέπει επιπλέον να παράγει αρκετή λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου ώστε να ικανοποιήσει τις ανάγκες αποθήκευσης της συγκεκριμένης εφαρμογής περιορίζοντας ταυτόχρονα τον όγκο του υλικού που απαιτείται. Πέρα από τη λανθάνουσα θερμότητα ωστόσο και η αισθητή θερμότητα που μπορεί να αποθηκευτεί από το ΥΑΦ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Η αποδοτικότητα με την οποία η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να επανακτηθεί είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας. Η μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας αυτής μπορεί να γίνει με την επιλογή ενός υλικού με υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

2.2.2 Κινητικές

Η αλλαγή φάσης του υλικού ΥΑΦ κατά τους κύκλους της φόρτισης και αποφόρτισης θα πρέπει να είναι ολοκληρωτική και ομογενής. Ένα πρόβλημα που αναγνωρίστηκε στη συμπεριφορά αρκετών υλικών αλλαγής φάσης είναι το φαινόμενο της υπερ-ψύξης ή υπό-ψύξης (super-cooling ή sub-cooling). Το φαινόμενο αυτό δεν επιτρέπει στο ΥΑΦ να στερεοποιηθεί αμέσως κατά την ψύξη στη θερμοκρασία τήξης αλλά αρχίζει να κρυσταλλοποιείται όταν η θερμοκρασία φτάσει αρκετά χαμηλότερα, με αποτέλεσμα η έκλυση της αποθηκευμένης ενέργειας να γίνεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών 5-10°C χαμηλότερα από το σημείο τήξης [Cabeza, 2008].

Επίσης ο ικανοποιητικός ρυθμός κρυσταλλοποίησης είναι σημαντικός παράγοντας που εγγυάται ότι η ζήτηση θερμότητας μπορεί να καλυφθεί από το σύστημα αποθήκευσης [Tyagi et al., 2007].

2.2.3 Χημικές

Η ασφάλεια είναι μία από τις θεμελιώδεις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν ένα ΥΑΦ πρόκειται να εφαρμοστεί στην κατασκευή ενός

κτηρίου. Η μακροχρόνια χημική σταθερότητα του υλικού ΥΑΦ θα πρέπει να εκτιμηθεί πριν την εφαρμογή του στη δομή του κτηρίου. Η ελάχιστη εκφύλιση του υλικού και η ολοκληρωτική αντιστρεψιμότητά του είναι παράγοντες υψηλής προτεραιότητας καθώς το υλικό ΥΑΦ πρόκειται να εκτελέσει πολλούς κύκλους αλλαγής φάσης στη διάρκεια της ζωής του.

Επίσης το ΥΑΦ θα πρέπει να είναι συμβατό με τα υπόλοιπα κατασκευαστικά υλικά και να μην προκαλεί δομικές ζημιές. Δεν πρέπει να είναι τοξικό ή εύφλεκτο και να μην αποτελεί κίνδυνο για τους χρήστες του κτηρίου κατά τη διάρκεια της ζωής του.

2.2.4 Οικονομικές

Η διαθεσιμότητα των διαφόρων τύπων ΥΑΦ θα είναι ουσιαστικός παράγοντας που θα καθορίσει τη χρήση τους στο μέλλον στη σχεδίαση και κατασκευή κτηρίων. Το ίδιο σημαντικοί είναι παράγοντες όπως το κόστος των υλικών και η ευκολία εφαρμογής τους. Το κόστος των υλικών προς το παρόν για τα εμπορικά διαθέσιμα ΥΑΦ είναι αρκετά υψηλό (ενδεικτική τιμή 0.5-10 €/kg [Mehling and Cabeza, 2008]). Αυτό σημαίνει ότι η αποθήκευση $1\text{kWh}=3600\text{kJ}$ απαιτεί 20kg ΥΑΦ (με πυκνότητα αποθήκευσης 180kJ/kg) ή $20 \cdot 0.5 = 10\text{€}$. Αν υποθέσουμε ότι η συμβατική ενέργεια κοστίζει 0.05 €/kWh, η αποπληρωμή της επένδυσης απαιτεί $10/0.05 = 200$ κύκλους χρήσης. Συνεπώς η εποχική αποθήκευση θερμότητας είναι προς το παρόν ασύμφορη και για να είναι οικονομικά ανταγωνιστική η αποθήκευση με ΥΑΦ θα πρέπει η φόρτιση και αποφόρτισή τους να γίνεται στη διάρκεια του 24 ώρου. Η τιμή των ΥΑΦ ωστόσο δεν είναι αντιπροσωπευτική για το άμεσο μέλλον αφού θα επηρεαστεί από το εύρος εφαρμογής των υλικών και τη διάδοση της χρήσης τους. Σε κάθε περίπτωση πάντως η επίτευξη θερμικού ελέγχου των χώρων είναι κρίσιμη για την αιεφόρο ανάπτυξη στον κτηριακό τομέα και εφόσον η εφαρμογή ΥΑΦ μπορεί να συντελέσει αποτελεσματικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, το αρχικό κόστος εγκατάστασης μπορεί να εξισορροπηθεί από την εξοικονόμηση αυτή.

2.3 Ανάλυση και Ποιοτικός έλεγχος

Οι ιδιότητες που περιγράφηκαν παραπάνω είναι σημαντικές για την εφαρμογή των ΥΑΦ. Η μηχανική αντοχή των υλικών, η χημική τους σταθερότητα σε πολλούς θερμικούς κύκλους, η λανθάνουσα θερμότητα και άλλες κρίσιμες παράμετροι, μπορούν να εκτιμηθούν μόνο μετά τη διεξαγωγή πειραματικών ελέγχων.

Σε ότι αφορά τα θερμικά χαρακτηριστικά των ΥΑΦ, δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμησή τους, η διαφορική θερμική ανάλυση (Differential Thermal Analysis-DTA) και η διαφορική θερμιδομετρία (Differential Scanning Calorimetry-DSC). Οι μέθοδοι αυτές αφορούν τη μέτρηση της λανθάνουσας θερμότητας και της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης των ΥΑΦ. Ένα

υλικό αναφοράς Al_2O_3 , και ένα δείγμα του ΥΑΦ θερμαίνονται με σταθερό ρυθμό. Η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών των δύο υλικών που καταγράφεται είναι ανάλογη της ροής θερμότητας στο κάθε υλικό. Η καταγραφή των διαφορών αυτών μας δίνει την καμπύλη DSC από την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε τη λανθάνουσα θερμότητα από την περιοχή που περικλείεται κάτω από το μέγιστο σημείο της καμπύλης ενώ η θερμοκρασία τήξης εκτιμάται από την παράγωγο στο πιο απότομο τμήμα της καμπύλης μετά το μέγιστο [Sharma et al., 2007]. Πιο αναλυτικά η διαδικασία της διαφορικής θερμιδομετρίας περιγράφεται στους [Mehling and Cabeza, 2008].

Η ανάπτυξη εμπορικά διαθέσιμων ΥΑΦ προϋποθέτει τον επαρκή πειραματικό έλεγχο των ιδιοτήτων τους και την ανάπτυξη μιας επαρκούς μεθόδου ποιοτικού ελέγχου που θα πιστοποιεί τις μετρήσεις και θα εξασφαλίζει την ακρίβειά τους. Ένα τέτοιο πρότυπο έχει αναπτυχθεί πρόσφατα από τη ZAE Bayern και την FhG-ISE (Fraunhofer Institute of Solar Energy Systems) [<http://www.YAF-ral.de>]. Παρόμοιες προσπάθειες θέσπισης κάποιου προτύπου έχουν ξεκινήσει πρόσφατα σε Κίνα και Ινδία [Mehling and Cabeza, 2008].

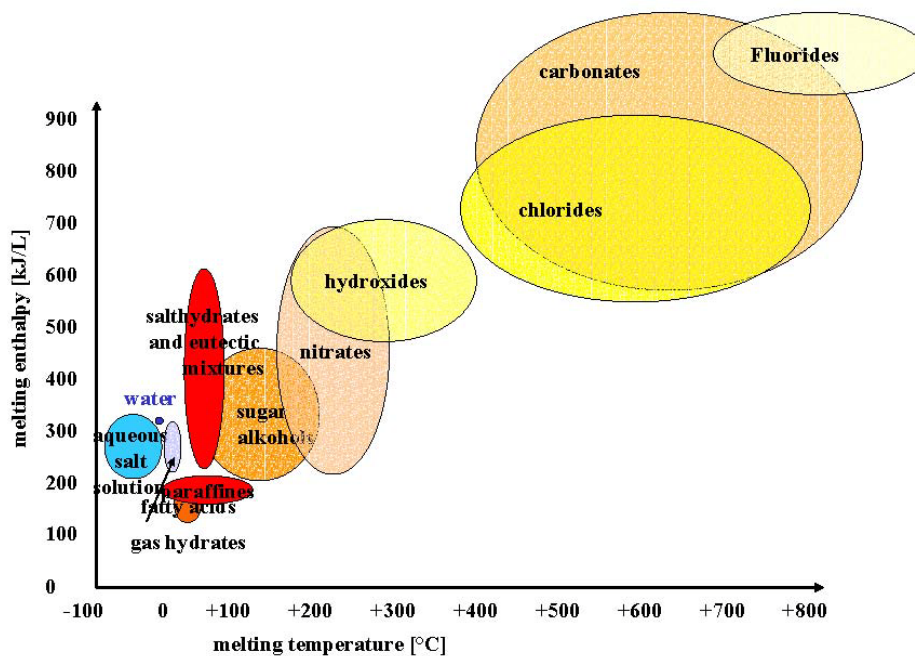
2.4 Κατηγοριοποίηση διαθέσιμων ΥΑΦ – μέθοδοι συσκευασίας

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων ΥΑΦ σχεδιασμένα για διάφορα θερμοκρασιακά εύρη (εικόνα 2.1). Είναι ωστόσο εξαιρετικά δύσκολη η εύρεση ενός που να συγκεντρώνει όλα τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω. Γι'αυτό η επιλογή του κατάλληλου ΥΑΦ για μια συγκεκριμένη επιλογή αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης ενώ σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η αναζήτηση μεθόδων βελτίωσης των χαρακτηριστικών διαφόρων ΥΑΦ (όπως η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας με την προσθήκη ρινισμάτων μετάλλων [Pincermin et al., 2008] ή η μίξη ουσιών που περιορίζουν το φαινόμενο της υπερ-ψύξης).

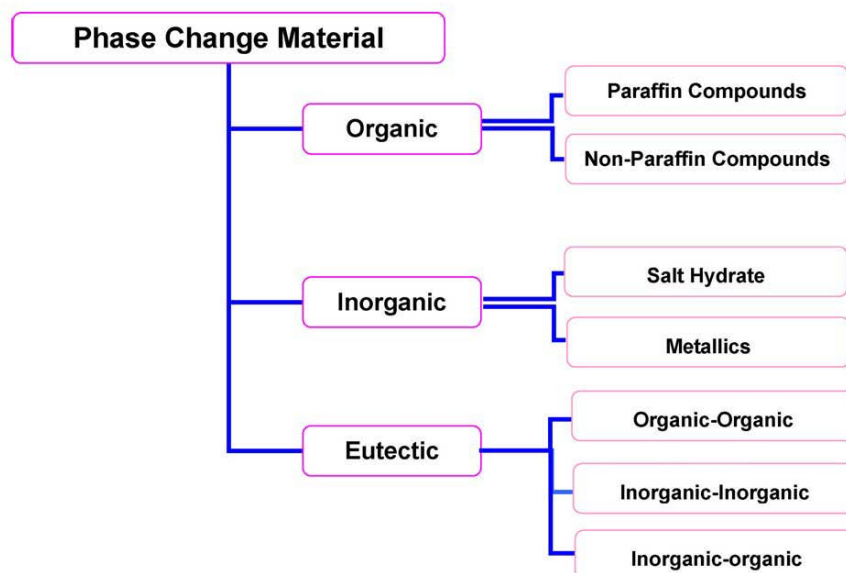
Συγκεντρωτικά δεδομένα σε υπάρχοντα ΥΑΦ και στις ιδιότητες που παρουσιάζουν μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [Zalba et al., 2003], [Streicher et al., 2005], [Kenisarin and Mahkamov, 2007], [Farid et al., 2004]. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι τα δεδομένα αυτά προέρχονται από διάφορες μελέτες χωρίς η ακρίβειά τους να έχει επιβεβαιωθεί ενώ διαπιστώθηκαν σε αρκετές περιπτώσεις αποκλίσεις από τα αναφερόμενα χαρακτηριστικά.

Τα ΥΑΦ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ανόργανα, οργανικά και μείγματα των ανωτέρω (εικόνα 2.2).

Τα πρώτα ΥΑΦ που μελετήθηκαν για εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης ήταν τα ανόργανα ένυδρα άλατα λόγω της υψηλής πυκνότητας ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν, της υψηλής αγωγιμότητας και του χαμηλού τους κόστους. Ωστόσο τα υλικά αυτά παρουσιάζουν σοβαρά μειονεκτήματα όπως ανομοιογένεια μεταβολής φάσης (διαχωρισμός) και υπερ-ψύξη (super-cooling).



Εικόνα 2.1. Κατηγορίες διαθέσιμων ΥΑΦ με τυπικές τιμές λανθάνουσας θερμότητας και εύρος θερμοκρασιών τήξης.



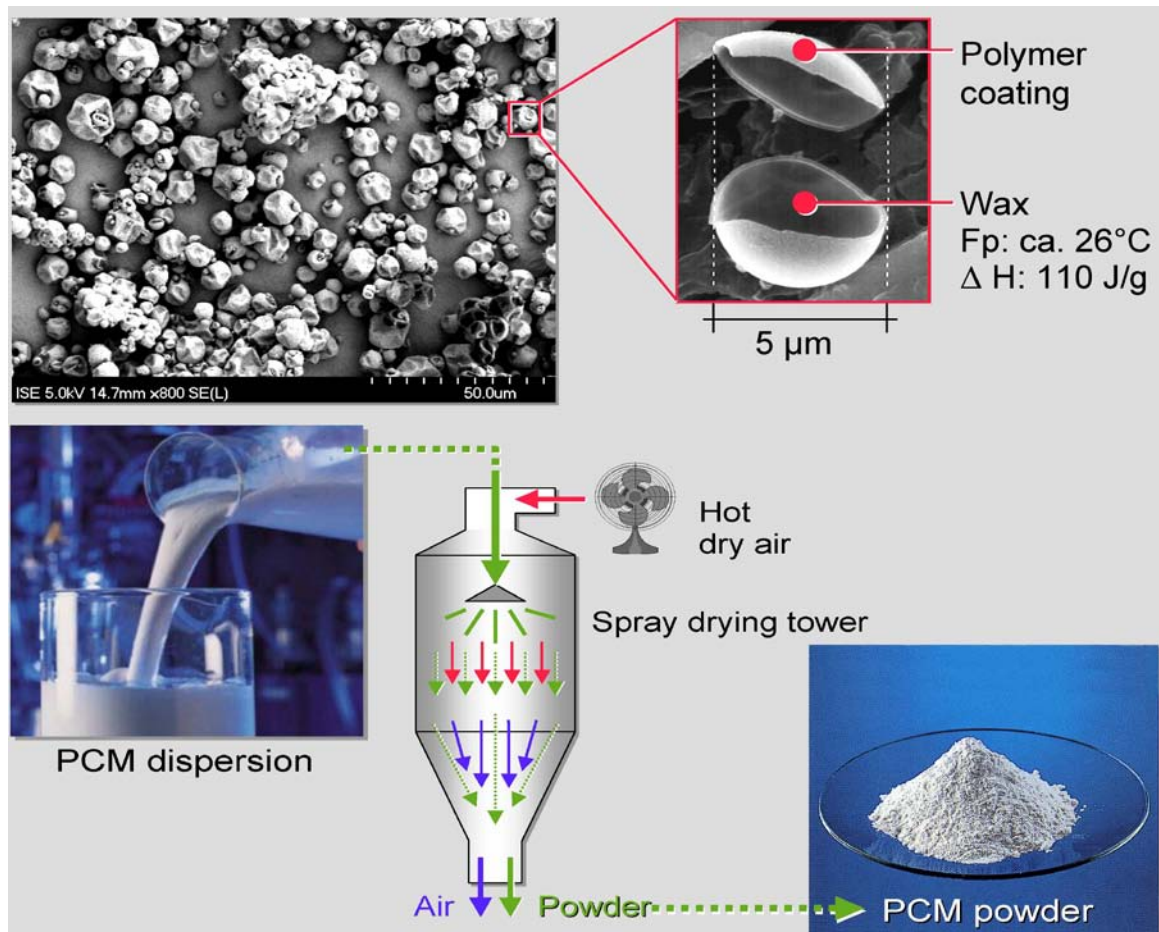
Εικόνα 2.2. Κατηγοριοποίηση των ΥΑΦ.

Τα μειονεκτήματα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα τη σταδιακή διάβρωση των υλικών, την τυχαία απόκλιση στη ζώνη αλλαγής φάσης και στη μείωση του κύκλου ζωής τους [Khudhair et al., 2004].

Τα παραπάνω προβλήματα είχαν σαν αποτέλεσμα οι έρευνες να επικεντρωθούν τα τελευταία χρόνια σε οργανικά ΥΑΦ (παραφίνες κ.α.) που παρουσιάζουν μικρότερη χωρητικότητα ανά μονάδα όγκου και λίγο υψηλότερη

τιμή, ωστόσο παρουσιάζουν αξιόπιστη θερμοδυναμική συμπεριφορά, καλή φυσική και χημική σταθερότητα, δυνατότητα ρύθμισης της ζώνης αλλαγής φάσης και ευκολία ενσωμάτωσης σε άλλα δομικά υλικά [Farid et al., 2004]. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν κι αυτά μειονεκτήματα όπως ευφλεκτότητα και κυρίως χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

Η σύγχρονη έρευνα στον τομέα των ΥΑΦ έχει επικεντρωθεί στην προσπάθεια βελτίωσης των μειονεκτημάτων τους. Έτσι σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζεται εγκλεισμός σε κάψουλες (encapsulation) των ΥΑΦ για τη βελτίωση της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας και την αποτροπή διαρροών αλλά και για την αποτροπή διαχωρισμού φάσης στα ένυδρα ανόργανα άλατα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες ενσωμάτωσης σε κάψουλες με βάση το μέγεθός τους. Αυτές είναι η ενσωμάτωση σε κάψουλες μεγαλύτερες του 1cm (macro-encapsulation) και η ενσωμάτωση σε κάψουλες μικρότερες του 1mm (micro-encapsulation). Η δεύτερη μπορεί προς το παρόν να εφαρμοστεί μόνο σε οργανικά ΥΑΦ οδηγεί ωστόσο σε εύχρηστα υλικά με σταθεροποιημένο σχήμα (π.χ. σκόνη ή υγρό) που μπορούν εύκολα να αναμιχθούν με δομικά υλικά (εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3. Ενσωμάτωση παραφίνης σε κάψουλες (micro-encapsulation)-Υλικό Micronal ΥΑΦ. [www.micronal.de]

Επίσης, η δημιουργία μειγμάτων ΥΑΦ και άλλων υλικών όπως για παράδειγμα του γραφίτη, έχει δοκιμαστεί με επιτυχία και έχει οδηγήσει σε εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα σε μορφή σκόνης ή και γυψοσανίδας (DuPont Energain, Rubitherm).

2.5 Εφαρμογές υλικών αλλαγής φάσης (Phase Change Materials) σε κτήρια

Η χρήση των ΥΑΦ στον κτηριακό τομέα υπήρξε μία από τις πρώτες εφαρμογές τους. Ήδη από τη δεκαετία του 1930 ο Telkes ερεύνησε τη χρήση των ΥΑΦ για αποθήκευση ηλιακής ενέργειας και τη θέρμανση χώρου, προχώρησε μάλιστα στην πειραματική διερεύνηση της εφαρμογής τους τη δεκαετία του 1970 με αρκετή επιτυχία, όπου ωστόσο αποκαλύφθηκαν αρκετά προβλήματα των ΥΑΦ όπως η υπέρ-ψύξη και η αστάθεια σε πολλούς κύκλους αλλαγής φάσης.

Η εφαρμογή τους μπορεί να γίνει είτε παθητικά, με την ενσωμάτωση δηλαδή του ΥΑΦ στη δομή του κτηρίου και την φόρτιση και αποφόρτισή του να γίνεται χωρίς τη βοήθεια μηχανολογικού εξοπλισμού, είτε ενεργά όταν η φόρτιση και αποφόρτιση απαιτεί τη χρήση μηχανολογικού εξοπλισμού [Zhu et al., 2009]. Σε κάθε περίπτωση, τα ΥΑΦ μπορούν να ενσωματωθούν στους τοίχους του κτηρίου, σε άλλα δομικά στοιχεία ή σε ξεχωριστές δεξαμενές ως τμήμα των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης.

Μια από τις κύριες εφαρμογές των ΥΑΦ είναι η προσθήκη τους στη δομή του κτηρίου για τον περιορισμό των μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών και την προσθήκη θερμικής μάζας κυρίως σε “ελαφρές κατασκευές”. Πολλοί ερευνητές έχουν παρουσιάσει αποτελέσματα για την επίτευξη τέτοιου θερμοκρασιακού ελέγχου τόσο μέσω προσομοιώσεων όσο και κάποιων πειραματικών κατασκευών. Ενδεικτικά αναφέρουμε τους παρακάτω:

Στο πανεπιστήμιο της Lleida κατασκευάστηκαν πειραματικοί οικίσκοι (εικόνα 2.4) από οπλισμένο σκυρόδεμα που περιείχε 5% υλικό ΥΑΦ (Micronal). Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η προσθήκη του ΥΑΦ στη δομή του κτηρίου μπορεί να μειώσει τη μέγιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό του και βελτιώνει τη θερμική του αδράνεια [Cabeza et al., 2007]. Ωστόσο προκειμένου να χρησιμοποιηθεί με βέλτιστο τρόπο το ΥΑΦ απαιτείται η προσθήκη ενός “trombe wall” (τοίχος μάζας θερμοσιφωνικής ροής) κατά τη διάρκεια του χειμώνα καθώς και προσεκτική πολιτική αερισμού. Η πολιτική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά τους μήνες του Ιουλίου και Αυγούστου.

Η ανάπτυξη ενός νέου τοίχου που περιέχει ΥΑΦ και Vacuum Isolation Panel (VIP) έγινε στο Επιστημονικό κέντρο Τεχνολογίας Δόμησης (CSTB) της Γαλλίας. Προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του TRNSYS η συμπεριφορά ενός μικρού οικίσκου όπου είχε προστεθεί ο νέος τοίχος. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώθηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις και έδειξαν σημαντική βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς του οικίσκου [Ahmad et al., 2006a&b].

Η αποτελεσματικότητα της προσθήκης γυψοσανίδας με ΥΑΦ για τη μείωση των θερμοκρασιακών διαφορών αποδείχθηκε πειραματικά [Athienitis et al., 1997], [Kunik et al., 2007]. Η προσθήκη υλικού ΥΑΦ στη δομή του κτηρίου δεν μπορεί ωστόσο να είναι απεριόριστη. Προκειμένου να επιτύχουμε αποδεκτή θερμική απόκριση θα πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι το ΥΑΦ θα μπορεί να ολοκληρώσει ένα θερμικό κύκλο στη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Αποδείχθηκε [Neerer 2000] ότι το μέγιστο όριο θερμικής χωρητικότητας κυμαίνεται μεταξύ 300-400 kJ/m². Το όριο αυτό εξαρτάται άμεσα από την θερμική αγωγιμότητα του ΥΑΦ και ισχύει για φυσική ροή αέρα στο εσωτερικό του κτηρίου.

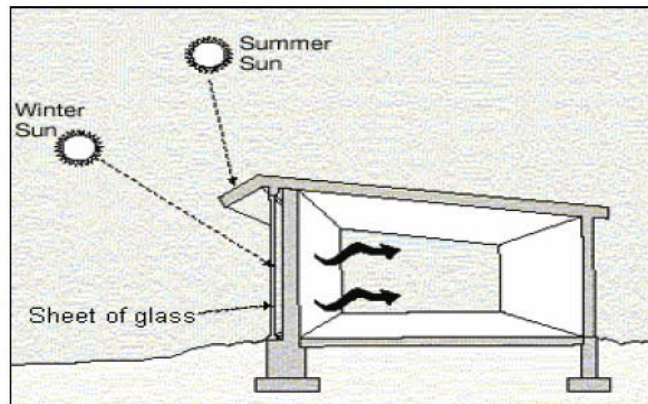


Εικόνα 2.4. Οικίσκοι στο πανεπιστήμιο της Lleida

Προκειμένου να βελτιωθεί η συμβολή του ΥΑΦ στη θέρμανση του χώρου εξετάστηκε η προσθήκη του ως τοίχος Trombe με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η αρχή λειτουργία ενός τοίχου μάζας φαίνεται στην εικόνα 2.5. Ένα κομμάτι γυαλιού τοποθετείται στην εξωτερική επιφάνεια ενός τοίχου με μεγάλη θερμική μάζα (Μπετόν, τούβλο κτλ) με ένα μικρό διάστημα αέρα να διαχωρίζει τα δύο υλικά. Η επιφάνεια του τοίχου βάφεται με σκούρο χρώμα (μαύρο) προκειμένου να απορροφά ηλιακή ακτινοβολία η οποία αποθηκεύεται και διοχετεύεται μέσα από τον τοίχο στη διάρκεια της μέρας. Το βράδυ, καθώς η θερμοκρασία του κτηρίου πέφτει θερμότητα εκπέμπεται από τον τοίχο στο εσωτερικό του κτηρίου για αρκετές ώρες. Μελέτες έχουν δείξει ότι η προσθήκη ΥΑΦ στις κατασκευές αυτές μπορεί να μειώσει δραστικά την ποσότητα υλικού που απαιτείται και συνεπώς και το κόστος κάνοντας δυνατή τη χρήση της τεχνικής αυτής ακόμα και σε ανακαινίσεις κτηρίων. Για παράδειγμα, 8.1cm τοίχου με ΥΑΦ αποδείχθηκε ισοδύναμος με 40 cm συμβατικού τοίχου [Sharma et al., 2009].

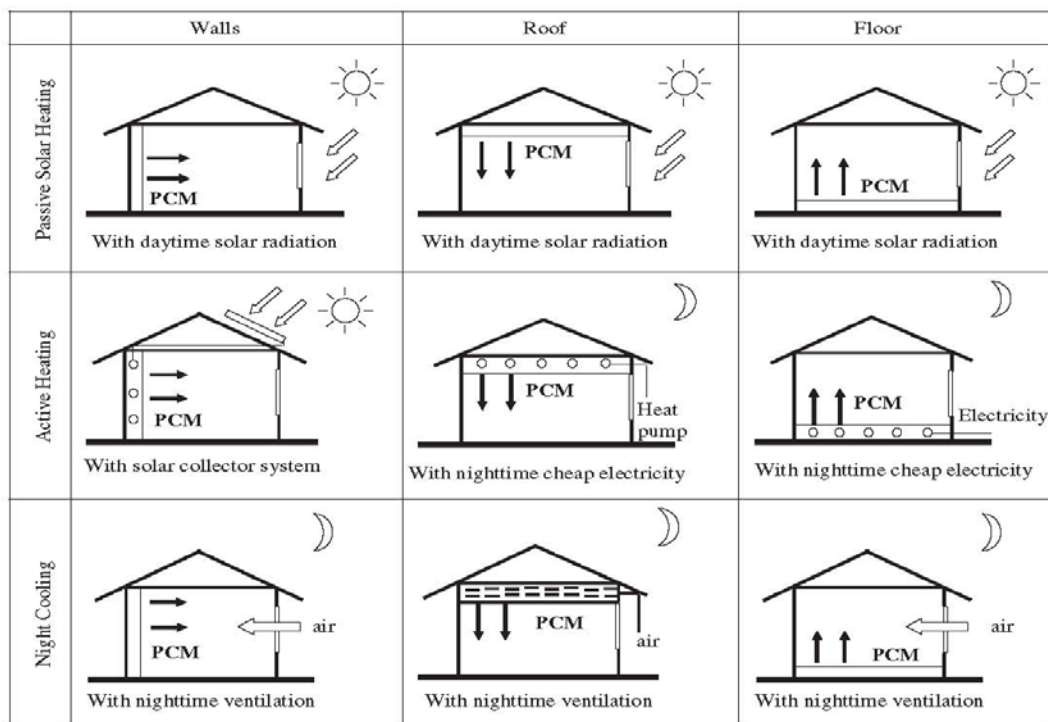
Η χρήση του ΥΑΦ για ψύξη του χώρου μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση νυχτερινού αερισμού. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, που είναι γνωστή ως ελεύθερη ψύξη (free-cooling), ψυχρός αέρας συλλέγεται και αποθηκεύεται από το περιβάλλον κατά τη διάρκεια της νύχτας και απελευθερώνεται στο εσωτερικό του

κτηρίου κατά τη διάρκεια των θερμών ωρών της ημέρας [Zalba et al., 2003]. Η προσθήκη του ΥΑΦ μπορεί να γίνει είτε στη δομή του κτηρίου είτε σε αεραγωγούς όπου υπάρχει ροή αέρα με μηχανικό τρόπο (ανεμιστήρες) [Arkar et al., 2007]. Η τεχνική αυτή είναι αποτελεσματική σε ήπια κλίματα (όταν η θερμοκρασία πέφτει κάτω των 18°C τη νύχτα) οδηγώντας σε μείωση της μέγιστης



Εικόνα 2.5. Σχηματική αναπαράσταση τοίχου μάζας (Trombe Wall)

εγκατεστημένης ισχύος έως και 28% [Stetiu and Feustel, 1998]. Έχει αποδειχθεί όμως αναποτελεσματική σε ιδιαίτερα θερμά κλίματα λόγω του γεγονότος ότι στα κλίματα αυτά η θερμοκρασία δεν πέφτει σε επίπεδα που να επιτρέπουν την αποφόρτιση του ΥΑΦ και άλλη μέθοδος θα πρέπει να εφαρμοστεί όπως η παροχή κρύου νερού μέσα από το ΥΑΦ [Pasupathy et al., 2008]. Στην εικόνα 2.6 φαίνονται οι τεχνικές που περιγράψαμε παραπάνω.

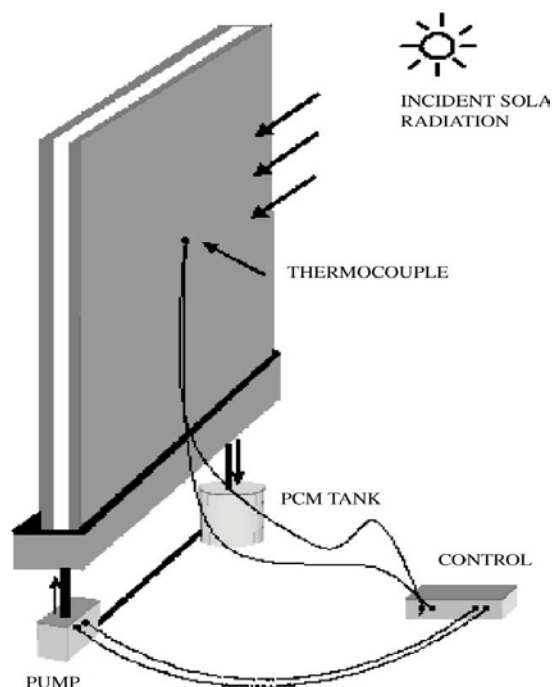


Εικόνα 2.6. Χρήσεις ΥΑΦ στη δομή κτηρίων.

Παρόμοια τεχνική είναι και η ενσωμάτωση του ΥΑΦ σε σκίαστρα (εικόνα 2.7α). Κατά τη διάρκεια της μέρας τα σκίαστρα είναι εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα το ΥΑΦ να υγροποιείται χωρίς ωστόσο να αυξάνεται υπερβολικά η θερμοκρασία του σκίαστρου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η αποθηκευμένη θερμότητα ακτινοβολείται στο εσωτερικό με πολύ αργό ρυθμό. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μείωση της θερμοκρασίας του δωματίου κατά 2°C [Mehling, 2004]. Επίσης η ενσωμάτωση ΥΑΦ στο εσωτερικό παραθύρων (εικόνα 2.7β) μπορεί να αποτρέψει αποτελεσματικά τη μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας των κτηρίων [Ismail et al., 2001].



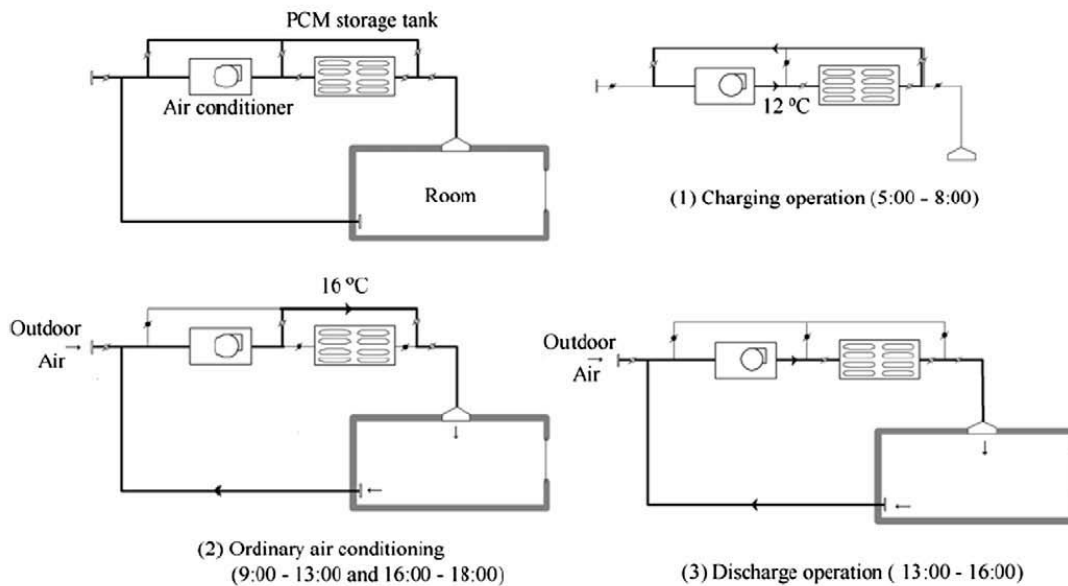
(α)



(β)

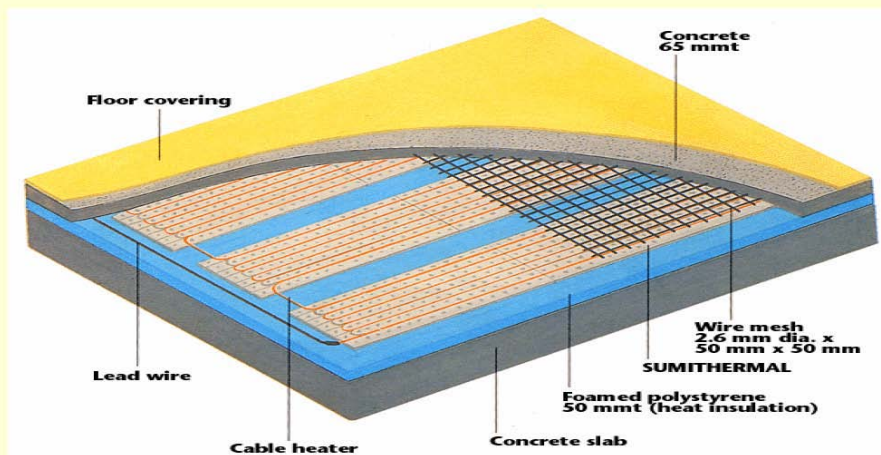
Εικόνα 2.7. Σκίαστρο (α) και παράθυρο (β) με ΥΑΦ

Μια άλλη δυνατότητα χρήσης των ΥΑΦ είναι η μείωση κατανάλωσης ρεύματος αιχμής, γνωστή ως “peak load shifting”. Στην περίπτωση αυτή εκμεταλλευόμαστε τη διαφορά που υπάρχει στην τιμή διάθεσης του ρεύματος μεταξύ των ωρών αιχμής και των νυχτερινών ωρών και χρησιμοποιούμε φθηνή ενέργεια ή δωρεάν ενέργεια από το περιβάλλον (όποτε είναι διαθέσιμη) για να αποθηκεύσουμε θερμότητα στο ΥΑΦ που χρησιμοποιούμε μετά κατά τις ώρες αιχμής. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά τέτοια συστήματα όπως αυτό των [Yamaha and Misaki, 2006] (εικόνα 2.8) που αποτελείται από μια συνηθισμένη μονάδα κλιματισμού και μια δεξαμενή ΥΑΦ. Το ΥΑΦ αποθηκεύει ψύξη στις ώρες 05:00 με 08:00 και τη χρησιμοποιεί στις ώρες αιχμής 13:00 έως 16:00. Αντίστοιχη είναι η ιδέα του ηλεκτρικού πατώματος [Lin et al., 2004] (εικόνα 2.9). Η οικονομική βιωσιμότητα των τεχνικών αυτών παρουσιάστηκε στην τελική αναφορά του Annex 17 [Hauer, Mehling, Schossig, Yamaha, Gabeza, Martin et al., 2005].



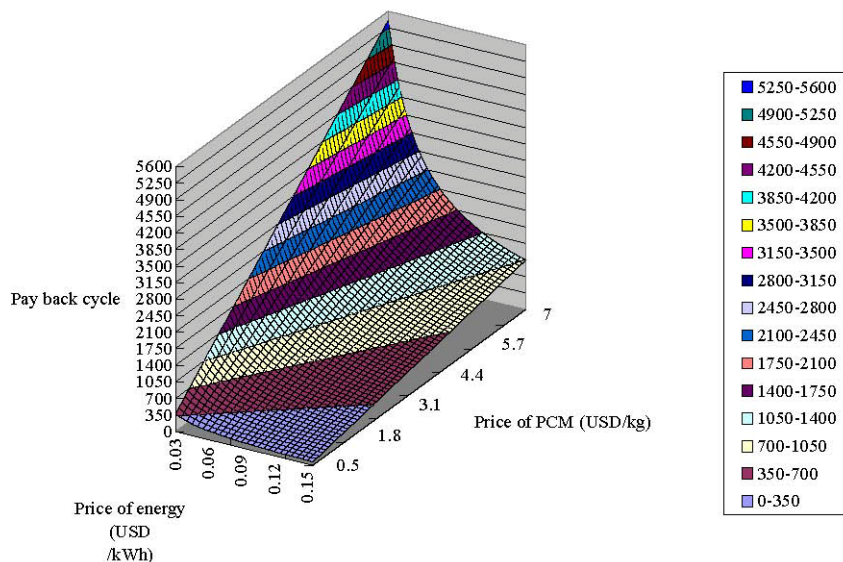
Εικόνα 2.8. Σύστημα κλιματισμού με ΥΑΦ (Yamaha&Misaki)

Electrical floor heating system with PCM

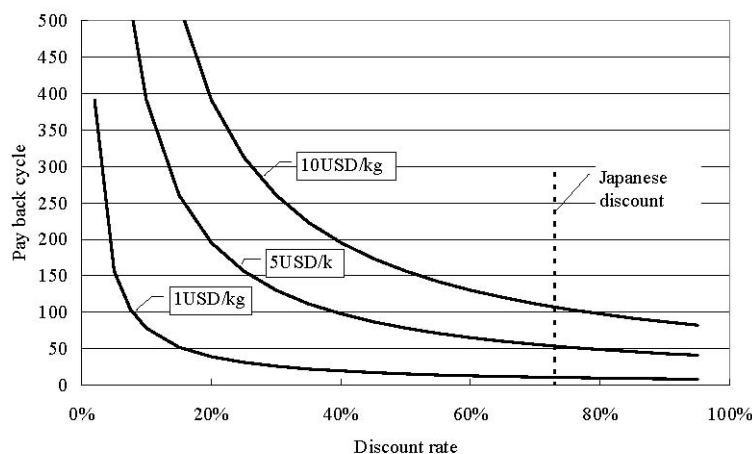


Εικόνα 2.9. Ηλεκτρικά θερμαινόμενο πάτωμα με ΥΑΦ

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.10 ο χρόνος αποπληρωμής του συστήματος (σε κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης) εξαρτάται από την τιμή του ΥΑΦ και τις χρεώσεις της ενέργειας αλλά και από το ποσοστό επιδότησης της ενέργειας που εξοικονομείται (εικόνα 2.11).



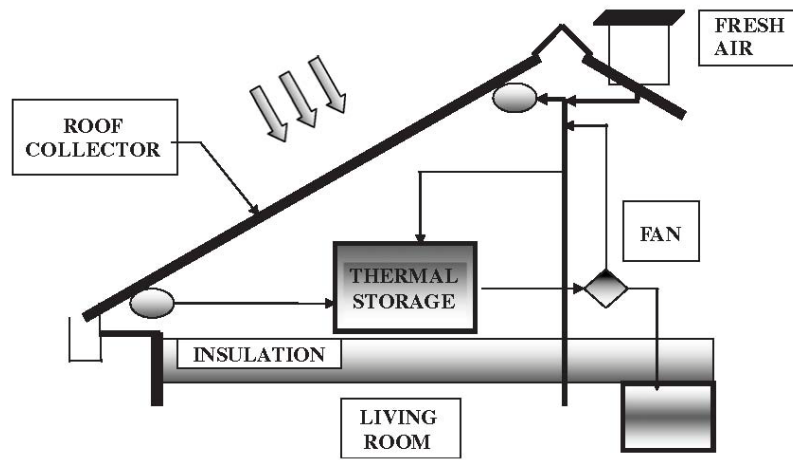
Εικόνα 2.10. Διάρκεια αποπληρωμής επένδυσης ως συνάρτηση της τιμής του ΥΑΦ και των χρεώσεων ενέργειας. [Annex 17 Final Report, Haeur, Mehling, Schossing, Yamaha, Cabeza, Martin et al., 2005].



Εικόνα 2.11. Διάρκεια αποπληρωμής επένδυσης ως συνάρτηση της επιδότησης της εξοικονομούμενης ενέργειας. [Annex 17 Final Report, Haeur, Mehling, Schossing, Yamaha, Cabeza, Martin et al., 2005]

Τέλος, τα ΥΑΦ μπορούν να ενσωματωθούν σε άλλα συστήματα όπως ηλιακές αντλίες θερμότητας, θερμαινόμενα πατώματα κτλ σαν ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης για να βελτιωθεί η απόδοσή τους. Ένα τέτοιο σύστημα είναι το σύστημα ηλιακής θέρμανσης που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο πανεπιστήμιο της Νότιας Αυστραλίας [Saman et al., 2005]. Το σύστημα

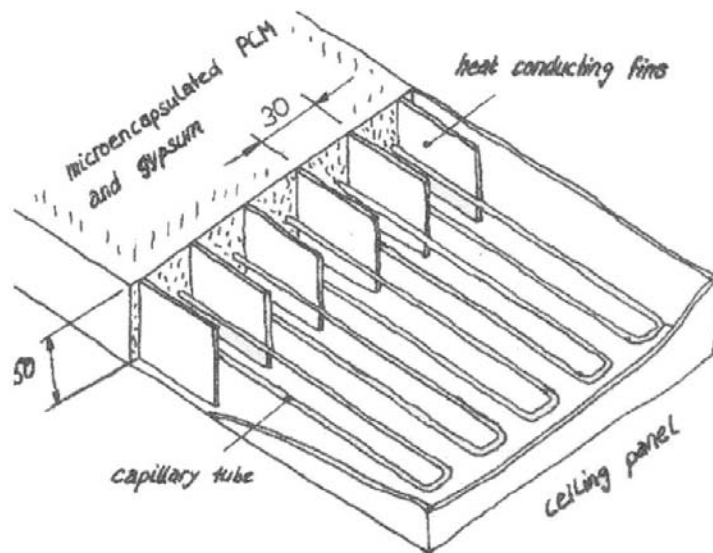
χρησιμοποιεί μια υπάρχουσα μεταλλική οροφή για τη θέρμανση αέρα. Ο αέρας αυτός διοχετεύεται στο εσωτερικό του κτηρίου ή σε μια δεξαμενή ΥΑΦ για την αποθήκευση της θερμότητας. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τις νυχτερινές ώρες (ή όταν απαιτηθεί) (εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12. Ηλιακό σύστημα θέρμανσης με ΥΑΦ ενσωματωμένο σε οροφή

Προκειμένου να επιτευχθεί θερμική χωρητικότητα ίση με τα εσωτερικά φορτία στο εσωτερικό κτηρίων προτάθηκε η λύση της κατασκευής μίας θερμικά ενεργής ψευδο-οροφής [Konschenz and Lehnman, 2004]. Το ΥΑΦ που περιέχει η ψευδο-οροφή λιώνει κατά τη διάρκεια της μέρας όντας εκτεθειμένο στα θερμικά φορτία και παγώνει τη νύχτα με τη βοήθεια ενσωματωμένων αγωγών νερού (εικόνα 2.13). Προσομοίωση μέσω του TRNSYS και εργαστηριακές μετρήσεις έδειξαν ότι ένα στρώμα πάχους 5cm που περιέχει 25% ΥΑΦ και γύψο μπορεί να εξισορροπήσει θερμικά φορτία ίσα με $320\text{Wh}/(\text{m}^2\text{day})$ που περιλαμβάνει εσωτερικά φορτία και ηλιακά κέρδη.

Παρά τον μεγάλο αριθμό μελετών και δημοσιεύσεων που φανερώνουν την δυνατότητα των ΥΑΦ να βοηθήσουν στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια και στην μείωση της μέγιστης εγκατεστημένης ισχύος των συστημάτων θέρμανσης-ψύξης, η μελέτη της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων με την χρήση των ΥΑΦ είναι ακόμα ανεπαρκής [Zhu et al., 2009]. Η βέλτιστη επιλογή και ο τρόπος εφαρμογής των ΥΑΦ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το τοπικό κλίμα και προϋποθέτουν την ύπαρξη αξιόπιστων εργαλείων προσομοίωσης της δυναμικής απόκρισης ολόκληρων κτηρίων με την προσθήκη των υλικών αυτών. Επίσης οι στρατηγικές ελέγχου των συστημάτων θέρμανσης-ψύξης που εφαρμόζονται σε κτήρια με ΥΑΦ ή που περιλαμβάνουν δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας θα πρέπει να μελετηθούν. Τέλος, η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας δεξαμενών ή δομικών υλικών που περιέχουν ΥΑΦ είναι ένας παράγοντας κρίσιμος προκειμένου τα υλικά αυτά να εφαρμοστούν στην πράξη.



Εικόνα 2.13. Θερμικά ενεργή ψευδο-οροφή με ΥΑΦ για ψύξη

2.6 Επίλυση προβλήματος μεταφοράς θερμότητας σε ΥΑΦ

Προκειμένου να υπολογίσουμε την όποια αποθήκευση θερμότητας από το ΥΑΦ θα πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας μέσα στο ΥΑΦ. Η μεταφορά θερμότητας αφορά το λεγόμενο “πρόβλημα του Stefan” (ή πρόβλημα κινητού ορίου-moving boundary problem), τον υπολογισμό δηλαδή του τρόπου μετάδοσης του μετώπου διεπαφής στερεού-υγρού μέσα στο υλικό ΥΑΦ. Το πρόβλημα αυτό είναι δύσκολο να επιλυθεί λόγω της μη-γραμμικής κίνησης του μετώπου διεπαφής και των διαφορετικών θερμοφυσικών ιδιοτήτων του υλικού ΥΑΦ στις δύο φάσεις. Υπάρχουν πολλοί τρόποι επίλυσης του προβλήματος του Stefan που χωρίζονται σε αναλυτικές και αριθμητικές.

Οι αναλυτικές μέθοδοι εισάγουν σημαντικούς περιορισμούς στη γεωμετρία και τα θερμικά φαινόμενα και αρκετές φορές οδηγούν σε αποτελέσματα μικρής ακρίβειας. Επιπρόσθετα, παρουσιάζουν μεγάλη πολυπλοκότητα όταν η μετάδοση θερμότητας υπολογίζεται σε πάνω από μία διαστάσεις και δεν λαμβάνουν υπόψη την αποθήκευση ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας. Παρόλα αυτά μπορούν να δώσουν μια εκτίμηση της συμβολής διαφόρων παραμέτρων στη μεταφορά θερμότητας (όπως η θερμική αγωγιμότητα και η γεωμετρία του εγκλεισμού σε μικρο-κάψουλες).

Οι αριθμητικές μέθοδοι όπως η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών ή η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ πιο ευέλικτες αφού επιτρέπουν τον συνυπολογισμό διαφόρων φαινομένων όπως η αγωγή (conduction), η μεταφορά (convection) ή η ακτινοβολία (radiation) που συμμετέχουν στο φαινόμενο μεταφοράς θερμότητας. Αρκεί τότε να περιγράψουμε το πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας στο ΥΑΦ ως ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που στο διακριτό χρόνο γίνεται σύστημα εξισώσεων διαφορών και να προγραμματίσουμε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την επίλυσή του. Στην παρούσα εργασία

χρησιμοποιούμε ένα μοντέλο που βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και για το λόγο αυτό θα το περιγράψουμε σύντομα με ένα παράδειγμα που αφορά μετάδοση θερμότητας σε μία διάσταση (σε μία ράβδο):

Αρχικά από την αρχή διατήρησης της ενέργειας έχουμε:

$$\rho \frac{de}{dt} + \frac{\partial}{\partial x} \left((-\lambda(\vartheta)) \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) = 0 \quad (2-1)$$

Στην εξίσωση (2-1) η πυκνότητα του υλικού ρ θεωρείται σταθερή ενώ η αγωγιμότητα λ είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας ϑ . Αν στην εξίσωση αυτή αναπτύξουμε την μερική παράγωγο και εφαρμόσουμε τον νόμο των γινομένων τόσο για την παράγωγο $\frac{de}{dt}$ όσο και για την $\frac{\partial \lambda}{\partial x}$, έχουμε:

$$\rho \frac{de}{d\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} - \lambda(\vartheta) \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \frac{d\lambda}{d\vartheta} \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)^2 = 0 \quad (2-2)$$

Η παράγωγος της ενθαλπίας ως προς τη θερμοκρασία όμως είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα $\frac{de}{d\vartheta} = c(\vartheta)$, οπότε μπορούμε να ορίσουμε τη θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity) ως:

$$a(\vartheta) = \frac{1}{\rho} \frac{\lambda(\vartheta)}{c(\vartheta)}$$

Η εξίσωση (2-2) μπορεί λοιπόν να γραφεί:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a(\vartheta) \left[\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{1}{\lambda(\vartheta)} \frac{d\lambda}{d\vartheta} \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2-3)$$

Αν υποθέσουμε σταθερή αγωγιμότητα λ , η (2-3) μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a(\vartheta) \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \right) \quad (2-4)$$

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, ο χώρος καταμερίζεται σε πολλά μικρά τμήματα για τα οποία χρησιμοποιούμε τον δείκτη i . Για τις διάφορες χρονικές στιγμές χρησιμοποιούμε τον δείκτη n . Οι μερικές παράγωγοι τις σχέσης (2-4) μπορούν να προσεγγιστούν από αλγεβρικές εξισώσεις στα διακριτά σημεία στο χώρο και τον χρόνο.

Έτσι η μερική παράγωγος $\frac{\partial \vartheta}{\partial t}$ μπορεί να προσεγγιστεί από:

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \right)_i^n = \frac{\vartheta_i^{n+1} - \vartheta_i^n}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad (2-5)$$

Ενώ η δεύτερη παράγωγος $\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}$ από:

$$\left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \right)_i^{n+\theta} = \frac{\vartheta_{i+1}^{n+\theta} - 2\vartheta_i^{n+\theta} + \vartheta_{i-1}^{n+\theta}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad (2-6)$$

Αν αντικατασταθούν οι εξισώσεις (2-5), (2-6) στην (2-4) φτάνουμε τελικά στη γενική μορφή της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών:

$$g_i^{n+1} = g_i^n + M_i^n \left[(1-\theta)(g_{i+1}^n - 2g_i^n + g_{i-1}^n) + \theta(g_{i+1}^{n+1} - 2g_i^{n+1} + g_{i-1}^{n+1}) \right] \quad (2-7)$$

Όπου ο τελεστής M_i^n ορίζεται ως:

$$M_i^n = a(g_i^n) \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

και ο συντελεστής θ , ορίζει τον τρόπο με τον οποίο η θερμοκρασία μεταβάλλεται μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών βημάτων. Έτσι αν τεθεί $\theta=0$ φτάνουμε στην άμεση (explicit) υπολογιστική μέθοδο και για $\theta=1$ στην πλήρως έμμεση (fully-implicit) μέθοδο. Τέλος για $\theta=0.5$ προκύπτει η μέθοδος Crank-Nicolson την οποία και χρησιμοποιεί το μοντέλο μας. Γενικά θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι έμμεσες μέθοδοι έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά ευστάθειας ενώ η άμεση μέθοδος απαιτεί πολύ προσεκτική επιλογή του υπολογιστικού βήματος.

3. Μεθοδολογία έρευνας

Συνθήκες θερμικής άνεσης στο εσωτερικό κτηρίων μπορεί να επιτευχθούν είτε εφαρμόζοντας στρατηγικές παθητικής ψύξης και θέρμανσης, είτε με τη χρήση ειδικού εξοπλισμού (Air-conditioning, ανεμιστήρες, κεντρική θέρμανση, ενδοδαπέδια θέρμανση κτλ). Η επίτευξη και διατήρηση των συνθηκών αυτών απαιτεί τη χρήση ενέργειας η οποία συνήθως προέρχεται είτε από καύση πετρελαίου (καυστήρες) είτε από τη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και είναι μια διαδικασία που απαιτείται σε καθημερινή βάση και επιβαρύνει σημαντικά τόσο τις ενεργειακές ανάγκες της χώρας (κυρίως κατά τη διάρκεια του θερμού Μεσογειακού καλοκαιριού) όσο και το περιβάλλον μέσω των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου από τους καυστήρες.

Από την προεπισκόπηση της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι οι περισσότεροι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην χρήση των ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία κτηρίων και στη μελέτη της επίδρασης τους στην επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης με παθητικές στρατηγικές ψύξης και θέρμανσης σε ήπια κλίματα. Σε ότι αφορά τη θέρμανση, το ΥΑΦ χρησιμοποιείται ως «δεξαμενή» αποθήκευσης θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία κατά τις μεσημεριανές κυρίως ώρες, εκπέμποντας την ενέργεια αυτή κατά τη διάρκεια των απογευματινών και βραδινών ωρών ώστε να επιτυγχάνεται η διατήρηση του εσωτερικού του κτηρίου σε συνθήκες θερμικής άνεσης. Σε ότι αφορά την ψύξη, το ΥΑΦ απορροφά τη θερμότητα από το εσωτερικό του κτηρίου, αποθηκεύοντάς την και ελευθερώνοντάς την στο περιβάλλον (μέσω αερισμού) τις νυχτερινές ώρες οπότε η θερμοκρασία είναι αισθητά χαμηλότερη. Αυτή η μέθοδος «κλιματισμού» μειώνει την πίεση που ασκείται στο δίκτυο παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνει αισθητά την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και συμβάλει στην εξοικονόμηση χρημάτων από τους χρήστες.

Παρά το γεγονός ότι οι στρατηγικές αυτές αναμένεται να παρουσιάζουν εξαιρετική απόδοση στη χώρα μας αλλά και σε άλλες θερμές μεσογειακές χώρες, σε ότι αφορά τη θέρμανση, δεν λειτουργούν αποτελεσματικά σε ότι αφορά την ψύξη. Υψηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες προκύπτουν από τα μεγαλύτερα ηλιακά κέρδη αλλά και από τη φυσική ροή του θερμού αέρα κατά τη διάρκεια της μέρας και δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά από τη διαδικασία νυχτερινού αερισμού που περιγράψαμε παραπάνω. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας δεν μειώνεται επαρκώς ώστε να επιτρέψει στη διαδικασία εξαναγκασμένης μεταφοράς θερμότητας να λειτουργήσει βέλτιστα μειώνοντας την εσωτερική θερμοκρασία και εκτονώνοντας το ΥΑΦ. Οι υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος που είναι πολύ συχνές στις χώρες αυτές, (και πιθανόν αυξάνονται ακόμα περισσότερο λόγω της κλιματικής αλλαγής από την ανθρώπινη παρέμβαση), ωθούν όλο και περισσότερους ανθρώπους στην εγκατάσταση μονάδων ψύξης (Air-conditions) για την παροχή της απαιτούμενης ψύξης. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια τη δραματική αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις

ώρες αιχμής και την αύξηση της πίεσης που ασκείται στο δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας οδηγώντας σε συχνά “black-out”.

Επιπρόσθετα οι στρατηγικές παθητικής ψύξης και θέρμανσης προϋποθέτουν σε ένα μεγάλο βαθμό το σωστό προσανατολισμό του κτηρίου καθώς και τη χρήση ειδικών κατασκευών (μεγάλα ανοίγματα, τοίχους Trombe κτλ), τα οποία παρά το γεγονός ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε νέα κτήρια, είναι αδύνατο να εφαρμοστούν σε παλαιότερα κτήρια. Τα κτήρια αυτά ωστόσο αποτελούν το 60-70% του συνόλου των κτηρίων της χώρας μας και είναι από τα πλέον ενεργοβόρα αφού πολλά από αυτά δεν διαθέτουν ούτε καν επαρκή μόνωση. Η αντικατάσταση των κτηρίων αυτών είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί ακόμα και σε βάθος χρόνου και συνεπώς η πίεση που ασκούν στον ενεργειακό σχεδιασμό και στο περιβάλλον δεν είναι εύκολο να αντιμετωπιστεί.

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο να διερευνήσει τη χρήση των ΥΑΦ, ενσωματωμένα στα δομικά στοιχεία (τοίχοι) κτηρίων, για την βελτίωση της ενεργητικής τους απόδοσης, δηλαδή την μείωση των απαιτούμενων φορτίων ψύξης και θέρμανσης. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί κάποιο λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης κτηρίων. Κατά τις προσομοιώσεις τα στοιχεία ΥΑΦ θα εφαρμοστούν τόσο σε νέα κτήρια με επαρκή θερμική μάζα και μόνωση, όσο και σε παλαιότερα κτήρια τα οποία δεν διαθέτουν μόνωση. Επίσης θα διερευνηθούν κτήρια με πολύ μικρή θερμική μάζα (Prefabricated). Κατά την προσομοίωση θα χρησιμοποιηθεί ενεργός κλιματισμός (θέρμανση-ψύξη) και οι κλιματικές συνθήκες της χώρας μας (Αθήνα). Επιπρόσθετα τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν ως ΥΑΦ θα είναι υλικά που είναι εμπορικά διαθέσιμα.

3.1 Επιλογή μοντέλου και περιβάλλοντος προσομοίωσης

Υπάρχει μια πληθώρα προγραμμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων με το καθένα να παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Μια συγκεντρωτική παρουσίαση των εργαλείων αυτών με τα κύρια χαρακτηριστικά τους μπορεί να βρεθεί στη αντίστοιχη ιστοσελίδα (www1.eere.energy.gov/buildings), του υπουργείου ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (U.S Department of Energy Building Technologies Program).

Λίγα προγράμματα παρέχουν τη δυνατότητα προσομοίωσης υλικών ΥΑΦ. Ένα από αυτά είναι το SUNREL το οποίο χρησιμοποιεί δυναμική μοντελοποίηση των υλικών κατασκευής του κτηρίου παρέχοντας έτσι πολύ καλή ακρίβεια σε υλικά όπως τα ΥΑΦ των οποίων τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται με το χρόνο. Παρόλα αυτά δεν παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης εξοπλισμού θέρμανσης-ψύξης (HVAC) και συνεπώς δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη μελέτη μας. Η χρήση του προγράμματος ESP-r για την προσομοίωση υλικών ΥΑΦ έχει γίνει στη βιβλιογραφία ([Heim and Clarke, 2004], [Heim, 2005], [Markopoulos, 2008]) μέσω της συνάρτησης «ειδικών υλικών» (special Materials function) που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση και άλλων ενεργών στοιχείων (ενδοδαπέδια θέρμανση). Παρόλα αυτά το συγκεκριμένο μοντέλο

μπορεί να εφαρμοστεί σε μία μόνο επιφάνεια ανά ζώνη γεγονός που αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα.

Το πρόγραμμα TRNSYS έχει και αυτό χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της ενεργητικής απόκρισης κτηρίων με υλικά ΥΑΦ. Τα υλικά ΥΑΦ έχουν προσομοιωθεί μέσω της λειτουργίας «ενεργών υλικών» [Ibanez et al., 2005] είτε μέσω αριθμητικών μοντέλων που προσομοιώνουν την μεταφορά θερμότητας μέσα από το ΥΑΦ και λειτουργούν μέσω σύζευξης με το μοντέλο πολυζωνικού κτηρίου Type 56. Στη βιβλιογραφία βρέθηκαν δύο τέτοια μοντέλα:

Το πρώτο αναπτύχθηκε από το ινστιτούτο θερμικής μηχανικής του πανεπιστημίου του Gratz και αναφέρεται ως “Type 241” [Schranzhofer et al., 2006]. Πρόκειται για ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Fortran με τη χρήση της μεθόδου ενθαλπίας (“enthalpy method”), το οποίο όμως δεν έχει επαληθευτεί (validated) με πειραματικά δεδομένα.

Το δεύτερο μοντέλο, που αναφέρεται ως “Type 204”, αναπτύχθηκε αρχικά από τους Jokisalo και Lamperg [Jokisalo and Lamperg, 2000] στο πανεπιστήμιο τεχνολογίας του Ελσίνκι. Το μοντέλο προσπαθεί να προσομοιώσει την πραγματική διαδικασία ροής θερμότητας μέσα στο υλικό ΥΑΦ. Οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας επιλύονται σε τρεις διαστάσεις για τις διάφορες καταστάσεις του ΥΑΦ ενώ η αλλαγή φάσης προσομοιώνεται με την μέθοδο «ενεργούς χωρητικότητας» (“effective heat Capacity method”). Το μοντέλο αυτό έχει τροποποιηθεί ώστε να λειτουργεί στο περιβάλλον TRNSYS 16.1 από τον M. Ahmad κ.α. και έχει επαληθευτεί με πειραματικά δεδομένα [Ahmad M., 2006a]. Αυτό ήταν και το μοντέλο που επιλέχθηκε τελικά για την παρούσα εργασία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση υλικών ΥΑΦ έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα στα προγράμματα BSim [Jorgen R. et al., 2009] και EnergyPlus [Pedersen, 2007].

3.2 Αναλυτική περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω προκειμένου να εξετάσουμε τα πλεονεκτήματα ενσωμάτωσης υλικών μεταβαλλόμενης φάσης (ΥΑΦ) σε δομικά στοιχεία κτηρίων, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον προσομοίωσης TRNSYS.

Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένα μοντέλο κτηρίου με τη χρήση του πολυζωνικού κτηρίου Type 56. Αυτό αποτελείται από δύο ζώνες με πανομοιότυπα χαρακτηριστικά όσον αφορά τη δομή, τον προσανατολισμό και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Η βασική ιδέα ήταν η μία ζώνη να χρησιμοποιηθεί για την ενσωμάτωση των υλικών ΥΑΦ ενώ η άλλη θα χρησιμεύσει ως ζώνη αναφοράς προκειμένου να αξιολογηθούν τα οφέλη ενσωμάτωσης των ΥΑΦ στην μείωση των απαιτούμενων ψυκτικών και θερμικών φορτίων.

Το μοντέλο πολυζωνικού κτηρίου δεν επιτρέπει την προσομοίωση κτηρίων που περιέχουν υλικά μεταβαλλόμενης θερμοχωρητικότητας (άρα και των ΥΑΦ). Για το σκοπό αυτό, η απόκριση των δομικών στοιχείων που περιέχουν τέτοια υλικά θα έγινε μέσω ενός αριθμητικού μοντέλου υλοποιημένου σε Fortran που αναπτύχθηκε για ένα τυχαίο υλικό ΥΑΦ από τους Jokisalo και Lamperg

(παράγραφος 3.1). Το μοντέλο αυτό τροποποιήθηκε ώστε να προσομοιώνει ένα δομικό στοιχείο (τοίχο ή αντίστοιχη επιφάνεια) και προσαρμόστηκε στο μοντέλο πολυζωνικού κτηρίου κάνοντας δυνατή τη ενεργειακή προσομοίωση πολύπλοκων κτηρίων που περιέχουν υλικά ΥΑΦ στη δομή τους. Η προσαρμογή του μοντέλου έγινε μέσω ροών θερμότητας που προσπίπτουν στο δομικό στοιχείο που περιέχει ΥΑΦ και υπολογίζονται από τον τύπο 56 του TRNSYS (με βάση τη θέση του δομικού στοιχείου). Το μοντέλο ΥΑΦ λαμβάνει ως είσοδο τις ροές αυτές καθώς και τη θερμοκρασία δωματίου και επιστρέφει στον τύπο 56 τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου που περιέχει ΥΑΦ. Με τον τρόπο αυτό διάφορα δομικά στοιχεία με ΥΑΦ σε διάφορες θέσεις στο κτήριο μπορούν να προσομοιωθούν.

Η μέθοδος αυτή θεωρείται πολύ πιο εύχρηστη από εκείνη που κάνει χρήση της λειτουργίας ενεργών υλικών του TRNSYS αφού επιτρέπει την πρόσβαση απευθείας στις ιδιότητες του ΥΑΦ ως παραμέτρους χωρίς να απαιτεί τη χρήση «ισοδύναμων» μεταβλητών που απαιτούν πειραματική διαδικασία καθορισμού και που μπορεί να περιέχουν σημαντικές ανακρίβειες.

Οι προσομοιώσεις έγιναν με τις δύο ζώνες να λειτουργούν κάτω από ενεργητικές συνθήκες ψύξης και θέρμανσης. Αυτό σημαίνει ότι και οι δύο χρησιμοποιούν κάποιο σύστημα για τη θέρμανση ή την ψύξη. Η θερμοκρασία των ζωνών διατηρείται πάντα στο διάστημα από 20 °C (κάτω από την οποία ενεργοποιείται το σύστημα θέρμανσης) και 26 °C (πάνω από την οποία ενεργοποιείται το σύστημα ψύξης). Αυτό το εύρος θερμοκρασιών θεωρείται επαρκές για να εξασφαλίσει συνθήκες θερμικής άνεσης στους χρήστες των δύο ζωνών.

Είναι φανερό ότι το φορτίο (ψυκτικό ή θερμικό) που απαιτείται για τις δύο ζώνες εξαρτάται κυρίως από τους ακόλουθους παράγοντες:

- (1) Από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τις μεταβολές της
- (2) Από την άμεση και έμμεση ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τη δομή του κτηρίου
- (3) Από τα συνολικά κέρδη (gains) που παράγονται στο εσωτερικό της κάθε ζώνης από τους χρήστες και τις διάφορες συσκευές
- (4) Από την κατασκευή της ζώνης (μόνωση, θερμική μάζα κτλ).

Με δεδομένο ότι οι παραπάνω παράγοντες είναι κοινοί για τις δύο ζώνες, εκτός από την προσθήκη των υλικών ΥΑΦ σε μια από αυτές, η όποια διαφορά στα απαιτούμενα θερμικά φορτία μπορεί να θεωρηθεί αποτέλεσμα της εφαρμογής των ΥΑΦ και μόνο. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να μην αναζητήσουμε τα ακριβή θερμικά φορτία (τα οποία θα μεταβάλλονται με την μεταβολή κάποιου από τους ανωτέρω παράγοντες κατά απόλυτη τιμή), αλλά αντίθετα να εστιάσουμε μόνο στη διαφορά μεταξύ των θερμικών φορτίων στις δύο ζώνες και να παραμετροποιήσουμε εάν θέλουμε τη διαφορά αυτή με βάση τη μεταβολή κάποιων από τις βασικές παραμέτρους (όπως για παράδειγμα τα εσωτερικά κέρδη).

3.2.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά ζωνών

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ρεαλιστικό υπόδειγμα των δύο ζωνών, χρησιμοποιήθηκαν για τις δύο ζώνες οι διαστάσεις και ο προσανατολισμός ενός υπάρχοντος κτηρίου και συγκεκριμένα του εργαστηρίου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Εικόνα 3.1).

Σε ότι αφορά τα υλικά κατασκευής, αυτά μεταβλήθηκαν ώστε να μπορούμε να εκτιμήσουμε τη βελτίωση που μπορεί να προκαλέσει η προσθήκη υλικών ΥΑΦ σε διαφορετικές κατηγορίες κτηρίων. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τρεις τύποι κατασκευών που είναι μάλλον τυπικοί της ελληνικής πραγματικότητας:

(α) Μια καινούρια κατασκευή με τοίχους από διπλό τούβλο και μόνωση

(β) Μια παλαιότερη κατασκευή με διπλό τούβλο και χωρίς μόνωση και

(γ) Μια κατασκευή προκατασκευασμένου κτηρίου με μεταλλικά ελάσματα και μόνωση όπως αυτό του Εργαστηρίου Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης (εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1. Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η μελέτη της προσθήκης ΥΑΦ έγινε για κάθε τύπο κατασκευής ξεχωριστά με έμφαση στις δύο πρώτες καθώς αυτές αντιπροσωπεύουν τη συντριπτική πλειονότητα κατασκευών κτηρίων στην Ελλάδα.

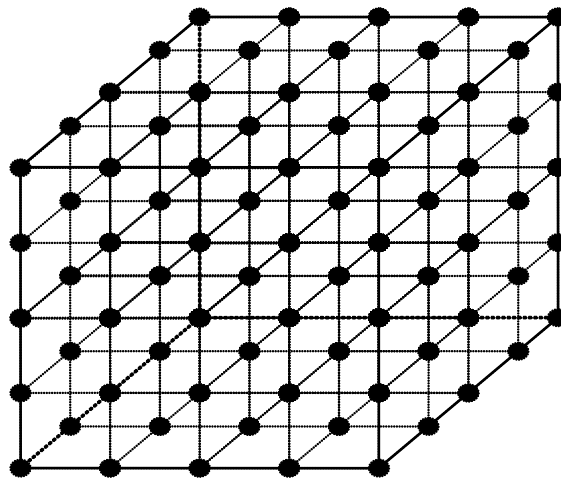
Το μοντέλο επιτρέπει στις ζώνες να ανταλλάσσουν αέρα με το περιβάλλον μέσω της διαδικασίας διείσδυσης (Infiltration). Αυτή η διαδικασία της διείσδυσης είναι αναπόφευκτη και ο αέρας εισάγεται με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ο ρυθμός διείσδυσης ορίστηκε σε 1 ac/h για όλες τις ζώνες.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η ψύξη και θέρμανση στις δύο ζώνες λειτουργούν συνεχώς προσπαθώντας να κρατήσουν την εσωτερική θερμοκρασία μεταξύ 20 και 26 °C. Η μέγιστη ισχύς του εγκατεστημένου συστήματος θέρμανσης και ψύξης δεν έχει οριστεί καθώς δεν ενδιαφερόμαστε τόσο για την διαστασιολόγηση των μονάδων αλλά κυρίως για το απαιτούμενο φορτίο.

Σε ότι αφορά τις κλιματικές συνθήκες, αυτές επιλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων του TRNSYS να προσομοιώνουν τις συνθήκες της Αθήνας. Η περίοδος προσομοίωσης ορίστηκε ολόκληρο το έτος καθώς ενδιαφερόμαστε για τη συνολική συμπεριφορά του κτηρίου τόσο τους χειμερινούς όσο και τους καλοκαιρινούς μήνες.

3.2.2 Προσομοίωση Υλικών ΥΑΦ

Η προσομοίωση των υλικών ΥΑΦ έγινε με την χρήση του αριθμητικού μοντέλου Type 204. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ένα τρισδιάστατο δίκτυο 729 σημείων προκειμένου να προσομοιώσει το υλικό ΥΑΦ με 9 κόμβους σε κάθε κατεύθυνση (Εικόνα 3.2) και επιλύει τις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας για τις διάφορες καταστάσεις του ΥΑΦ (στερεό-υγρό ή συνδυασμός). Σε κάθε κόμβο μπορούμε να έχουμε διαφορετικό υλικό και με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει προσομοίωση και σύνθετων κατασκευών που δεν περιέχουν μόνο ΥΑΦ αλλά και άλλα στοιχεία όπως το Μπετόν (Concrete with microencapsulated paraffin) ή ο γύψος (Επίχρισμα - Plaster with microencapsulated paraffin). Επιπλέον, η κατ'όγκο αναλογία του ΥΑΦ στον κάθε κόμβο μπορεί να οριστεί εύκολα. Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή (conduction), μεταφορά (convection) και ακτινοβολία (radiation) μεταξύ των κόμβων λαμβάνεται υπόψη στις εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας.



Εικόνα 3.2. Διάταξη κόμβων στο χώρο στο μοντέλο ΥΑΦ Type 204

Η μεταβολή της θερμοκρασίας σε κάθε κόμβο υπολογίζεται με βάση τη ισοδύναμη θερμική χωρητικότητα $C_{pe}(T)$. Η συνάρτηση που περιγράφει αυτή τη μεταβολή μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά (ενδεικτική μορφή παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.1) και μπορεί να προσεγγιστεί από μια συνάρτηση τετραγωνικού παλμού με μικρή περιοχή supercooling 1°C (διάγραμμα 3.2). Η υπόθεση αυτή έχει ασθενή μόνο επιρροή στη μεταφορά θερμότητας όπως αποδείχθηκε από τους Alisetti και Roy [Alisetti and Roy, 2000].

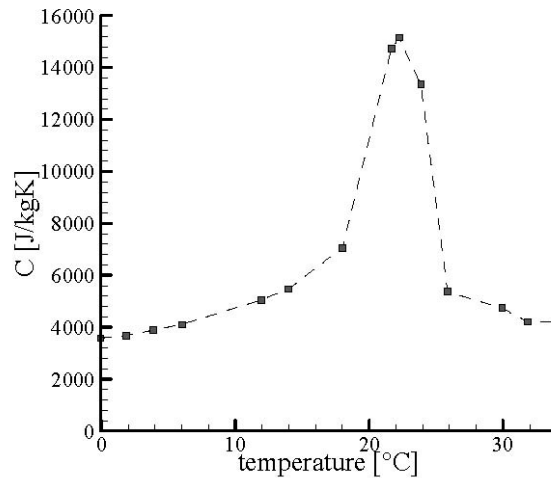
Αν υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία ρευστοποίησης του ΥΑΦ είναι το διάστημα $[T_1, T_2]$ και η λανθάνουσα θερμότητα του υλικού είναι L (J/Kgr), η ισοδύναμη θερμική χωρητικότητα δίνεται από τον τύπο:

$$C_{pe} = \frac{L}{T_2 - T_1} + \frac{C_{pS} + C_{pL}}{2}$$

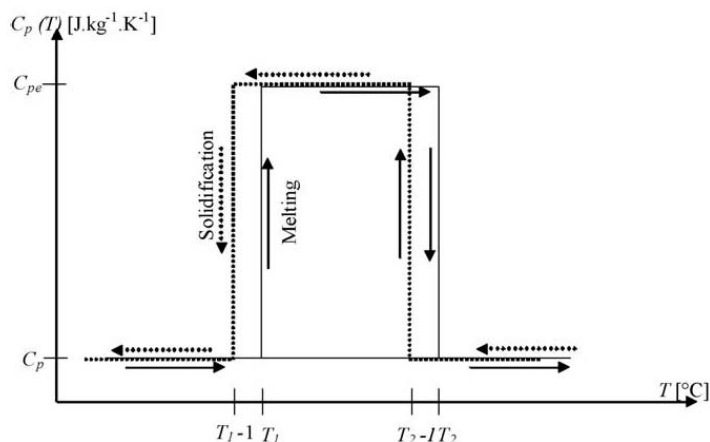
Η μεταβολή της ειδικής θερμικής χωρητικότητας με τη θερμοκρασία περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$C_p(T) = \begin{cases} C_{pS}, T < T_1 \\ C_{pe}, T_1 \leq T < T_2 \text{ αν η θερμοκρασία αυξάνεται και} \\ C_{pL}, T \geq T_2 \end{cases}$$

$$C_p(T) = \begin{cases} C_{pS}, T < (T_1 - 1) \\ C_{pe}, (T_1 - 1) \leq T < (T_2 - 1) \text{ αν η θερμοκρασία μειώνεται.} \\ C_{pL}, T \geq (T_2 - 1) \end{cases}$$



Διάγραμμα 3.1. Πειραματική καμπύλη (ενδεικτική) μεταβολής θερμικής χωρητικότητας υλικού ΥΑΦ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [Ahmad M. et al., 2006a]



Διάγραμμα 3.2. Καμπύλη μεταβολής θερμικής χωρητικότητας υλικού ΥΑΦ ως συνάρτηση της θερμοκρασίας στο μοντέλο Type 204.

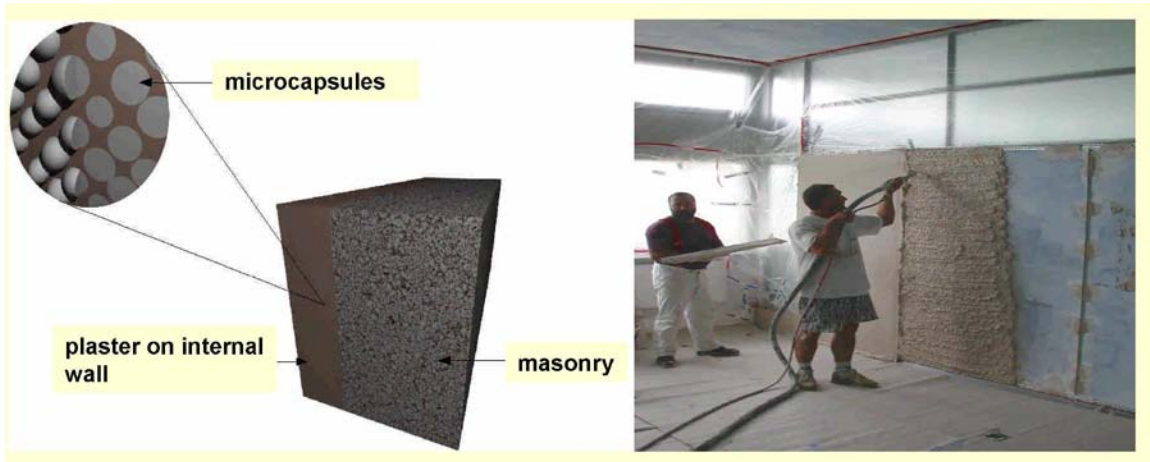
Οι εξισώσεις μεταφοράς της θερμότητας επιλύονται με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (έμμεση μέθοδος Crank-Nicholson) με την οποία υπολογίζεται η θερμοκρασία σε κάθε κόμβο.

Η ενσωμάτωση του μοντέλου στο TRNSYS έγινε μέσω ενός τοίχου με οριακές συνθήκες (Boundary wall). Το μοντέλο δέχεται ως εισόδους τη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου και τη ροή θερμότητας προς τον τοίχο (ηλιακά κέρδη και εσωτερικά κέρδη) και μετά τους υπολογισμούς επιστρέφει στο μοντέλο πολυζωνικού κτηρίου (Type 56) τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του τοίχου. Το μοντέλο του ΥΑΦ δίνει τη δυνατότητα εύκολου καθορισμού των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο ΥΑΦ όπως το εύρος θερμοκρασιών ρευστοποίησης, το εύρος του supercooling, τη θερμική αγωγιμότητα, την ειδική θερμική χωρητικότητα αλλά και την αναλογία του υλικού ΥΑΦ (στην περίπτωση σύνθετων υλικών). Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης προσομοίωσης φαίνεται στην Εικόνα 3.5.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω το μοντέλο έχει πιστοποιηθεί ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του με πειραματικά δεδομένα για ένα διάστημα 20 μηνών και συνεπώς τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναμένεται να είναι ρεαλιστικά.

Σε ότι αφορά το υλικό ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε, αυτό είναι ένα ειδικό υλικό επιχρίσματος για εσωτερικούς χώρους που περιέχει 20% (κατά βάρος) υλικό Micronal (μικροσυσκευασμένη παραφίνη (microencapsulated paraffin)) της εταιρείας Maxit και το οποίο και είναι εμπορικά διαθέσιμο με την επωνυμία Maxit Clima (Εικόνα 3.3). Η θερμική του χωρητικότητα ανέρχεται σε 18 kJ/kg στο θερμοκρασιακό εύρος 23-26 °C. Το υλικό έχει ελεγχθεί πειραματικά ως προς την καταλληλότητα και αποτελεσματικότητά του από το FHG-ISE και το πάχος του στρώματος εφαρμογής του καθορίζει ουσιαστικά την ποσότητα ΥΑΦ που προστίθεται στο κτήριο. Αυτό ήταν το υλικό που προστέθηκε σε όλες τις προσομοιώσεις των κατασκευών της εργασίας εκτός από τα προκατασκευασμένα κτήρια στα οποία δεν θα ήταν ρεαλιστικό να προσθέσουμε

υλικό επιχρίσματος. Στην περίπτωση αυτή προστέθηκε γυψοσανίδα που περιέχει μικροσυσκευασμένη παραφίνη, της ίδιας εταιρείας, με την επωνυμία Micronal ΥΑΦ Smartboard. Η γυψοσανίδα έχει συγκεκριμένες διαστάσεις (2.0 m x 1.25m x 15mm) και περιέχει 3kg/m² Micronal (26% κατ. Βάρος) έχοντας θερμική χωρητικότητα 330kJ/m² (Εικόνα 3.4). Το εύρος θερμοκρασιών τήξης είναι και σε αυτή την περίπτωση 23-26 °C.

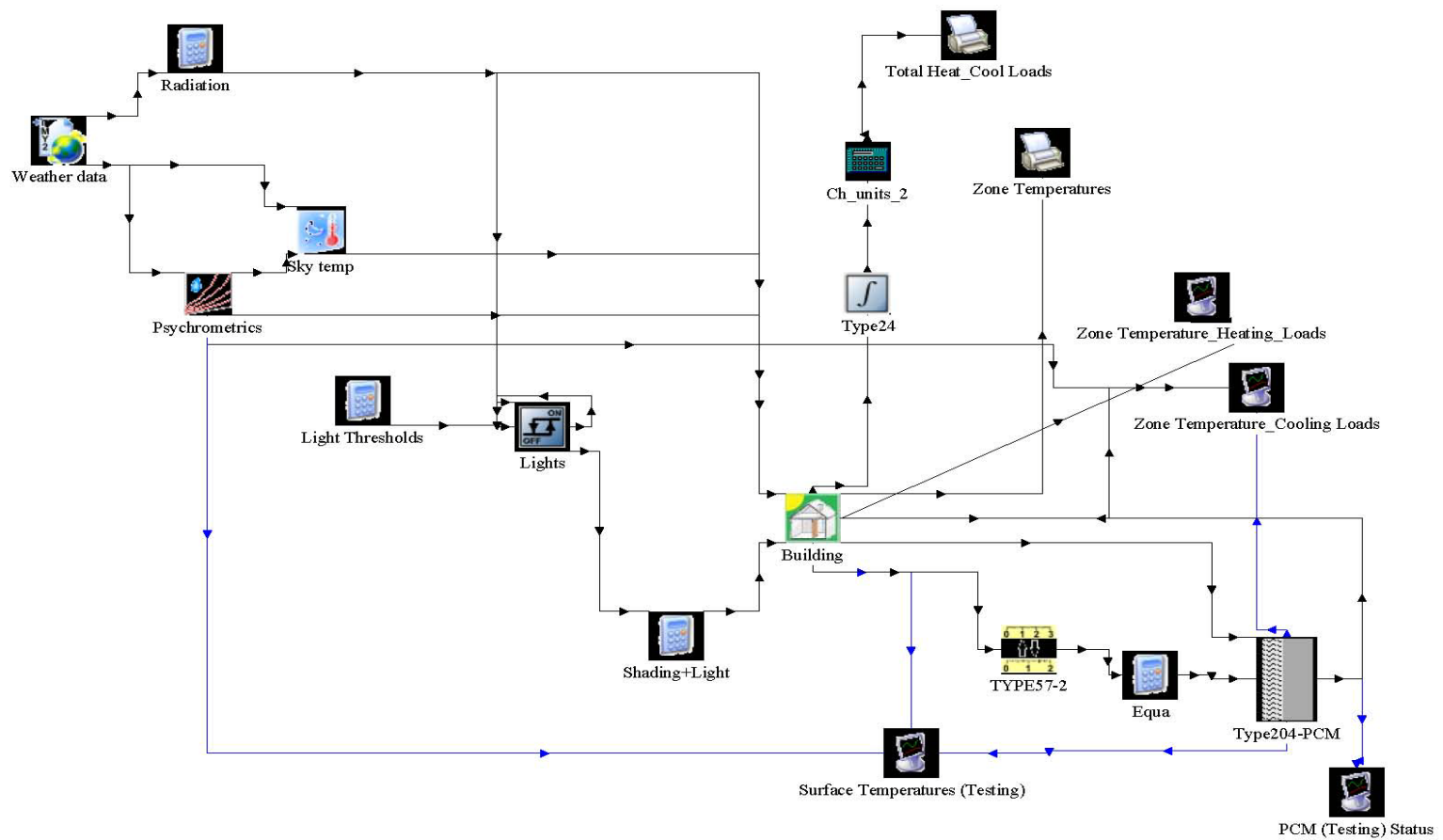


Εικόνα 3.3. Επίχρισμα (Σοβάς) με ΥΑΦ (Maxit Clima)

Length	2,00 m
Width	1,25 m
Thickness	15 mm
Weight	11,5 kg/m ²
PCM content	approx. 3 kg dry/m ²
Heat capacity (latent)	min. 330 kJ/m ²



Εικόνα 3.4. Γυψοσανίδα με ΥΑΦ (Micronal ΥΑΦ Smartboard)



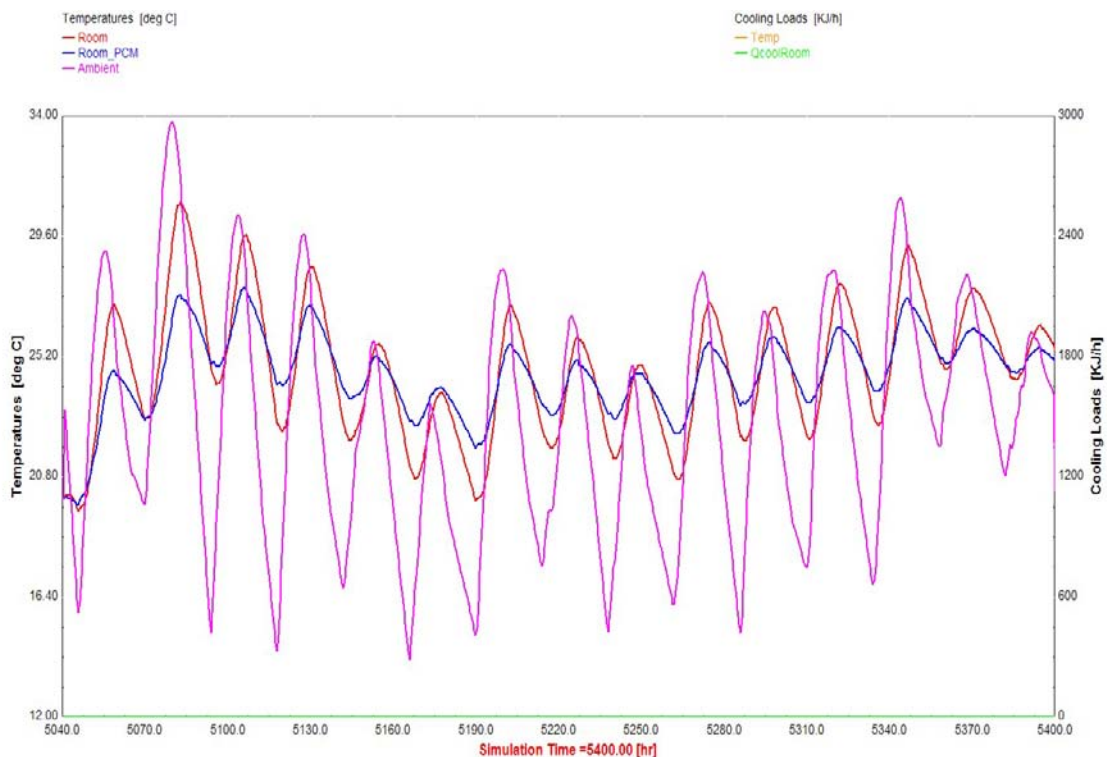
Εικόνα 3.5. Μοντέλο των δύο ζωνών με ενσωματωμένο το μοντέλο ΥΑΦ Type 204.

4. Αποτελέσματα Προσομοίωσης και Ανάλυση

4.1 Προσομοίωση ζωνών με παθητικό κλιματισμό

Προκειμένου να έχουμε μια βάση σύγκρισης των αποτελεσμάτων μας και με δεδομένο την έλλειψη πειραματικών μετρήσεων, αρχικά έγινε προσομοίωση με απενεργοποιημένα τα συστήματα ψύξης και θέρμανσης ώστε να δούμε τη θερμική συμπεριφορά των ζωνών με ΥΑΦ και να τη συγκρίνουμε με τη συμπεριφορά που περιγράφεται στη βιβλιογραφία.

Δεν προστέθηκαν εσωτερικά κέρδη και οι δύο ζώνες αφέθηκαν να λειτουργήσουν κάτω από την επίδραση των ηλεκτρικών φώτων και μόνο. Η διακύμανση της εξωτερικής θερμοκρασίας περιβάλλοντος (ροζ γραμμή) και των θερμοκρασιών αέρα των δύο ζωνών (μπλε και κόκκινη γραμμή) φαίνονται στο Διάγραμμα 4.1. Αυτή αφορά την προσομοίωση για την περίοδο ενός μήνα (Ιούλιος) σε μια περιοχή με ηπειρωτικό κλίμα (ώστε να υπάρχουν απότομες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κάτι που έχει δειχθεί ως ιδανικό για τη λειτουργία του ΥΑΦ).



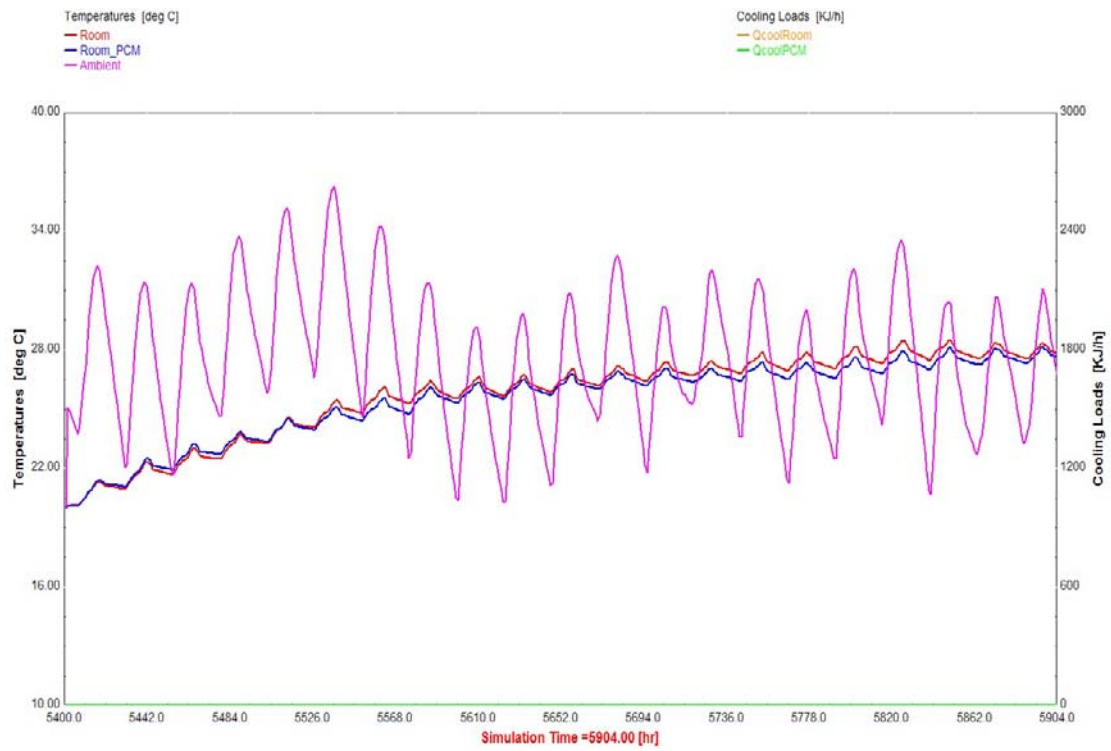
Διάγραμμα 4.1. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες ως συνάρτηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Παρατηρούμε ότι η προσθήκη του ΥΑΦ είχε σαν αποτέλεσμα την προσθήκη επιπλέον θερμικής μάζας στην αντίστοιχη ζώνη. Η απόκριση της

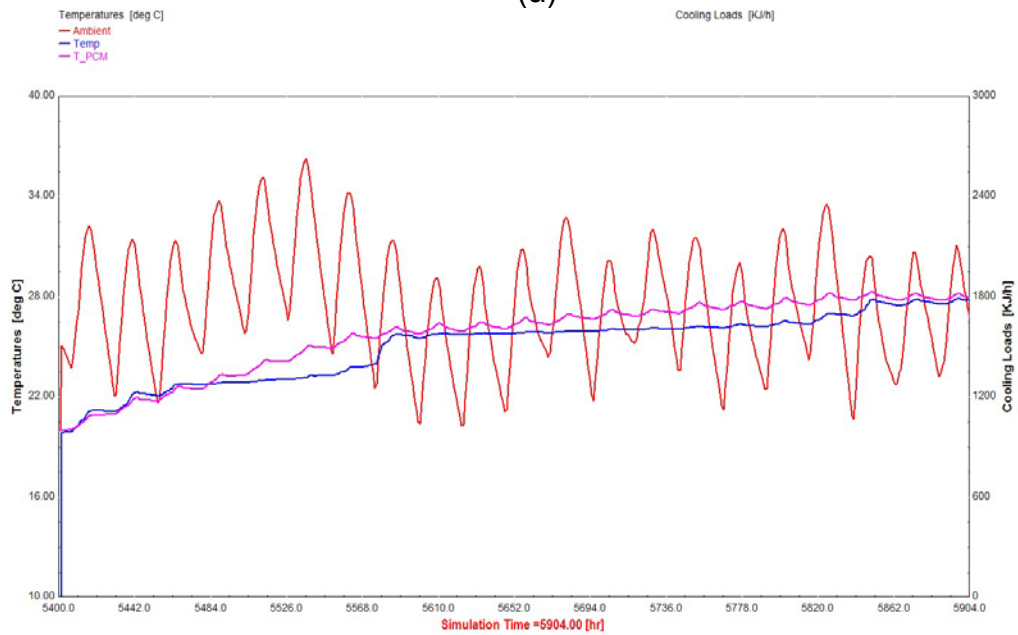
ζώνης αυτής στις θερμοκρασιακές συνθήκες του περιβάλλοντος (μπλε γραμμή) είναι πιο αργή καθώς το ΥΑΦ λειτουργεί σαν συσσωρευτής ενέργειας απορροφώντας θερμότητα κατά την άνοδο της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ελευθερώνοντάς την κατά την πτώση της. Η συμπεριφορά αυτή που αποτυπώνεται στην προσομοίωση ταυτίζεται με αυτή που παρατηρήθηκε πειραματικά [Kuznik, 2007], [Ahmad et al., 2006a]. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μείωση στη μέγιστη θερμοκρασία της ζώνης κατά 1.5 °C περίπου και αύξηση της ελάχιστης θερμοκρασίας κατά 3 °C περίπου. Ταυτόχρονα φαίνεται η εισαγωγή μιας διαφοράς φάσης μεταξύ των κυματομορφών της εξωτερικής θερμοκρασίας, της ζώνης χωρίς ΥΑΦ και της ζώνης με ΥΑΦ. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην επιπλέον θερμική μάζα και στην περίπτωσή μας είναι της τάξης των 0.5 h.

Μία δεύτερη προσομοίωση έγινε στις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας για την περίοδο από 15 Αυγούστου έως 6 Σεπτεμβρίου (από τις πιο ζεστές του ελληνικού καλοκαιριού) ώστε να αναλυθεί η συμπεριφορά του ΥΑΦ σε μεγάλες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Στην προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα στρώμα ΥΑΦ πάχους 5 mm. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.2α, το ΥΑΦ σε θερμοκρασίες κάτω από την ζώνη αλλαγής φάσης συμπεριφέρεται όπως και ένα συμβατικό υλικό, ενώ όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 23°C αρχίζει να αποθηκεύει θερμότητα γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία της ζώνης με ΥΑΦ να διατηρείται χαμηλότερα από τη ζώνη αναφοράς για σημαντικό χρονικό διάστημα. Η συνεχής έκθεση σε μεγάλες θερμοκρασίες (πάνω από τη ζώνη αλλαγής φάσης) ωστόσο έχει σαν αποτέλεσμα τον κορεσμό του ΥΑΦ που κατόπιν συμπεριφέρεται όπως και τα συμβατικά υλικά με αποτέλεσμα η συμπεριφορά των δύο ζωνών να είναι ακριβώς η ίδια.

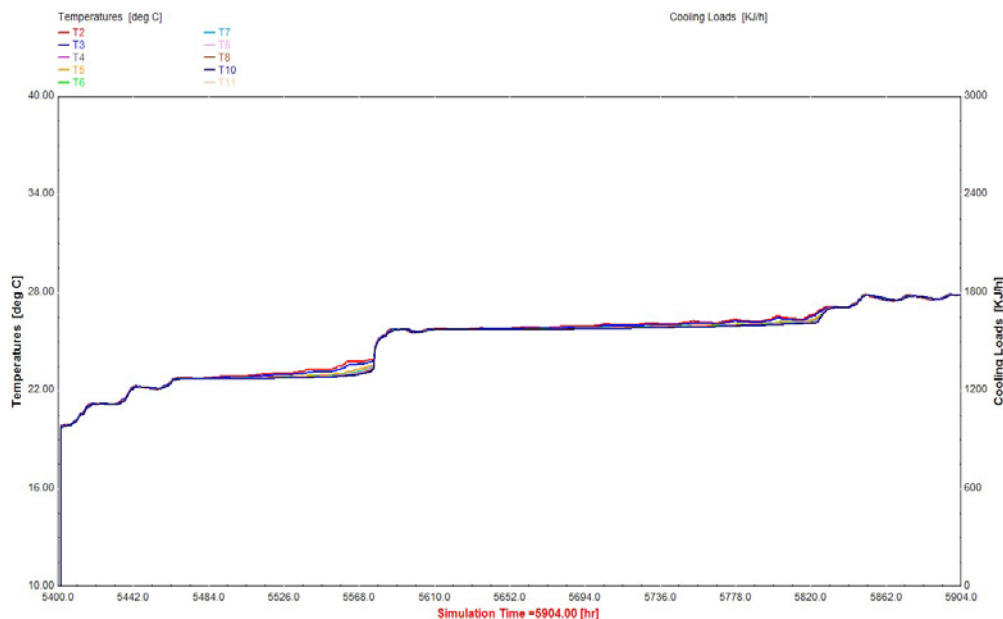
Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται επίσης στο διάγραμμα 4.2β που περιγράφει την μεταβολή της θερμοκρασίας του τοίχου με ΥΑΦ (μπλε γραμμή) σε σύγκριση με αυτή ενός συμβατικού τοίχου (ροζ γραμμή). Η δύο τοίχοι συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο στην αρχή της προσομοίωσης και όσο η θερμοκρασία τους βρίσκεται κάτω από τους 23°C. Η ενεργοποίηση του ΥΑΦ στη θερμοκρασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα ο τοίχος με ΥΑΦ να κρατά σταθερή σχεδόν θερμοκρασία μεταξύ των 23 και 26 °C. Καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος παραμένει υψηλή το ΥΑΦ δεν έχει τη δυνατότητα να αποφορτιστεί με αποτέλεσμα όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 26°C να συμπεριφέρεται σαν ένα συμβατικό υλικό. Η σταδιακή ενεργοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας του ΥΑΦ στο εσωτερικό του τοίχου αποτυπώνεται στο διάγραμμα 4.2γ.



(α)



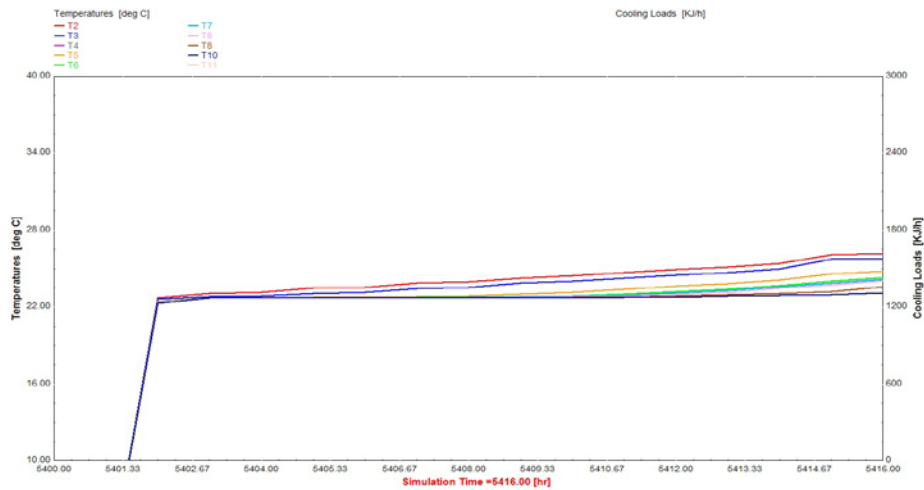
(β)



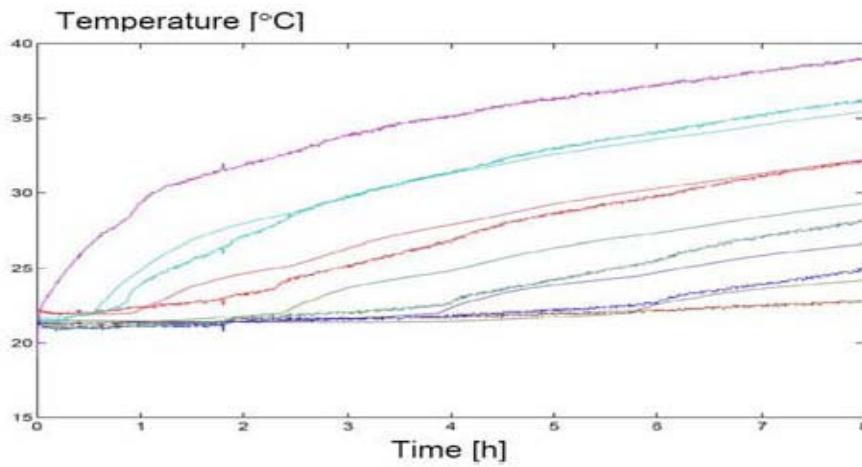
(γ)

Διάγραμμα 4.2 (α) Θερμοκρασία ζώνης με ΥΑΦ και συμβατικής κατασκευής (πάχος ΥΑΦ 5 mm) σε συνθήκες της Ελλάδας από 15 Αυγούστου έως 6 Σεπτεμβρίου (β) Θερμοκρασία τοίχου με ΥΑΦ σε σύγκριση με ένα συμβατικό τοίχο και (γ) Κατανομή θερμοκρασιών εσωτερικά του τοίχου με ΥΑΦ.

Σε ότι αφορά τη λειτουργία του μοντέλου, έγινε προσομοίωση της μεταβολής της θερμοκρασίας στους διάφορους κόμβους εσωτερικά του τοίχου ενώ αυτός δέχεται συνεχή ροή θερμότητας 5.5 KW/h (διάγραμμα 4.3α). Αν και δεν επιδιώκεται να προσομοιωθεί η εσωτερική διάδοση της θερμότητας στο ΥΑΦ με την ακρίβεια εξειδικευμένων προγραμμάτων (FLUENT, HEAT κτλ), μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας στους διάφορους κόμβους εσωτερικά του ΥΑΦ (πέρα από την επίδραση των αρχικών συνθηκών) παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά λόγω της λανθάνουσας θερμότητας όταν η θερμοκρασία του κόμβου φτάσει στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης (23°C). Ο κάθε κόμβος διατηρεί τη θερμοκρασία του σταθερή για ένα διάστημα και μετά η θερμοκρασία αυτή αρχίζει να αυξάνει. Το μοντέλο μας λοιπόν ποιοτικά τουλάχιστον παρουσιάζει την επιθυμητή συμπεριφορά που διαπιστώθηκε από πειραματικές μετρήσεις [Rose J., 2009] (εικόνα 4.3β). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προσομοίωσή μας αφορά ένα στρώμα πάχους 1.5 cm από ΥΑΦ σε αντίθεση με αυτή της εικόνας 4.3β που αφορά την προσομοίωση στρωμάτων γυψοσανίδας 27cm (30% κβ ΥΑΦ micronal).



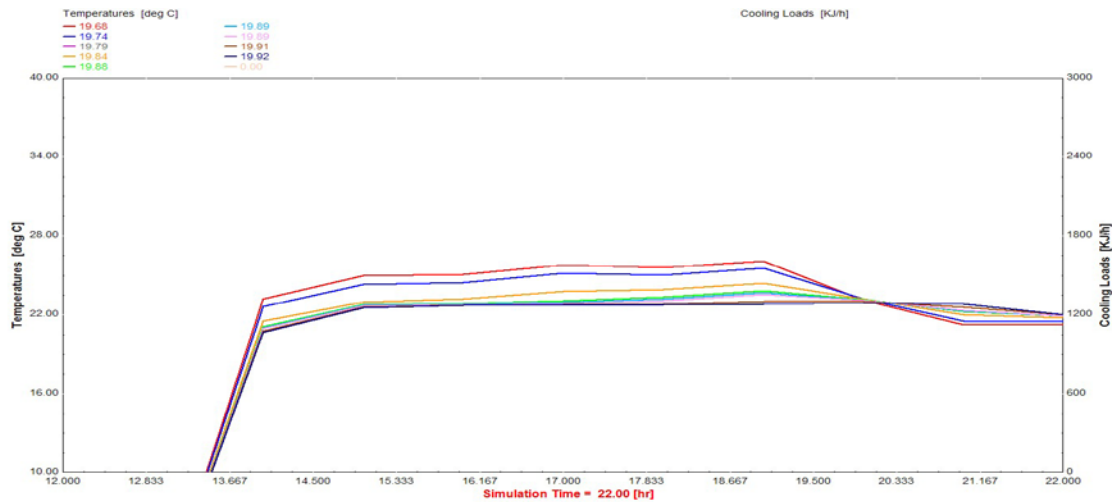
(α)



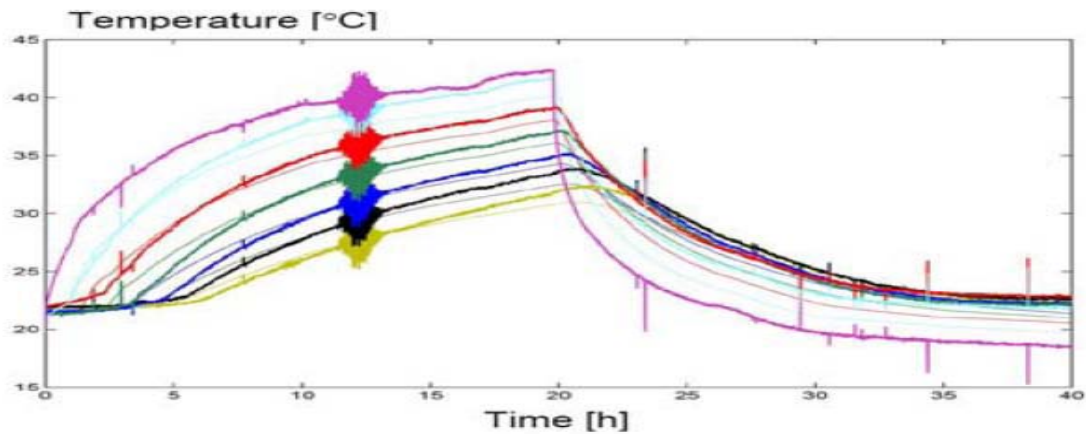
(β)

Διάγραμμα 4.3. Μεταβολή θερμοκρασίας εσωτερικά του ΥΑΦ σε συνεχή θέρμανση (α) TRNSYS και (β) BSim [Rose J. 2009].

Επιπλέον, προσομοιώθηκε η συμπεριφορά του τοίχου καθώς αυτός αφήνεται να ψυχθεί μετά από συνεχή θέρμανση. Τα αποτελέσματα είναι και πάλι αντίστοιχα της βιβλιογραφίας (εικόνα 4.4 α,β).



(α)



(β)

Διάγραμμα 4.4. Μεταβολή θερμοκρασίας εσωτερικά του ΥΑΦ κατά την ψύξη (α) TRNSYS και (β) BSim [Rose J. 2009].

Από τα παραπάνω, αλλά και από το γεγονός ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για το ΥΑΦ έχει επαληθευτεί πειραματικά [Ahmad M. et al., 2006α], προκύπτει ότι το μοντέλο μας μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστικό καθώς τα αποτελέσματά του συμφωνούν με τα αποτελέσματα άλλων μελετητών και με τα πειραματικά δεδομένα που περιγράφονται στη βιβλιογραφία.

4.2 Προσομοίωση σύγχρονων κατασκευών

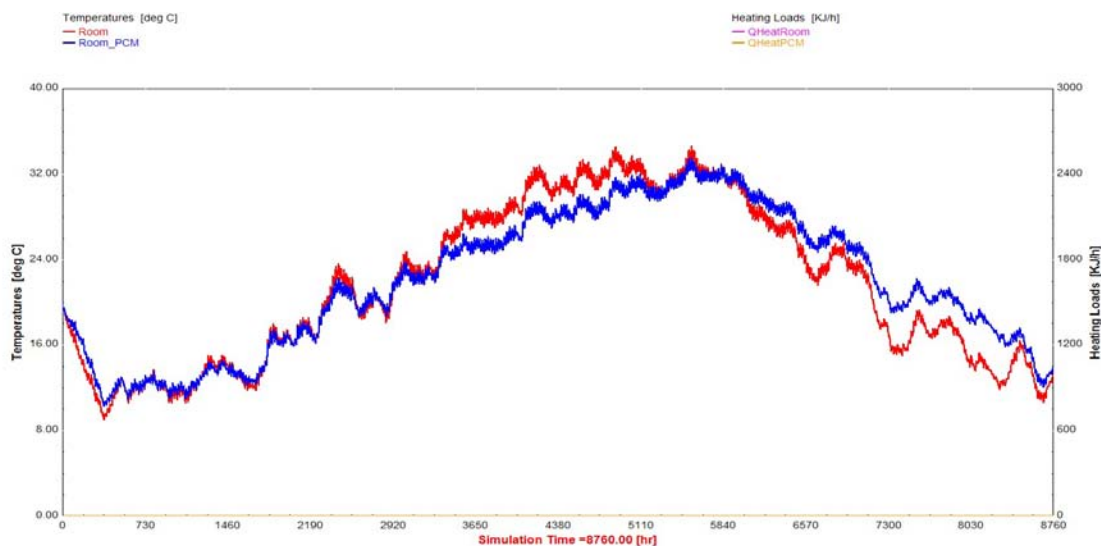
Το πρώτο κομμάτι της μελέτης μας αφορά τη βελτίωση της ενεργητικής απόδοσης σύγχρονων κτηρίων. Τα κτήρια αυτή κατασκευάζονται με βάση έναν σύγχρονο κανονισμό δόμησης με συγκεκριμένες προδιαγραφές σε ότι αφορά τη μόνωση και τη θερμική μάζα. Η βελτίωση της απόδοσής τους όμως μπορεί ίσως να επιτευχθεί με τη βοήθεια υλικών ΥΑΦ.

Οι δύο θερμικές ζώνες του μοντέλου μας θα προσομοιώσουν δύο σύγχρονης κατασκευής απλά κτήρια. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των δύο κτηρίων φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Τα δύο κτήρια είναι στην ουσία ακριβώς ίδια με μόνη διαφορά την αντικατάσταση του εσωτερικού επιχρίσματος (σοβάς) με το ειδικό υλικό επιχρίσματος που περιέχει ΥΑΦ (maxit clima).

Πίνακας 4.1. Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ζωνών

Ζώνη 1 (Συμβατικό Κτήριο)		Ζώνη 2 (Κτήριο με ΥΑΦ)	
Τοίχοι	Σοβάς εξωτερικός(1.5cm)	Τοίχοι	Σοβάς εξωτερικός(1.5cm)
	Μόνωση (10cm)		Μόνωση (10cm)
	Τούβλο (24cm)		Τούβλο (24cm)
	Σοβάς εσωτερικός(1.5cm)		Σοβάς Maxit Clima (1.5 cm)
Οροφή	Μόνωση (10 cm)	Οροφή	Μόνωση (10 cm)
	Μπετόν (24cm)		Μπετόν (24cm)
	Σοβάς 1 cm		Σοβάς Maxit Clima (1cm)
Δάπεδο	Πλακάκι 5mm	Δάπεδο	Πλακάκι 5mm
	Υλικό επικόλλησης 5mm		Υλικό επικόλλησης 5mm
	Μπετόν 24 cm		Μπετόν 24 cm
	Μόνωση 10 cm		Μόνωση 10 cm
Θέρμανση-Ψύξη	OFF	Θέρμανση-Ψύξη	OFF
Κέρδη	N/A	Κέρδη	N/A
Πάχος στρώματος ΥΑΦ	N/A	Πάχος στρώματος ΥΑΦ	1.5 cm

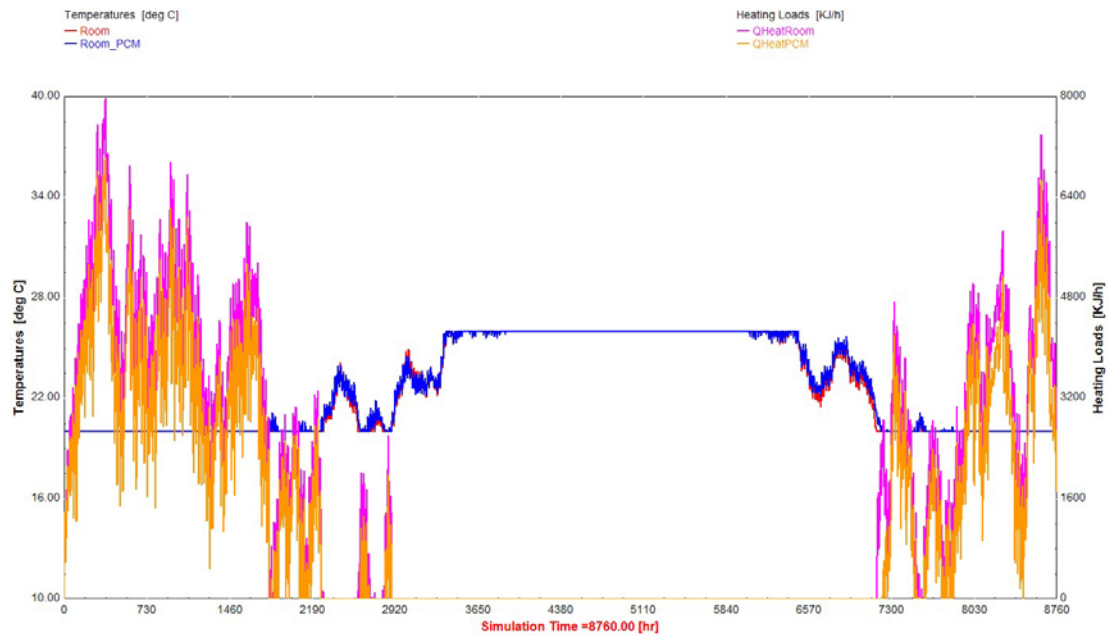
Το πάχος του στρώματος του ΥΑΦ τέθηκε αρχικά ίσο με αυτό του εσωτερικού κονιάματος που αντικαταστάθηκε, δηλαδή ίσο με 1.5 cm. Στο Διάγραμμα 4.5 απεικονίζεται η απόδοση των δύο ζωνών στις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας (Αθήνα) κατά τη διάρκεια ενός έτους. Δεν ενεργοποιήθηκε η θέρμανση και ψύξη των ζωνών.



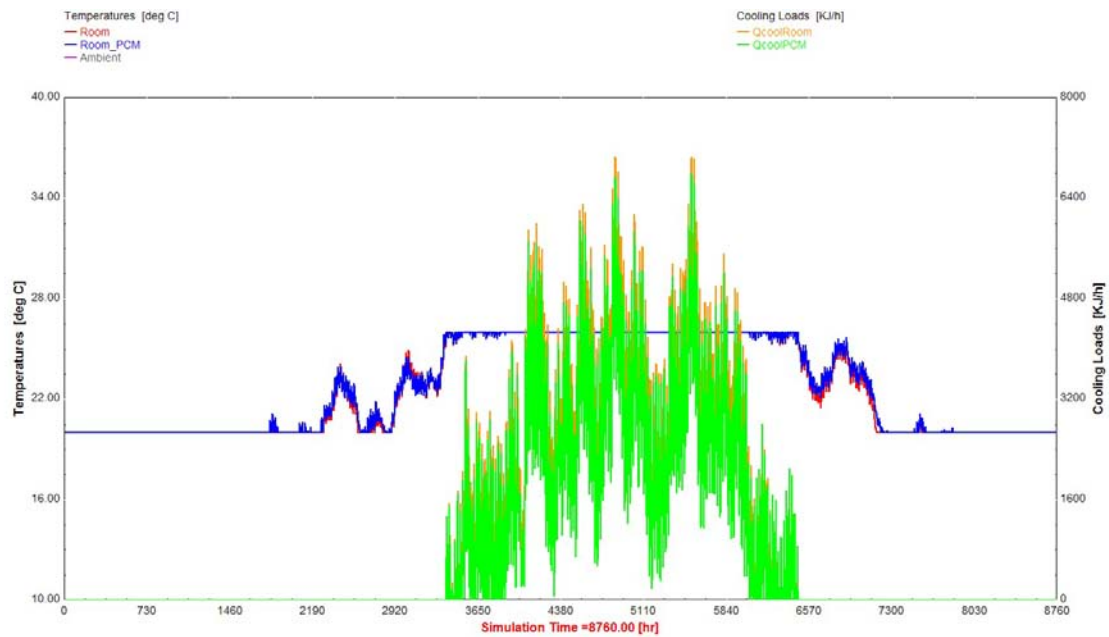
Διάγραμμα 4.5. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με απενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης

Η επίδραση της χρήσης του ΥΑΦ είναι χαρακτηριστική αφού περιορίζει την μείωση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του χειμώνα και την αύξησή της το καλοκαίρι. Έτσι η ζώνη στην οποία προστέθηκε ΥΑΦ καθυστερεί να φτάσει στη μέγιστη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και επιτυγχάνει να διατηρήσει μια διαφορά 1.5-2.5 °C έως την πρώτη εβδομάδα του Αυγούστου. Η διαφορά θερμοκρασίας τότε περιορίζεται στον 0.5 °C περίπου. Από εκεί και πέρα η προσθήκη του ΥΑΦ καθυστερεί την πτώση της θερμοκρασίας (η καθυστέρηση όμως αυτή δεν είναι σημαντική έως τις αρχές Σεπτεμβρίου). Είναι φανερό ότι από μόνη της η παρέμβαση αυτή δεν επαρκεί για την δημιουργία συνθηκών θερμικής άνεσης στους χρήστες. Πράγματι η θερμοκρασία φτάνει και ξεπερνά τους 32 °C το καλοκαίρι ενώ πέφτει στους 10 °C το χειμώνα και στις δύο ζώνες.

Η απόκριση των δύο ζωνών με ενεργοποιημένα τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης για το ίδιο διάστημα φαίνεται στα Διαγράμματα 4.6, 4.7. Στα δύο διαγράμματα μπορεί κανείς να δει τα απαιτούμενα θερμικά φορτία για τις δύο ζώνες. Παρατηρούμε ότι η καλύτερη απόκριση της ζώνης με το ΥΑΦ πράγματι αντιστοιχεί στη βελτίωση της ενεργητικής της απόδοσης. Ποσοτικά μάλιστα, η προσομοίωση έδειξε ότι η αναμενόμενη μείωση στο ψυκτικό και θερμικό φορτίο ανέρχεται σε 15% και 20% περίπου αντίστοιχα. Επιπρόσθετα παρατηρείται σημαντική μείωση και των μέγιστων ψυκτικών και θερμικών φορτίων δηλαδή της απαιτούμενης μέγιστης εγκατεστημένης ισχύος των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης. Η μείωση αυτή είναι της τάξης του 12.5% για το σύστημα θέρμανσης και 4% για το σύστημα ψύξης.



Διάγραμμα 4.6. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 1.5 cm)



Διάγραμμα 4.7. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 1.5 cm).

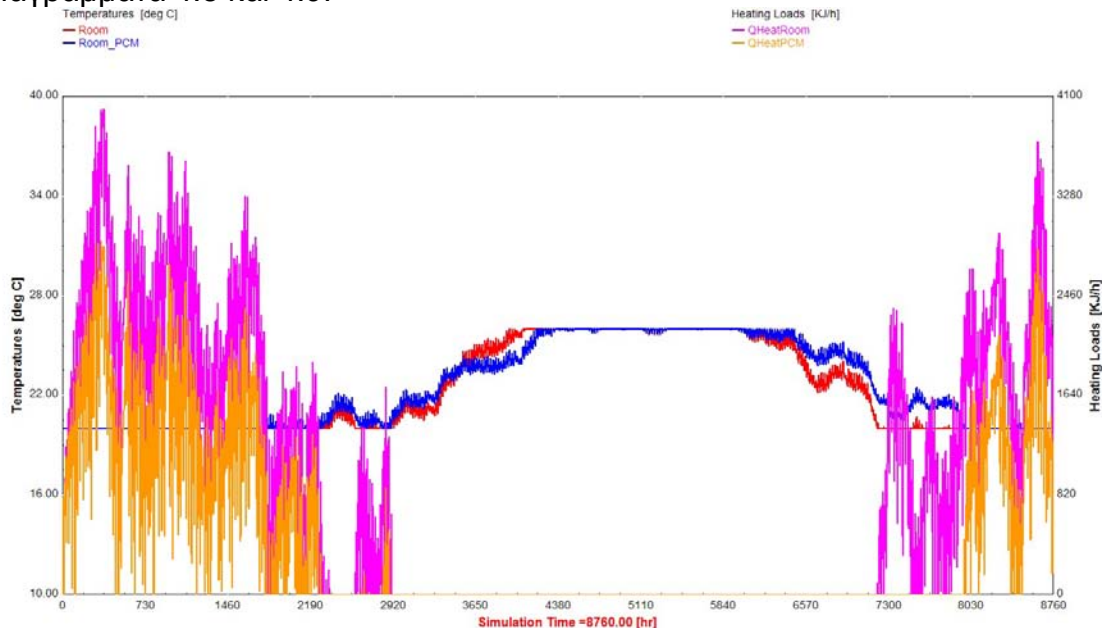
4.2.1 Επίδραση πάχους εφαρμοζόμενου ΥΑΦ

Με δεδομένο ότι η προσθήκη ΥΑΦ έχει θετικά αποτελέσματα στην ενεργειακή απόδοση του κτηρίου, όπως φάνηκε παραπάνω, είναι ενδιαφέρον να μελετήσουμε την επίδραση που έχει η προσθήκη περισσότερου υλικού ΥΑΦ, αυξάνοντας το πάχος του εφαρμοζόμενου στρώματος. Σημειώνεται ότι στη βιβλιογραφία έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες μεγάλη ποικιλία σε πάχη PCM που ενδεικτικά αναφέρονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2. Πάχη εφαρμοζόμενου ΥΑΦ στη βιβλιογραφία

Μελέτη	Πάχος ΥΑΦ	Παρατηρήσεις
Pasupathy 2007	2.5 cm	Πείραμα και προσομοίωση οροφής
Kuznik 2007	0.5 cm	Δωμάτιο σε πλήρη κλίμακα-Πείραμα
Stetieu, Feustel 1998	2 cm	Προσομοίωση πλήρους κτηρίου
Koschenz, Lehmann 2004	5 cm	Πείραμα και προσομοίωση τοίχου
Ahmad 2006a,b	2.5 cm	Πείραμα και προσομοίωση
Mehling,Cabeza 2008	12 cm	Τοίχος μπετόν με 5% ΥΑΦ-Πείραμα και προσομοίωση

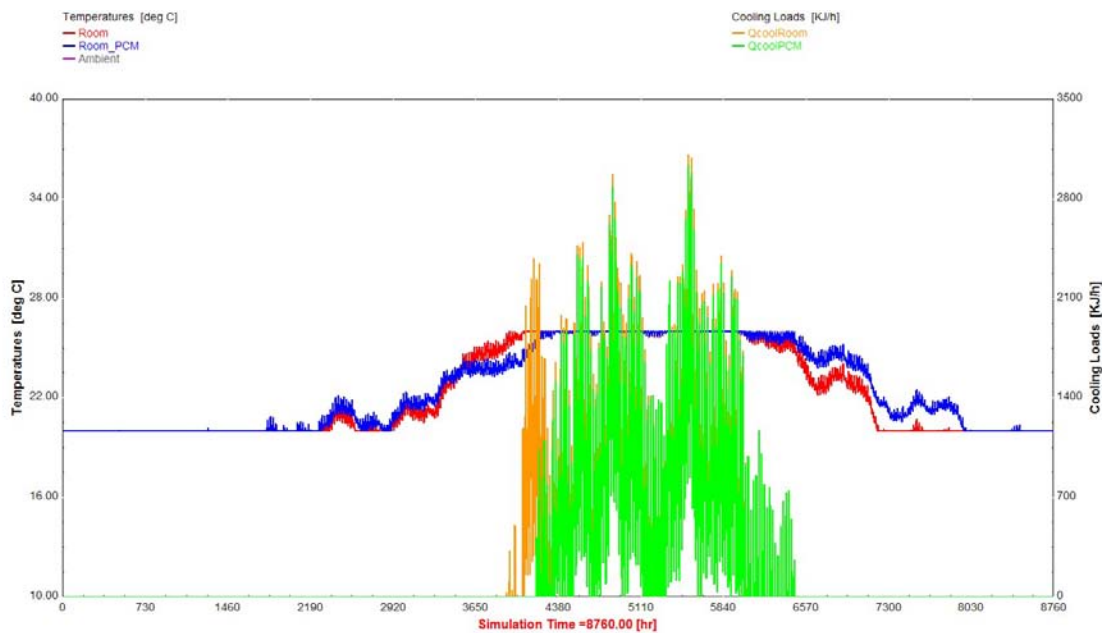
Έτσι αρχικά αυξήθηκε το πάχος του εφαρμοζόμενου ΥΑΦ σε 3 cm και επαναλήφθηκαν προσομοιώσεις των δύο ζωνών με ενεργοποιημένο το σύστημα θέρμανσης-ψύξης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στα διαγράμματα 4.8 και 4.9.



Διάγραμμα 4.8. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 3 cm)

Η προσθήκη επιπλέον θερμικής μάζας στο κτήριο είχε θετικές επιπτώσεις στην ενεργειακή απόδοση του κτηρίου. Η λειτουργία του ΥΑΦ είναι βέλτιστη κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες οπότε μειώνει σημαντικά τα απαιτούμενα θερμικά φορτία. Σε ότι αφορά την ψύξη, το ΥΑΦ λειτουργεί κατά τους μήνες της Άνοιξης και τους πρώτους μήνες του καλοκαιριού εμποδίζοντας τη θερμοκρασία του κτηρίου να αυξηθεί πάνω από τους 26 °C ωστόσο οι συνεχείς υψηλές θερμοκρασίες έχουν σαν αποτέλεσμα τον κορεσμό του οπότε η βελτίωση στα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία και κυρίως τη διαστασιολόγηση του συστήματος ψύξης είναι σχετικά μικρή.

Προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση του εφαρμοζόμενου πάχους του ΥΑΦ στην μείωση των απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης και ψύξης οι προσομοιώσεις επαναλήφθηκαν για πάχη ΥΑΦ ίσα με 2, 4, 5, 6.5 και 7.5 cm.

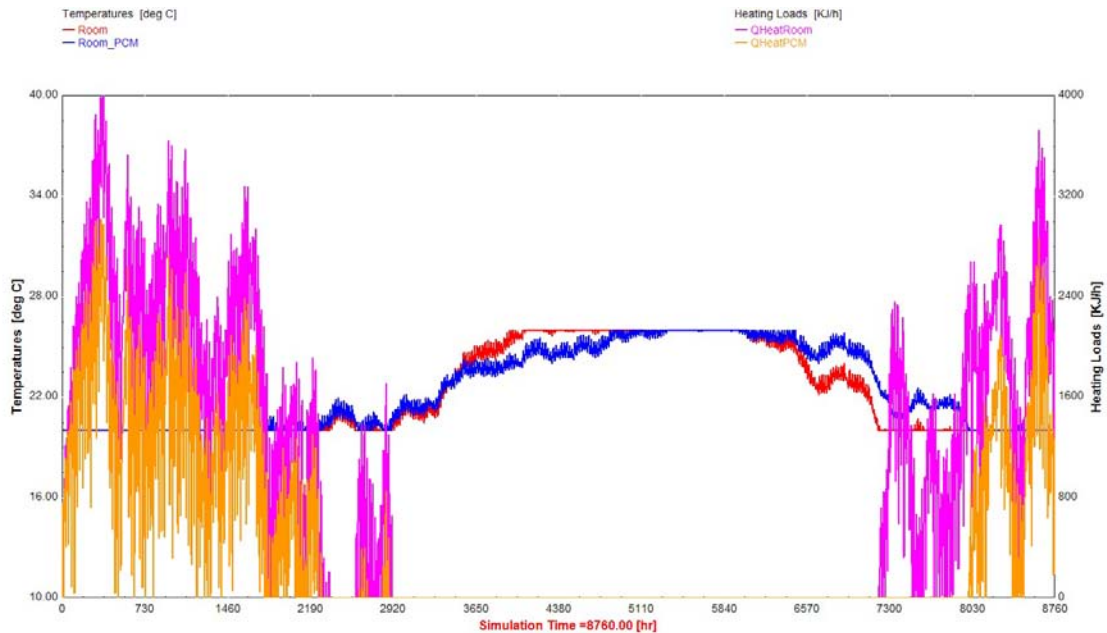


Διάγραμμα 4.9. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).

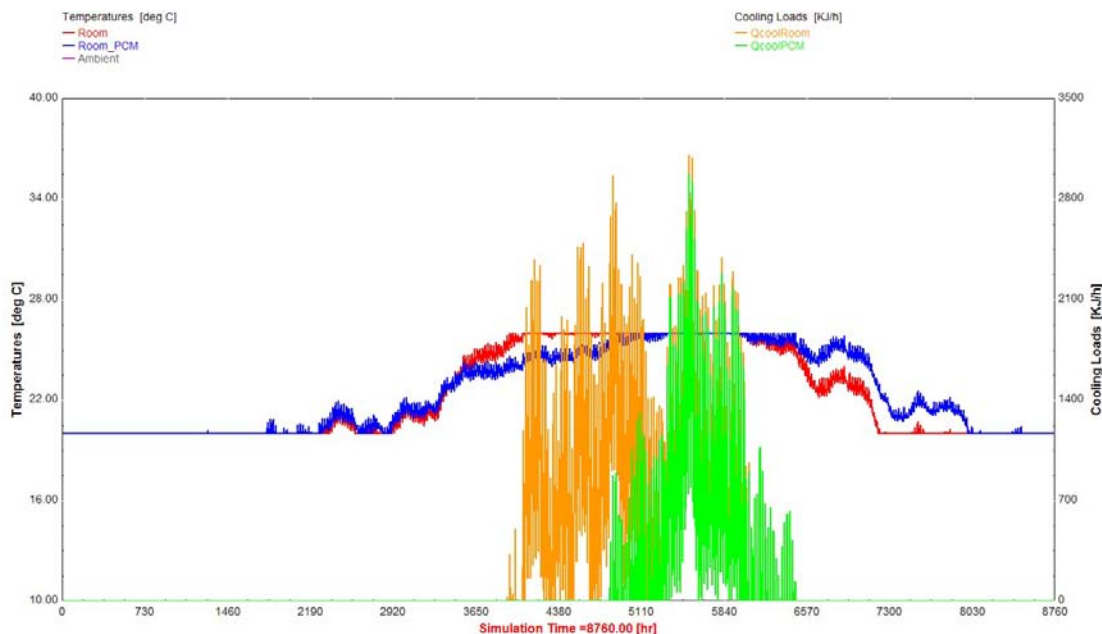
Στον πίνακα 4.3 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για όλα τα πάχη του ΥΑΦ ενώ στα διαγράμματα 4.10 και 4.11 απεικονίζονται τα απαιτούμενα φορτία θέρμανσης και ψύξης για πάχος εφαρμοζόμενου ΥΑΦ ίσο με 6.5 cm.

Πίνακας 4.3. Επίδραση πάχους εφαρμοζόμενου ΥΑΦ σε απαιτούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία.

Πάχος Εφαρμοζόμενου ΥΑΦ (cm)	Απαιτούμενα Φορτία		Διαστασιολόγηση Συστημάτων Θέρμανσης-Ψύξης	
	Μεταβολή Θερμικών φορτίων (% μείωση)	Μεταβολή Ψυκτικών φορτίων (% μείωση)	Σύστημα Θέρμανσης (% μείωση)	Σύστημα Ψύξης (% μείωση)
1.5	24.8	11.9	12.5	4
2	29.2	17.7	18	4.1
3	47.3	21.8	24.9	4.2
4	47.4	35.4	24.9	4.2
5	47.5	42.7	25.0	4.2
6.5	47.9	59.6	25.1	4.3
7.5	48.1	63.2	25.1	4.3

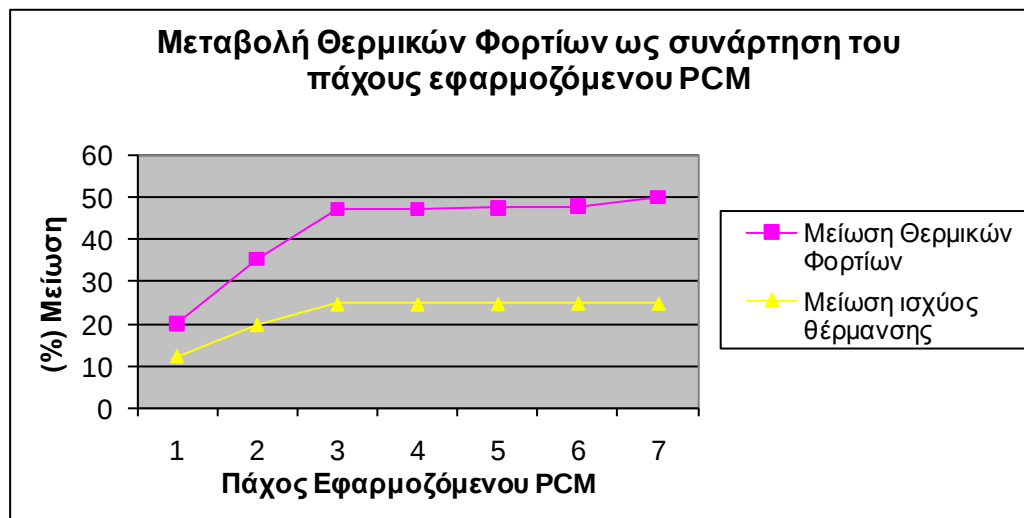


Διάγραμμα 4.10. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm)



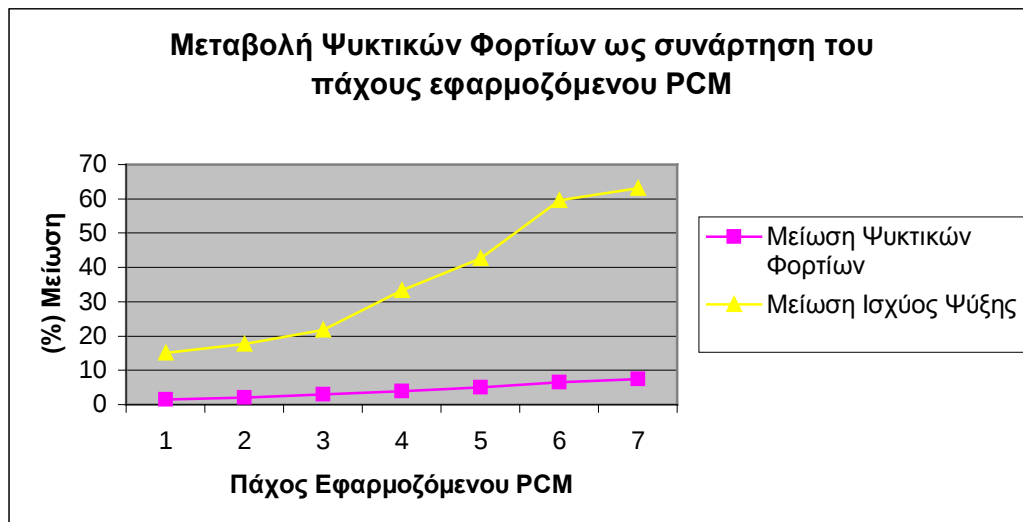
Διάγραμμα 4.11. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).

Σε ότι αφορά τα απαιτούμενα φορτία θέρμανσης, η προσθήκη επιπλέον μάζας ΥΑΦ δεν φαίνεται να βελτιώνει ουσιαστικά την απόδοση του κτηρίου. Πράγματι ο υπερδιπλασιασμός της ποσότητας του ΥΑΦ (από 3 σε 6.5 cm) μειώνει τα απαιτούμενα θερμικά φορτία κατά 0.6%. Το ίδιο ισχύει και για την διαστασιολόγηση του συστήματος θέρμανσης όπου φαίνεται ότι η μέγιστη μείωση που μπορούμε να έχουμε είναι της τάξης του 25%. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στο διάγραμμα 4.12.



Διάγραμμα 4.12. Μείωση απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης ως συνάρτηση του πάχους του εφαρμοζόμενου ΥΑΦ.

Σε ότι αφορά τα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία, η προσθήκη ΥΑΦ φαίνεται να λειτουργεί σαν «δεξαμενή» που εμποδίζει τη θερμοκρασία του κτηρίου να ξεπεράσει τους 26 °C όπως επισημάναμε και παραπάνω. Από τη στιγμή που το ΥΑΦ θα φορτιστεί, οι υψηλές θερμοκρασίες εμποδίζουν την αποφόρτίσή του με αποτέλεσμα τουλάχιστον ως προς τη διαστασιολόγηση του συστήματος ψύξης να έχουμε αμελητέα βελτίωση. Από τα διαγράμματα 4.11 και 4.13 θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι η προσθήκη ακόμη περισσότερης μάζας ΥΑΦ (για παράδειγμα 10 cm ή παραπάνω) θα μπορούσε ενδεχομένως να απορροφήσει το σύνολο των θερμικών φορτίων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού επιτυγχάνοντας τη διατήρηση της ζώνης με το ΥΑΦ σε συνθήκες θερμικής άνεσης. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν είναι δυνατό. Όπως θα δείξουμε στην επόμενη ενότητα, μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση θα έπρεπε να περιλαμβάνει τα εσωτερικά θερμικά φορτία των δύο ζωνών. Τα φορτία αυτά σε συνδυασμό με τα ηλιακά οδηγούν γρήγορα στη φόρτιση οποιασδήποτε μάζας ΥΑΦ. Αυτό σημαίνει ότι ο μόνος τρόπος για να επιτύχουμε μείωση στα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία είναι να επιτύχουμε την φόρτιση και αποφόρτιση του ΥΑΦ σε ημερήσια βάση.



Διάγραμμα 4.13. Μείωση απαιτούμενων φορτίων ψύξης ως συνάρτηση του πάχους του εφαρμοζόμενου ΥΑΦ.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να συνοψίσουμε ότι η προσθήκη επιπλέον θερμικής μάζας με την αύξηση του πάχους του στρώματος ΥΑΦ βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου. Η βελτίωση αυτή παρουσιάζει κάποιο μέγιστο ενώ η βέλτιστη μάζα ΥΑΦ μπορεί να είναι διαφορετική για θερμικά/ψυκτικά φορτία και ο υπολογισμός της επιβάλλει την ρεαλιστική προσομοίωση των εσωτερικών θερμικών φορτίων του κτηρίου.

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 4.2 η βελτίωση (ως ποσοστό %) της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτηρίου είναι πολύ ικανοποιητική για πάχη ΥΑΦ ίση με 3cm. Πέρα από το πάχος αυτό δεν αναμένεται καμία βελτίωση στα απαιτούμενα φορτία θέρμανσης ούτε στη διαστασιολόγηση του συστήματος ψύξης. Το μοντέλο μας προβλέπει σημαντική μείωση στα ψυκτικά φορτία με την προσθήκη υπερδιπλάσιας ποσότητας ΥΑΦ που πρέπει να επιβεβαιωθεί από την πιο ρεαλιστική προσομοίωση με εσωτερικά θερμικά φορτία.

4.2.2 Επίδραση εσωτερικών φορτίων

Η έως τώρα προσομοίωση δεν έλαβε υπόψη τα εσωτερικά θερμικά φορτία (κέρδη) στις δύο ζώνες. Τα φορτία αυτά κυμαίνονται με βάση τη χρήση της ζώνης αλλά και το χρόνο. Προκειμένου ωστόσο να έχουμε μια ρεαλιστική εκτίμηση της συμπεριφοράς του κτηρίου θα πρέπει να συμπεριληφθούν στην προσομοίωση.

Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά πρότυπα εσωτερικών φορτίων που περιγράφονται στον πίνακα 4.4. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να τονιστεί ότι τα πρότυπα αυτά είναι προσεγγιστικά και σκοπό έχουν να μας δώσουν μια εκτίμηση για τη συμπεριφορά των ζωνών στη μεταβολή των φορτίων αυτών.

Πίνακας 4.4. Πρότυπα εσωτερικών φορτίων

Τύπος Φορτίου	Αναλυτικά φορτία	Χρόνος/ημέρα
Οικιακός (Ελαφρό φορτίο)	Άτομα: 2 (ξεκούραση)	24 ώρες
	Φωτισμός (20% convective heat-5W/m ²)	18:00 – 22:00
	H/Y : 1	20:00 – 22:00
	Κουζίνα (130W)	12:00 – 13:00
	Τηλεόραση (20W)	20:00 – 23:00
Γραφείου	Άτομα: 3 (ελαφρά εργασία)	09:00 – 20:00
	Φωτισμός (20% convective heat-10W/m ²)	18:00 – 20:00
	H/Y : 3	09:00 – 20:00
Επαγγελματικό (Βαρύ φορτίο)	Άτομα: 5 (μέσος όρος)	09:00 – 21:00
	Φωτισμός (20% convective heat-13W/m ²)	18:00 – 21:00
	H/Y: 3	09:00 – 21:00
	Κουζίνα (250W)	11:00 – 14:00
	Ψυγείο (20W)	24 ώρες
Γυμναστήριο (Πολύ βαρύ φορτίο)	Άτομα: 6 (άσκηση)	09:00 – 22:00
	Φωτισμός (20% convective heat-17W/m ²)	18:00 – 22:00
	Άλλα φορτία (20 W convective-30 W radiative)	24 ώρες

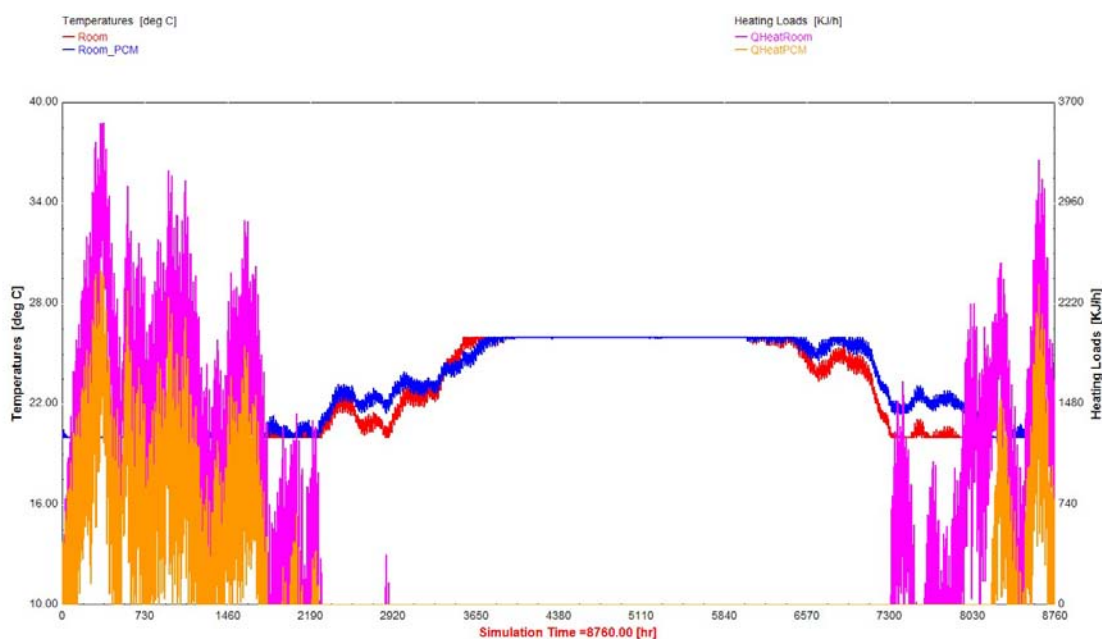
Η προσομοίωση της απόκρισης των δύο ζωνών με την προσθήκη των εσωτερικών φορτίων που περιγράφονται στον παραπάνω πίνακα έγινε με τη βοήθεια του μοντέλου μας για πάχη ΥΑΦ ίσα με 3 και 6.5 cm και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους πίνακες 4.5 και 4.6. Τα διαγράμματα 4.14-4.15 και 4.16 – 4.17 απεικονίζουν τα απαιτούμενα ετήσια θερμικά και ψυκτικά φορτία για τις δύο ζώνες για οικιακά εσωτερικά φορτία για πάχη εφαρμοζόμενου ΥΑΦ ίσα με 3 και 6.5 cm αντίστοιχα.

Πίνακας 4.5. Μεταβολή (% της αρχικής) απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης για διάφορα εσωτερικά φορτία (θετικό πρόσημο υποδηλώνει μείωση)

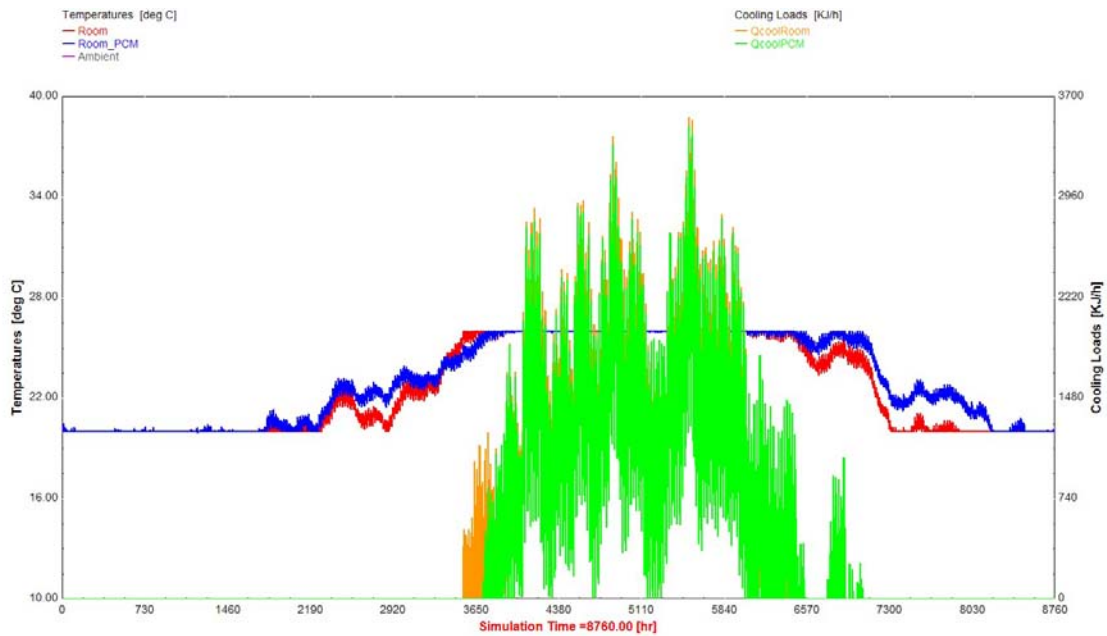
Πάχος ΥΑΦ	Οικιακά Φορτία	Γραφείου	Επαγγελματικό	Γυμναστήριο
3.0 cm	57.0 (31.4)	62.9 (31.9)	68.6 (35.1)	80.1 (40.3)
6.5 cm	61.2 (28.5)	67.3(32.5)	74.8 (36.3)	86.2 (42.1)

Πίνακας 4.6. Μεταβολή (% της αρχικής) απαιτούμενων φορτίων ψύξης για διάφορα εσωτερικά φορτία (θετικό πρόσημο υποδηλώνει μείωση)

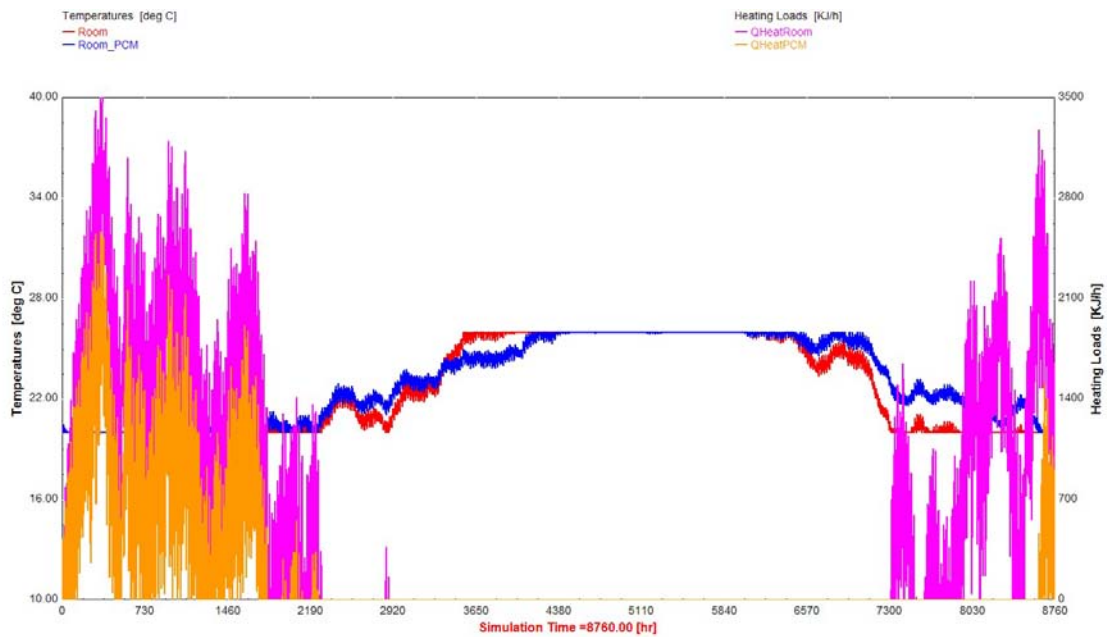
Πάχος ΥΑΦ	Οικιακά Φορτία	Γραφείου	Επαγγελματικό	Γυμναστήριο
3.0 cm	6.6 (1.6)	0.7 (0.3)	0.4 (≈ 0)	0.1 (≈ 0)
6.5 cm	14.5 (2.9)	1.4 (0.8)	0.6 (≈ 0)	-0.2 (≈ 0)



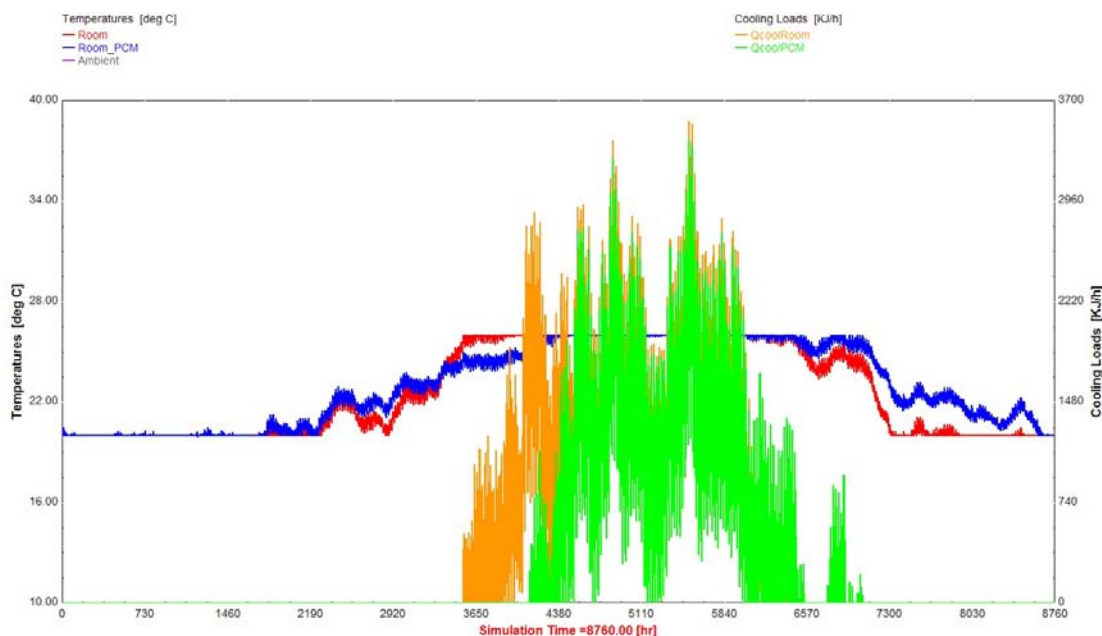
Διάγραμμα 4.14. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 3 cm)



Διάγραμμα 4.15. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).

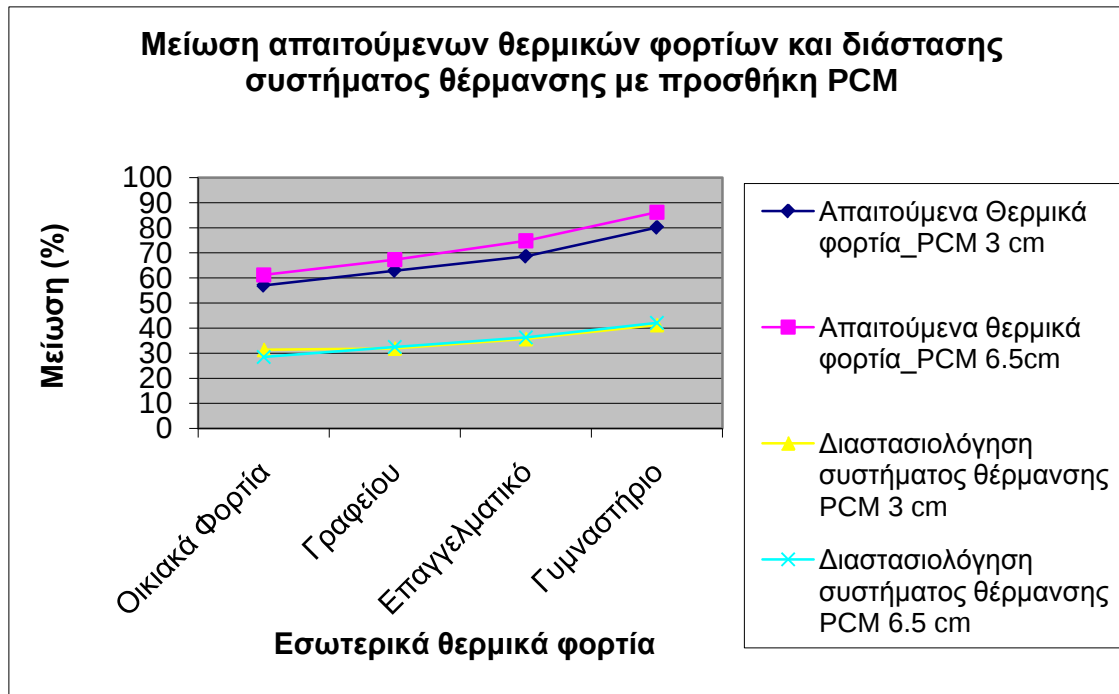


Διάγραμμα 4.16. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα θερμικά φορτία. (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm)



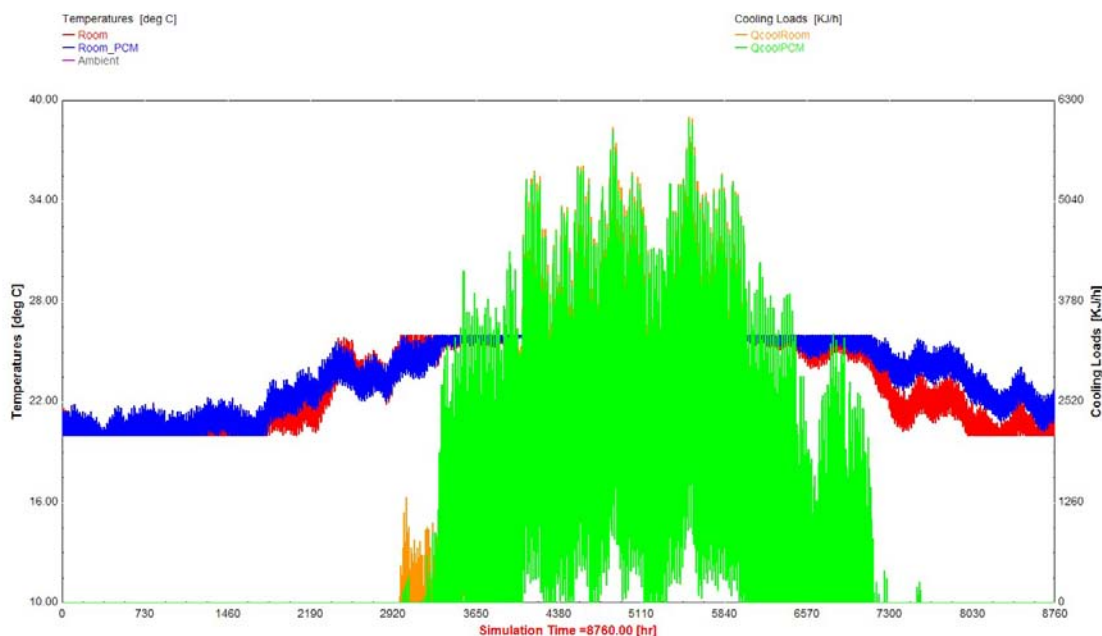
Διάγραμμα 4.17. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).

Από την προσομοίωση φαίνεται ότι η ζώνη με ΥΑΦ αντιδρά αισθητά καλύτερα κατά τη διάρκεια του χειμώνα και του φθινοπώρου. Η απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης μειώνεται σε μεγάλο ποσοστό και σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζουν τα εσωτερικά θερμικά φορτία. Η προσθήκη επιπλέον μάζας ΥΑΦ δεν βελτιώνει σημαντικά το ενεργειακό όφελος σε ότι αφορά τη θέρμανση (διάγραμμα 4.18).



Διάγραμμα 4.18. Μείωση (%) των απαιτούμενων φορτίων θέρμανσης και της διάστασης του συστήματος θέρμανσης ως συνάρτηση των εσωτερικών θερμικών φορτίων και του πάχους εφαρμοζόμενου ΥΑΦ

Αντίθετα η προσθήκη των επιπλέον εσωτερικών θερμικών φορτίων φαίνεται να δρα καταλυτικά στο όποιο κέρδος αναμενόταν από την προσθήκη θερμικής μάζας στα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία του κτηρίου. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκύψει συγκρίνοντας τα διαγράμματα 4.19 και 4.17, όπου απεικονίζεται η απαιτούμενη ενέργεια ψύξης για εσωτερικά φορτία γραφείου και οικιακά αντίστοιχα. Φαίνεται καθαρά ότι η αντιμετώπιση των ηλιακών κερδών και των εσωτερικών φορτίων δεν μπορεί να γίνει με απλή προσθήκη θερμικής μάζας (μεγάλο πάχος ΥΑΦ) αφού η φόρτιση του ΥΑΦ είναι ιδιαίτερα γρήγορη με αποτέλεσμα να έχουμε σχεδόν μηδενικά οφέλη τόσο στην συνολική ενέργεια όσο και για τη διαστασιολόγηση του συστήματος ψύξης. Επιπλέον η προσθήκη ΥΑΦ δημιουργεί πρόσθετες ανάγκες ψύξης κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου μην επιτρέποντας τη θερμοκρασία της ζώνης να κατέβει στη ζώνη θερμικής άνεσης. Έτσι χάνεται το όποιο ενεργειακό κέρδος επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια των πρώτων μηνών του καλοκαιριού.



Διάγραμμα 4.19. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).

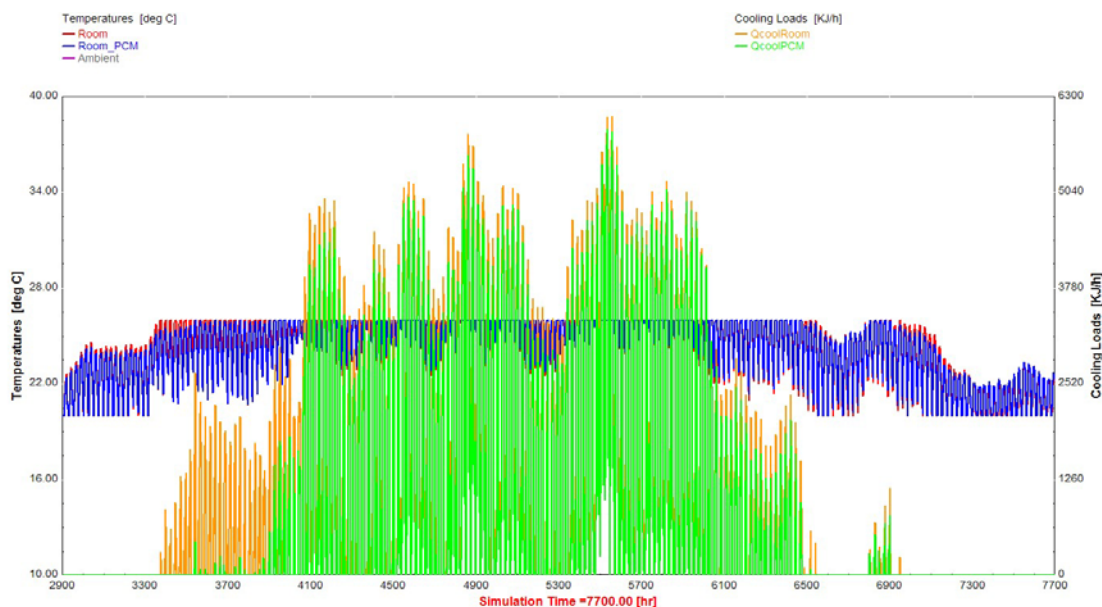
4.2.3 Επίδραση νυχτερινού αερισμού

Σύμφωνα με την μέθοδο του “free cooling”, για να βελτιώσουμε την επίδοση του ΥΑΦ σε ότι αφορά την ψύξη, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο ψυχρός νυχτερινός αέρας. Η μέθοδος αυτή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κλίμα της περιοχής όπου εφαρμόζεται το ΥΑΦ. Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η διερεύνηση της καταλληλότητας της μεθόδου νυχτερινού αερισμού στις συνθήκες της Ελλάδας. Στις προσομοιώσεις μας θα χρησιμοποιήσουμε νυχτερινό αερισμό με ρυθμό 5 ac/h κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού οπότε και απαιτείται η ψύξη του κτηρίου. Αντίστοιχοι είναι οι ρυθμοί αερισμού σε άλλες μελέτες ([Markopoulos 2008] 4 ac/h, [Arkar 2007] 4ac/h-8ac/h). Επίσης θα χρησιμοποιήσουμε τα εσωτερικά θερμικά φορτία που ορίσαμε στον πίνακα 4.3.

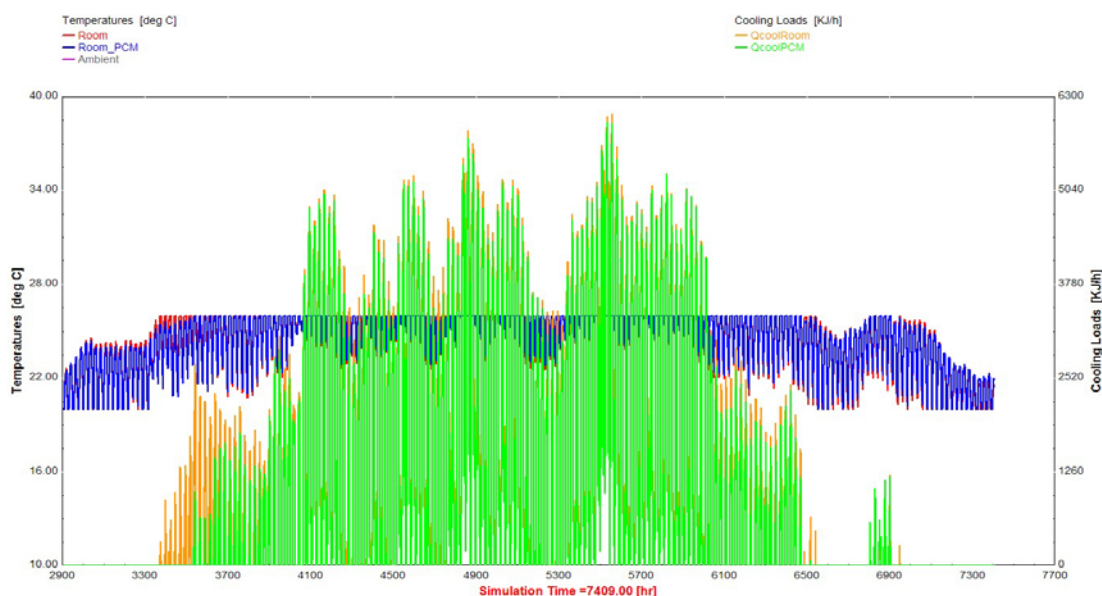
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών συνοψίζονται στον πίνακα 4.7. Ενδεικτικά παραθέτουμε στα διαγράμματα 4.20 και 4.21 τα απαιτούμενα ψυκτικά φορτία για εσωτερικά φορτία γραφείου.

Πίνακας 4.7. Μεταβολή (% της αρχικής) απαιτούμενων φορτίων ψύξης για διάφορα εσωτερικά φορτία (θετικό πρόσημο υποδηλώνει μείωση), με εφαρμογή νυχτερινού αερισμού

Πάχος ΥΑΦ	Οικιακά Φορτία	Γραφείου	Επαγγελματικό	Γυμναστήριο
3.0 cm	19.8 (4.9)	15.5 (2.8)	9.5 (2.7)	8.1 (2.6)
6.5 cm	24.9 (5.2)	19.6 (3.1)	11.4 (3)	8.9 (2.9)



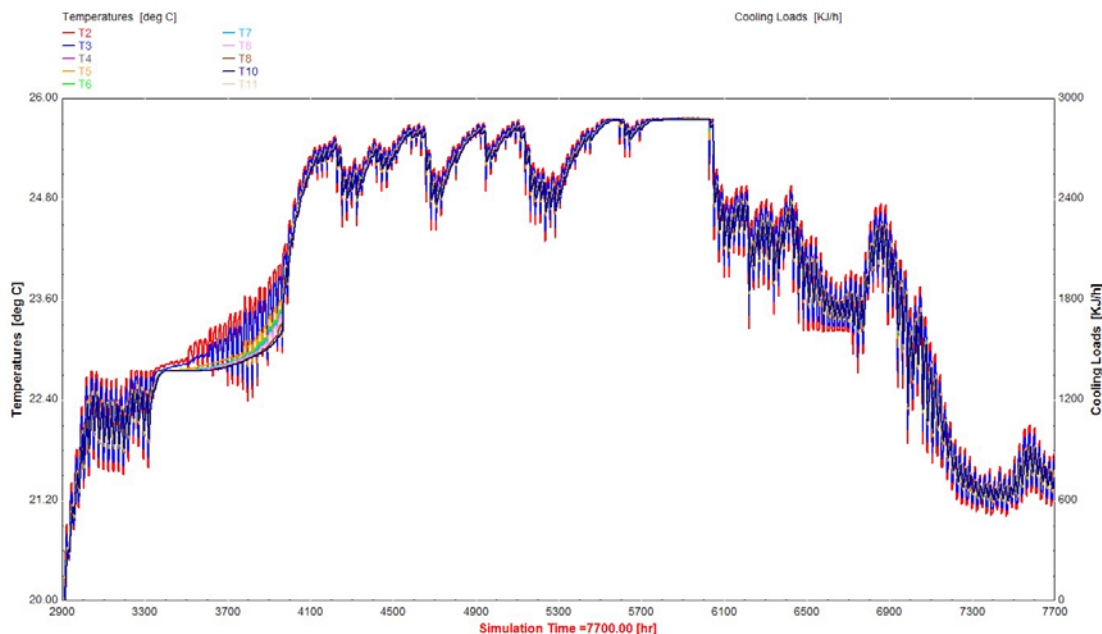
Διάγραμμα 4.20. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).



Διάγραμμα 4.21. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).

Είναι φανερό από την σύγκριση των διαγραμμάτων 4.19, 4.20 και 4.21, και των πινάκων 4.5 και 4.6 ότι ο νυχτερινός αερισμός βοηθά τη λειτουργία του ΥΑΦ οδηγώντας σε μείωση της απαιτούμενης ενέργειας ψύξης αλλά και στη μείωση της διαστασιολόγησης του συστήματος ψύξης. Η μείωση αυτή εξαρτάται από τα εσωτερικά φορτία και κυμαίνεται από 9 έως 25 % περίπου.

Επίσης παρατηρούμε ότι παρά τις πολύ μικρές διαφορές, σε καμιά περίπτωση δεν δικαιολογείται ο υπερδιπλασιασμός του εφαρμοζόμενου στρώματος ΥΑΦ από τα 3.0 στα 6.5 cm. Η διαφορά στην επίδοση των δύο στρωμάτων προέρχεται κυρίως κατά τους πρώτους μήνες του καλοκαιριού κατά τη φόρτιση του ΥΑΦ. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο στρωμάτων. Η βελτίωση που μπορεί να επιφέρει ο νυχτερινός αερισμός φαίνεται να εξαρτάται από τα εσωτερικά θερμικά φορτία, δεν εξαρτάται ωστόσο από το πάχος του ΥΑΦ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια ενός ημερήσιου κύκλου υπάρχει συγκεκριμένο όριο στην ποσότητα του ΥΑΦ που μπορεί να φορτιστεί και να αποφορτιστεί. Αυτό μπορεί να φανεί στο διάγραμμα 4.22 όπου απεικονίζεται η μεταβολή στη θερμοκρασία στο εσωτερικό του τοίχου με ΥΑΦ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (με νυχτερινό αερισμό). Φαίνεται καθαρά ότι μετά την αρχική φόρτιση του ΥΑΦ ο νυχτερινός αερισμός μπορεί να επηρεάσει μόνο κάποια από τα επιφανειακά στρώματα του τοίχου και όχι το σύνολό του.



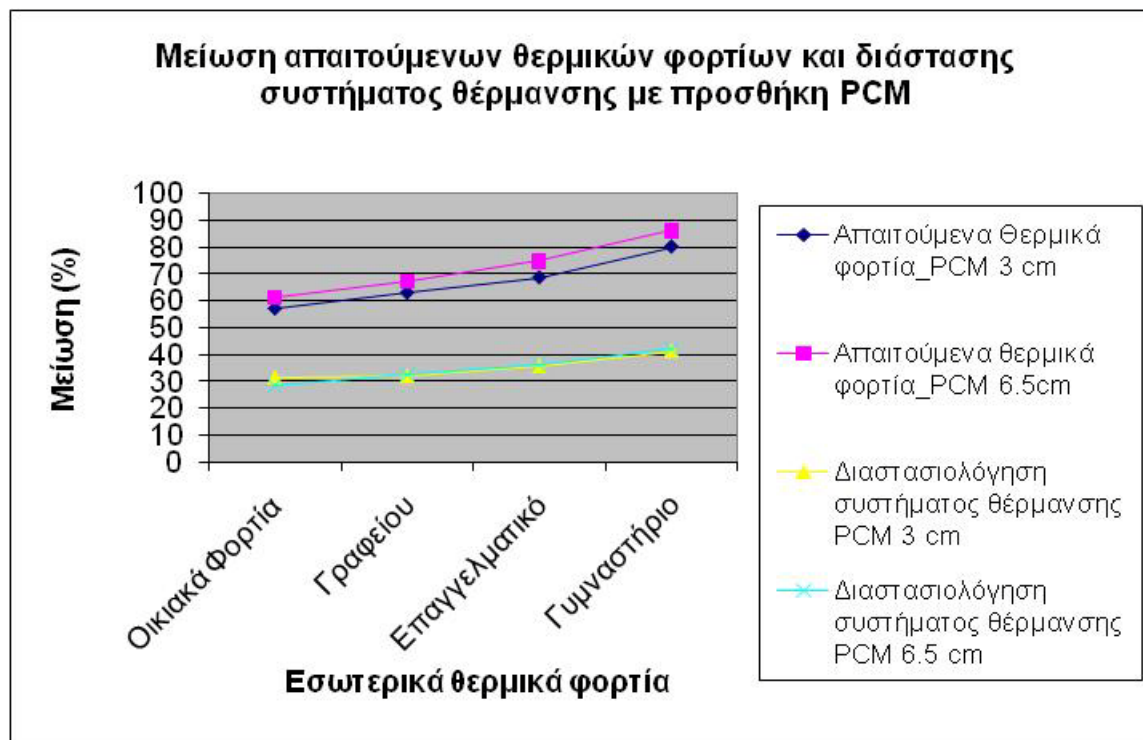
Διάγραμμα 4.22. Μεταβολή θερμοκρασίας του τοίχου με ΥΑΦ με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 6.5 cm).

Πράγματι, ακολουθώντας το σκεπτικό που αναφέρεται από τους [Mehling & Cabeza 2008], ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (heat transfer coefficient) μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του πάχους του στρώματος ΥΑΦ. Ο συντελεστής αυτός προκύπτει ως το πηλίκο της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού (0.15 W/mK εδώ), με το πάχος του στρώματος. Για πάχος ΥΑΦ ίσο με 3 cm γίνεται $0.15/0.03=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ και είναι ίσος με τον αντίστοιχο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του υλικού και του αέρα. Αυτό σημαίνει ότι το ΥΑΦ δεν αναμένεται να προσθέσει σημαντική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας. Αντίθετα για μεγαλύτερα πάχη ΥΑΦ ο συντελεστής μειώνεται (για

πάχος ίσο με 6.5 cm γίνεται 2.3 και το ΥΑΦ προσθέτει σημαντική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας μέσα σε αυτό). Αποτέλεσμα της αυξημένης αυτής αντίστασης είναι η όλο και μικρότερη χρησιμοποίηση της ποσότητας ΥΑΦ που προστίθεται στο κτήριο για την απορρόφηση θερμικών φορτίων.

Το όριο αυτό εξαρτάται λοιπόν, με βάση τα παραπάνω, από την αγωγιμότητα του υλικού και από τις καιρικές συνθήκες για την περίπτωση νυχτερινού αερισμού. Εξαρτάται επίσης από τον τρόπο που έχει επιλεγεί για την αποφόρτιση του ΥΑΦ (πχ νυχτερινός αερισμός, σωλήνες ψυχρού νερού κτλ). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη ψευδο-οροφής με ΥΑΦ για την απορρόφηση θερμικών φορτίων και άρα την ψύξη [Koschenz & Lehmann 2004]. Προκειμένου να αυξηθεί η χρησιμοποιούμενη ποσότητα ΥΑΦ (σε 5cm), προσπάθειες καταβλήθηκαν για την σημαντική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας με προσθήκη μεταλλικών ελασμάτων ενώ για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα προστέθηκαν σωλήνες ψυχρού νερού για την αποφόρτιση του ΥΑΦ. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή σύμφωνα με την ανωτέρω μελέτη η απορρόφηση του συνόλου των θερμικών φορτίων.

Συνοψίζοντας, ο νυχτερινός αερισμός στις συνθήκες της Ελλάδας μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου σε ότι αφορά την ψύξη σε συνδυασμό με την προσθήκη ΥΑΦ. Η ενεργειακή αυτή βελτίωση προσεγγίζει το 20-25% για οικιακούς χρήστες. Παράλληλα μας επιτρέπει να μειώσουμε τις απαιτούμενες διαστάσεις του συστήματος ψύξης κατά 5% περίπου. Για σημαντικά εσωτερικά θερμικά φορτία ωστόσο, το όφελος αυτό περιορίζεται δραστικά αγγίζοντας ωςτόσο το 10% (διάγραμμα 4.23).

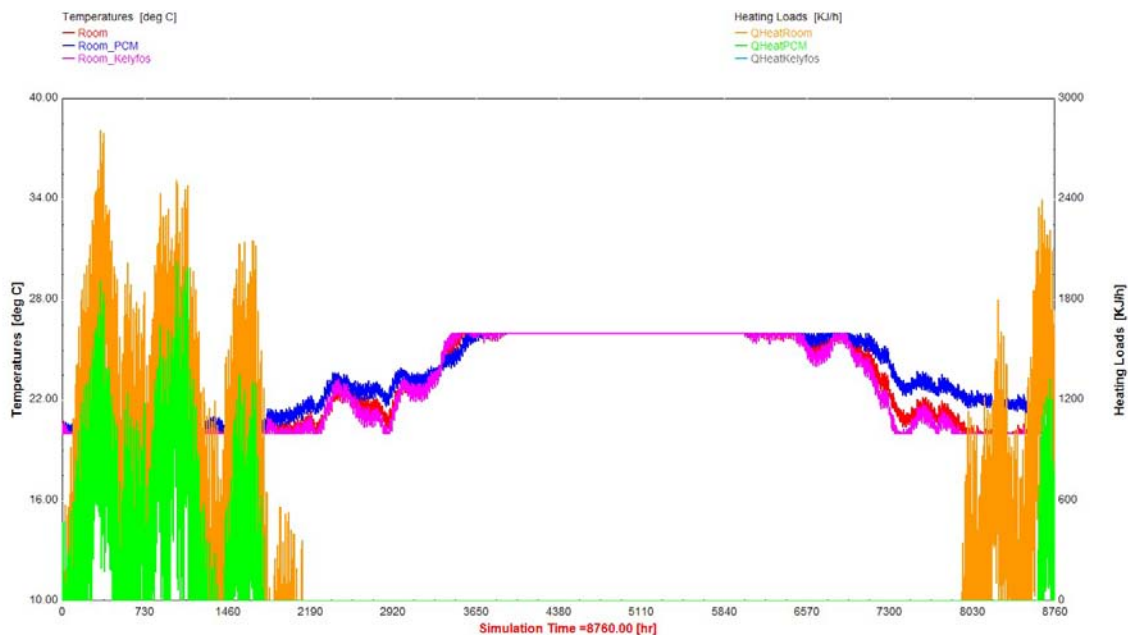


Διάγραμμα 4.23. Μείωση (%) των απαιτούμενων φορτίων ψύξης και της διάστασης του συστήματος ψύξης ως συνάρτηση των εσωτερικών θερμικών φορτίων και του πάχους εφαρμοζόμενου ΥΑΦ

Η χρήση νυχτερινού αερισμού **δεν** ευνοείται ιδιαίτερα από τις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας. Πράγματι η χρήση του νυχτερινού αερισμού έχει σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση 10-15% περίπου της ενέργειας ψύξης για οικιακούς χρήστες επιπλέον της εξοικονόμησης που επιτυγχάνεται απλά με την προσθήκη ΥΑΦ. Αντίθετα μελέτες σε άλλες κλιματικές ζώνες έχουν δείξει πολύ μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν πέφτει αρκετά ώστε να επιτρέψει την πλήρη αποφόρτιση του ΥΑΦ. Τέλος, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι πιο «έξυπνες» μορφές αερισμού που θα λαμβάνουν υπόψη την εξωτερική θερμοκρασία αέρα πιθανότατα θα είχαν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα.

4.2.4 Επίδραση τοπικών κλιματικών συνθηκών

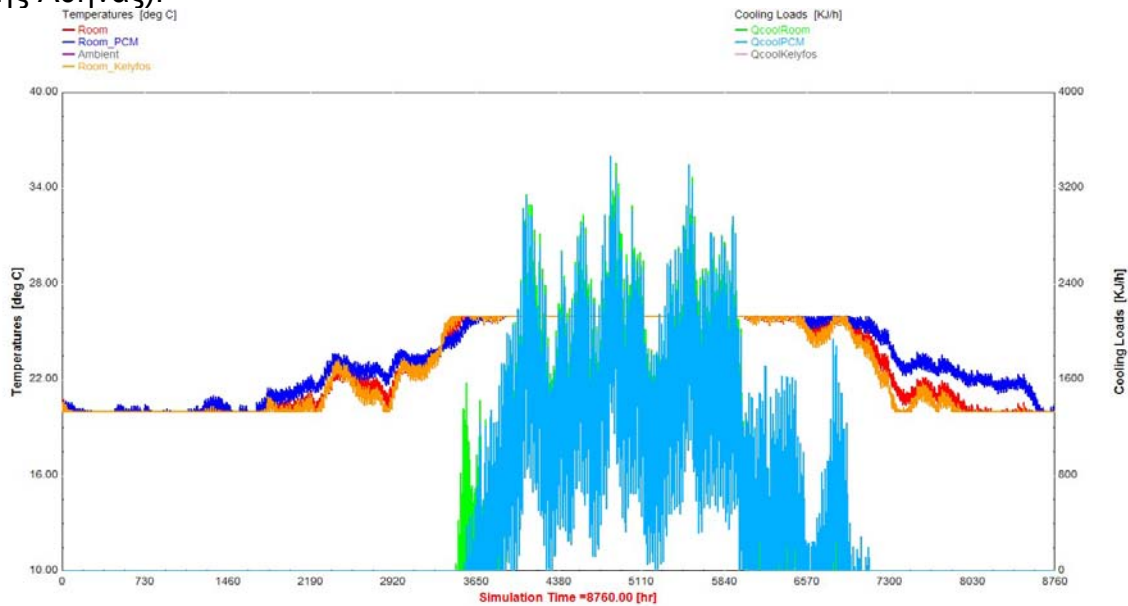
Στο σημείο αυτό θα ήταν ενδιαφέρον να εξετάσουμε κατά πόσο οι επιμέρους τοπικές κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν την απόδοση του ΥΑΦ. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως αντιπροσωπευτικό ένα μόνο μοντέλο κλίματος για την Ελλάδα ή μήπως παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές μεταξύ τοπικών κλιματικών μοντέλων; Για να απαντηθεί το ερώτημα αυτό επαναλήφθηκαν προσομοιώσεις των δύο κτηρίων που ορίστηκαν στον πίνακα 4.1 με οικιακά εσωτερικά θερμικά φορτία όπως αυτά ορίστηκαν στον πίνακα 4.4 και πάχος εφαρμοζόμενου ΥΑΦ τα 3 cm. Αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκαν κλιματικές συνθήκες της Σούδας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα 4.24-4.26.



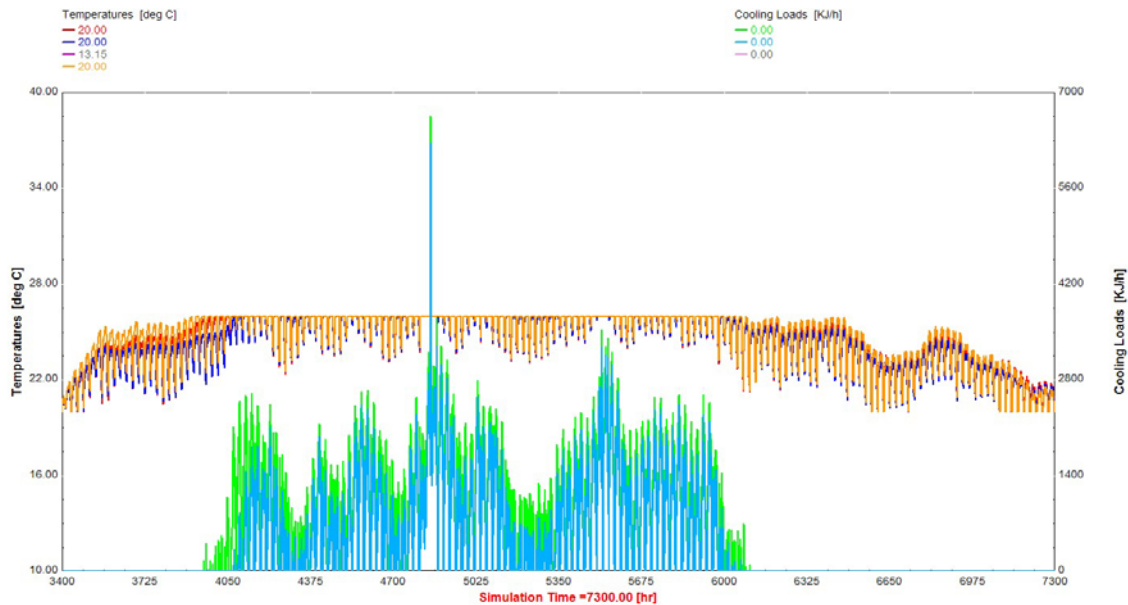
Διάγραμμα 4.24. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία. Κλιματικές συνθήκες Σούδας - απαιτούμενα θερμικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).

Με βάση τις προσομοιώσεις διαπιστώθηκε ότι σε ό,τι αφορά τη θέρμανση, τα απαιτούμενα φορτία είναι κατά απόλυτη τιμή αισθητά μικρότερα στη

Σούδα σε σχέση με την Αθήνα κάτι που ήταν αναμενόμενο. Η απόδοση του ΥΑΦ παρουσιάζεται βελτιωμένη και η ενέργεια που μπορεί να εξοικονομηθεί φτάνει στο 60.5% (σε αντίθεση με το 57% που παρατηρείται στις κλιματικές συνθήκες της Αθήνας).



Διάγραμμα 4.25. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία. Κλιματικές συνθήκες Σούδας - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).



Διάγραμμα 4.26. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά εσωτερικά φορτία και χρήση νυχτερινού αερισμού. Κλιματικές συνθήκες Σούδας - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).

Σε ότι αφορά την ψύξη, οι απαιτήσεις σε ενέργεια είναι παραπλήσιες στις δύο κλιματικές συνθήκες με μικρή αύξηση να παρατηρείται στην περιοχή της Σούδας. Το ΥΑΦ συμπεριφέρεται οριακά χειρότερα στη Σούδα (εξοικονόμηση 4% της ενέργειας ψύξης) σε σχέση με την Αθήνα (6.6%) όταν δεν χρησιμοποιείται νυχτερινός αερισμός. Αντίθετα παρατηρείται σημαντική βελτίωση και αναστροφή της παραπάνω κατάστασης με τη χρήση νυχτερινού αερισμού. Η εξοικονόμηση ενέργειας ψύξης φτάνει στην περίπτωση αυτή το 26% στη Σούδα σε αντίθεση με το 19.8% για την Αθήνα, δείχνοντας το καλύτερο δυναμικό του κλίματος της Σούδας για την αποφόρτιση του ΥΑΦ.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η ακριβής εκτίμηση της δυνατότητας εξοικονόμησης ενέργειας με την εφαρμογή ΥΑΦ απαιτεί την χρήση αντιπροσωπευτικού μοντέλου κλιματικών συνθηκών. Σε ότι αφορά την Ελλάδα η χρήση των συνθηκών της Αθήνας μπορεί να δώσει μια εκτίμηση η οποία ωστόσο αναμένεται να αποκλίνει ιδίως σε περιοχές που εντάσσονται σε διαφορετικές ζώνες με βάση την κλίμακα του ΚΑΠΕ (http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/apodotikotita/KAPE_Kelfos%20polytile_website.pdf).

4.2.5 Επίδραση θερμοκρασίας αλλαγής φάσης

Στην εργασία αυτή θεωρήσαμε ότι το εφαρμοζόμενο ΥΑΦ είναι εμπορικά διαθέσιμο προϊόν. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των ΥΑΦ ωστόσο εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες της κάθε περιοχής.

Στην ενότητα αυτή μελετάμε εάν η επιλογή ενός διαφορετικού εύρους θερμοκρασιών αλλαγής φάσης θα επηρέαζε την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου.

Για τον σκοπό αυτό προσομοιώθηκε η συμπεριφορά των ζωνών μεταβάλλοντας τη ζώνη αλλαγής φάσης του ΥΑΦ για εσωτερικά θερμικά φορτία γραφείου και πάχος εφαρμοζόμενου ΥΑΦ ίσο με 3 cm.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8. Μεταβολή (% επί της αρχικής) απαιτούμενων φορτίων ψύξης και θέρμανσης για εσωτερικά φορτία γραφείου για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλαγής φάσης (γίνεται εφαρμογή νυχτερινού αερισμού). Πάχος ΥΑΦ 3 cm.

	20-23	21-24	22-25	23-26
Θέρμανση	52.3	65.7	69.2	62.9
Ψύξη (χωρίς νυχτερινό αερισμό)	≈0	-6.1	-3.4	0.7
Ψύξη (με νυχτερινό αερισμό)	10.3	10.1	15.1	15.5
Σύνολο (μ.ο) χωρίς νυχτερινό αερισμό	26.1	29.8	32.9	31.8
Σύνολο (μ.ο) με νυχτερινό αερισμό	31.3	37.9	42.15	39.2

Σε ότι αφορά τη θέρμανση, βλέπουμε ότι βέλτιστη εξοικονόμηση επιτυγχάνεται όταν το εύρος θερμοκρασίας αλλαγής φάσης βρίσκεται μεταξύ 22 και 25 °C. Το αποτέλεσμα αυτό ταυτίζεται με το αποτέλεσμα άλλων μελετών [Heim and Clarke, 2004], που αναφέρουν ότι σε ότι αφορά τη θέρμανση, η βέλτιστη θερμοκρασία τήξης του ΥΑΦ είναι 2°C πάνω από την θερμοκρασία ενεργοποίησης του συστήματος θέρμανσης. Σε ότι αφορά την ψύξη αντίθετα, η χρήση υψηλότερων θερμοκρασιών αλλαγής φάσης επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα, κάτι που πιθανόν οφείλεται στην ικανότητα του ΥΑΦ να εκμεταλλεύεται τις θερμοκρασιακές μεταβολές για να αποφορτιστεί. Εάν σαν βάση αξιολόγησης των ΥΑΦ θεωρήσουμε το συνολικό όφελος σε ενέργεια που προκύπτει από την εφαρμογή τους, μπορούμε με βάση τον πίνακα 4.7 να καταλήξουμε ότι συνολικά καλύτερη απόδοση για το κλίμα της Ελλάδας θα είχε ένα ΥΑΦ με θερμοκρασία τήξης στο εύρος 22-25°C ενσωματωμένο στη δομή του κτηρίου, σε συνδυασμό πάντα με νυχτερινό αερισμό κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας για τη θέρμανση και ψύξη φτάνει στο 42.1% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

4.3 Προσομοίωση παλαιότερων κατασκευών

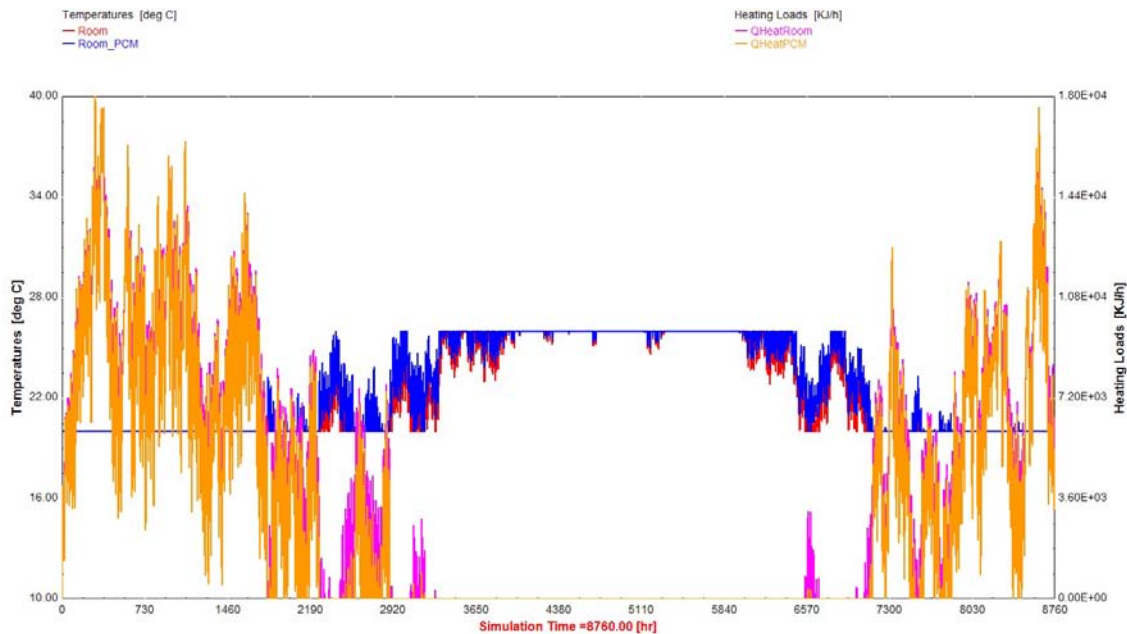
Η συντριπτική πλειονότητα κατασκευών στην Ελλάδα αφορά κτήρια κατασκευασμένα με παλαιότερους όρους δόμησης. Τα κτήρια αυτά συχνά έχουν ελλιπή ή και καθόλου μόνωση και συνεπώς είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα. Στη ενότητα αυτή εξετάζουμε τη δυνατότητα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτηρίων αυτών με την προσθήκη ΥΑΦ.

Τα κατασκευαστικά στοιχεία των δύο ζωνών παρουσιάζονται στον πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9. Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ζωνών (κτήρια χωρίς μόνωση)

Ζώνη 1 (Συμβατικό Κτήριο)		Ζώνη 2 (Κτήριο με ΥΑΦ)	
Τοίχοι	Σοβάς εξωτερικός(1.5cm)	Τοίχοι	Σοβάς εξωτερικός(1.5cm)
	Τούβλο (24 cm)		Τούβλο (24 cm)
	Σοβάς εσωτερικός(1.5cm)		Σοβάς Maxit Clima (3 cm)
Οροφή	Μπετόν (24 cm)	Οροφή	Μπετόν (24 cm)
	Σοβάς 1 cm		Σοβάς Maxit Clima (3 cm)
Δάπεδο	Πλακάκι 5mm	Δάπεδο	Πλακάκι 5mm
	Υλικό επικόλλησης 5 mm		Υλικό επικόλλησης 5 mm
	Μπετόν 24 cm		Μπετόν 24 cm
	Μόνωση 10 cm		Μόνωση 10 cm
Θέρμανση-Ψύξη	ΟΝ	Θέρμανση-Ψύξη	ΟΝ

Η προσομοίωση των δύο ζωνών δείχνει ότι η απουσία μόνωσης επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του ΥΑΦ. Σε αντίθεση με την υψηλή εξοικονόμηση ενέργειας θέρμανσης που ήταν δυνατή στην περίπτωση του πλήρως μονωμένου κτηρίου για οικιακά κέρδη (πάνω από 55%) και για το ίδιο πάχος εφαρμοζόμενου ΥΑΦ (3cm), η απαιτούμενη ενέργεια για τη θέρμανση περιορίζεται κατά μόλις 8.7% (διάγραμμα 4.27). Η αύξηση του πάχους του προστιθέμενου ΥΑΦ σε 6.5cm δεν βελτιώνει την κατάσταση αυτή σημαντικά αφού η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται έτσι αγγίζει μόλις το 14.6%. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις αυξημένες απώλειες που δεν επιτρέπουν στο ΥΑΦ να διοχετεύσει ξανά τη θερμότητα που απορροφά στον χώρο αλλά αντίθετα τη χάνει μέσω των εξωτερικών τοίχων. Καταδεικνύεται έτσι ο πολύ σημαντικός ρόλος της μόνωσης των κτηρίων. Είναι ξεκάθαρο ότι η προσθήκη εσωτερικού στρώματος ΥΑΦ σε ένα κτήριο χωρίς μόνωση δεν αποτελεί ικανοποιητική λύση παρά την βελτίωση που παρουσιάζεται.



Διάγραμμα 4.27. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα θερμικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).

Η βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση της ζώνης με ΥΑΦ θα μπορούσε να επιτευχθεί με την προσθήκη ενός στρώματος 2cm μόνωσης κάτω από το στρώμα του ΥΑΦ. Η διαφοροποίηση αυτή είναι εφικτή σε περίπτωση ανακαίνισης του κτηρίου, ενώ το συνολικό πάχος που προστίθεται δεν υπερβαίνει τα 5cm (2cm μόνωση και 3cm ΥΑΦ). Η εκ νέου προσομοίωση δείχνει σημαντική βελτίωση στην απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης (η οποία περιορίζεται κατά 73%), αλλά και στην ενέργεια ψύξης που περιορίζεται κατά 43.1% με τη χρήση νυχτερινού αερισμού (28.2% χωρίς νυχτερινό αερισμό). Η συνολική απαιτούμενη ενέργεια μειώνεται με την παρέμβαση αυτή κατά 58%. Η προσθήκη εσωτερικής

μόνωσης αποτελεί επομένως καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχία της επέμβασης στο κτήριο. Η βέλτιστη αναλογία μόνωσης και ΥΑΦ θα πρέπει να διερευνηθεί με παραμετρικές προσομοιώσεις.

Η βελτίωση που επιτυγχάνεται στη συνολική απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης και ψύξης από την προσθήκη στρωμάτων μόνωσης και ΥΑΦ στο εσωτερικό παλαιών κτηρίων είναι σημαντική όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ωστόσο προκείμενου να εκτιμήσουμε το κατά πόσο θα μπορούσε να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση σε περίπτωση ανακαινίσεων καλό θα ήταν να τη συγκρίνουμε με μία ήδη υπάρχουσα μέθοδο. Μια τέτοια μέθοδος που είναι και εμπορικά διαθέσιμη είναι η προσθήκη εξωτερικής μόνωσης (π.χ. σύστημα Kelyfos). Προσομοιώθηκε λοιπόν η ενεργειακή συμπεριφορά τριών κτηρίων (ζωνών) αντίστοιχων αυτών που περιγράφονται στον πίνακα 4.9 με τις παρακάτω διαφορές:

(α) ζώνη 1: Αφέθηκε ως έχει

(β) Στη ζώνη 2: Προστέθηκε εξωτερική μόνωση (αντίστοιχη του συστήματος Kelyfos [www.kelyfos.eu]) δηλαδή:

(1) Μονωτικό πλακάκι οροφής (πάχους 5cm με υλικό επικόλλησης 2 cm)

(2) Πλάκες εξιλασμένης πολυστερίνης πάχους 5 cm (με υλικό επικόλλησης 1.5 cm) και εξωτερικό υλικό επιχρίσματος 1.5 cm που τοποθετούνται εξωτερικά σε κάθε τοίχο.

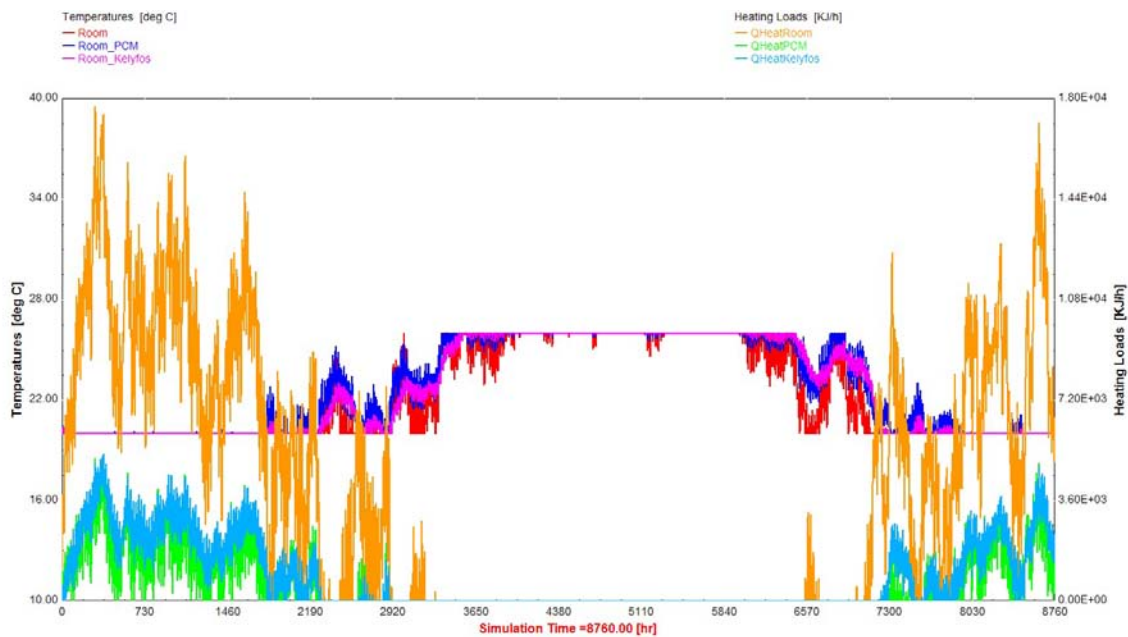
(γ) Στη ζώνη 3: Προστέθηκε στο εσωτερικό κάθε τοίχου συμπεριλαμβανομένης της οροφής στρώμα μόνωσης με πάχος 2cm και στρώμα ΥΑΦ με πάχος 3 cm.

Η προσομοίωση έδειξε ότι οι δύο ζώνες στις οποίες έγινε επέμβαση συμπεριφέρονται αισθητά καλύτερα σε σχέση με την αρχική ζώνη (Διαγράμματα 4.28 και 4.29). Σε ότι αφορά την ψύξη, με τη χρήση νυχτερινού αερισμού η ζώνη με το ΥΑΦ μπορεί να αποδώσει έως και 4.8% καλύτερα σε σχέση με το σύστημα “kelyfos” (διάγραμμα 4.30). Αντίθετα αν δεν χρησιμοποιηθεί νυχτερινός αερισμός, η ζώνη με την καλύτερη εξωτερική μόνωση (kelyfos) είναι αυτή που υπερέχει μειώνοντας την απαιτούμενη ενέργεια ψύξης κατά 10.1% παραπάνω από ότι επιτυγχάνεται με την προσθήκη ΥΑΦ. Σε ότι αφορά τη θέρμανση και για οικιακά εσωτερικά κέρδη όπως αυτά ορίστηκαν στην ενότητα 4.2.1 (πίνακας 4.4), η προσθήκη ΥΑΦ μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση κατά ένα ποσοστό που προσεγγίζει το 12.6%. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα 4.10.

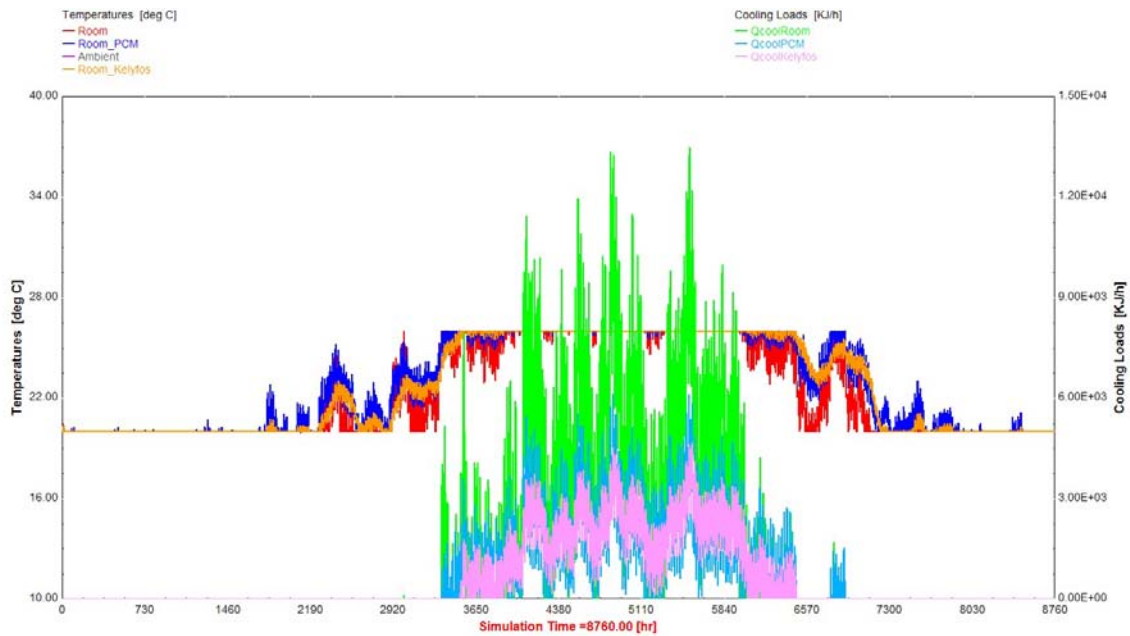
Συνοψίζοντας και με βάση τον ανωτέρω πίνακα, είναι φανερό ότι η βελτίωση που επιτυγχάνουν τα δύο συστήματα είναι σημαντική (άνω του 50%). Η απόδοση των δύο συστημάτων είναι παραπλήσια, ωστόσο η προσθήκη ΥΑΦ σε συνδυασμό με νυχτερινό αερισμό φαίνεται να υπερέχει κατά 8.7%. Σε περίπτωση που δεν εφαρμοστεί κάτι τέτοιο η απόδοση των δύο παρεμβάσεων στο κτήριο είναι σχεδόν η ίδια (διαφορά 1.15%). Σε κάθε περίπτωση η προσθήκη εσωτερικής μόνωσης και ΥΑΦ φαίνεται να μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης παλιών κτηρίων επιτυγχάνοντας μείωση στην συνολική ενέργεια θέρμανσης-ψύξης κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 50.6 έως 58% για οικιακά κέρδη.

Πίνακας 4.10 Σύγκριση ενεργειακής απόδοσης ζωνών με την προσθήκη ΥΑΦ και συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης (Kelyfos).

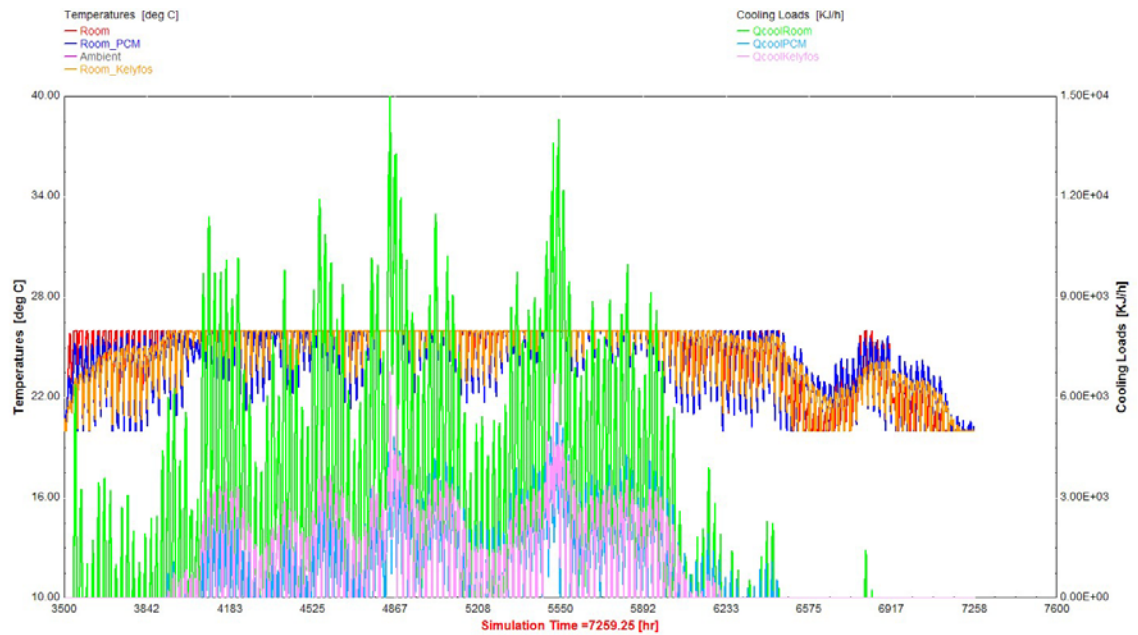
	Θέρμανση (% μείωση επί της αρχικής απαιτούμενης ενέργειας σε κτήριο χωρίς μόνωση)			Ψύξη (% μείωση επί της αρχικής απαιτούμενης ενέργειας σε κτήριο χωρίς μόνωση)		
	Προσθήκη ΥΑΦ- Μόνωσης	Εξωτερική Μόνωση (Kelyfos)	Διαφορά	Προσθήκη ΥΑΦ- Μόνωσης	Εξωτερική Μόνωση (Kelyfos)	Διαφορά
Χωρίς Νυχτερινό αερισμό	73	61.4	12.6	28.2	38.3	-10.1
Με Νυχτερινό Αερισμό	N/A	N/A	N/A	43.1	38.3	4.8



Διάγραμμα 4.28. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις δύο ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και εσωτερικά φορτία γραφείου - απαιτούμενα θερμικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm και μόνωσης 2 cm).



Διάγραμμα 4.29. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης και οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm και μόνωσης 2 cm).



Διάγραμμα 4.30. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά εσωτερικά φορτία και χρήση νυχτερινού αερισμού- απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm και μόνωσης 2 cm).

4.4 Προσομοίωση προκατασκευασμένων κτηρίων

Τα προκατασκευασμένα, είναι κτήρια με ιδιαίτερα μικρή θερμική μάζα που ωστόσο χρησιμοποιούνται λόγω της ευκολίας και ταχύτητας εγκατάστασής τους εκτεταμένα σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών αλλά και ως χώροι αποθήκευσης και λειτουργίας κυρίως γραφείων και τηλεπικοινωνιακών σταθμών.

Η απουσία αξιολογής θερμικής μάζας δημιουργεί έντονες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την απουσία συνθηκών θερμικής άνεσης. Η επίτευξη τέτοιων συνθηκών μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανικά συστήματα κλιματισμού ωστόσο το τίμημα σε κατανάλωση ενέργειας είναι ιδιαίτερα υψηλό. Είναι επομένως σημαντική η διερεύνηση μεθόδων που θα επιτύχουν εξοικονόμηση ενέργειας σε τέτοια κτήρια.

Τα ΥΑΦ μπορούν, εφόσον ενσωματωθούν στη δομή τέτοιων κτηρίων, να αυξήσουν σε σημαντικό βαθμό την θερμική τους μάζα χωρίς ταυτόχρονα να επηρεάζουν τα πλεονεκτήματα του μικρού όγκου και της εύκολης εγκατάστασής τους. Αποτελούν επομένως μια πιθανή λύση στην βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς προκατασκευασμένων κτηρίων.

Στόχος μας στην ενότητα αυτή είναι η διερεύνηση της δυνατότητας αυτής των ΥΑΦ μέσω της προσομοίωσης δύο ζωνών σε αντιστοιχία με τις προηγούμενες ενότητες. Εδώ ωστόσο η προσθήκη του ΥΑΦ γίνεται σε μορφή γυψοσανίδας. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των δύο ζωνών της προσομοίωσης συνοψίζονται στον πίνακα 4.11.

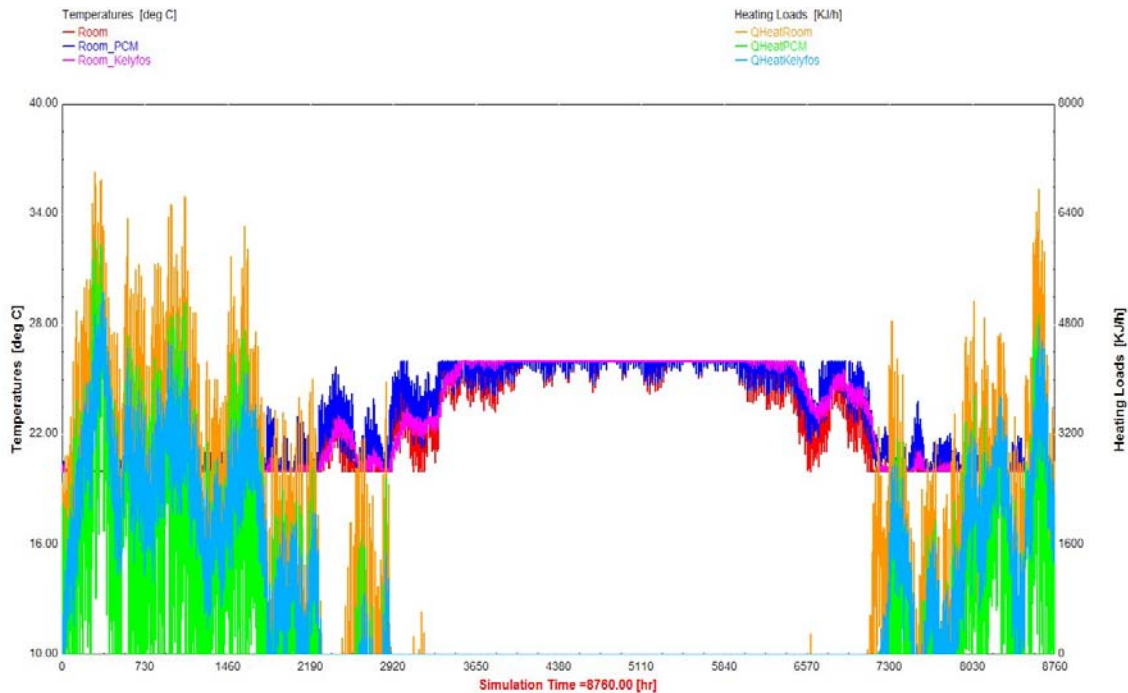
Πίνακας 4.11. Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ζωνών (προκατασκευασμένα κτήρια)

Ζώνη 1 (Συμβατικό Κτήριο)		Ζώνη 2 (Κτήριο με ΥΑΦ)	
Τοίχοι-Οροφή	Μεταλλικό έλασμα πάχους 1.5 cm	Τοίχοι	Μεταλλικό έλασμα πάχους 1.5 cm
	Μονωτικό υλικό πάχος 4 cm		Μονωτικό υλικό πάχος 4 cm
	Μεταλλικό έλασμα πάχους 1.5 cm		Μεταλλικό έλασμα πάχους 1.5 cm
			Γυψοσανίδα με ΥΑΦ πάχους 3 cm
Δάπεδο	Πλακάκι 5mm	Δάπεδο	Πλακάκι 5mm
	Υλικό επικόλλησης 5 mm		Υλικό επικόλλησης 5 mm
	Μπετόν 24 cm		Μπετόν 24 cm
	Μόνωση 10 cm		Μόνωση 10 cm
Θέρμανση-Ψύξη	ΟΝ	Θέρμανση-Ψύξη	ΟΝ
Κέρδη	Γραφείου	Κέρδη	Γραφείου
Πάχος στρώματος ΥΑΦ	N/A	Πάχος στρώματος ΥΑΦ	3 cm

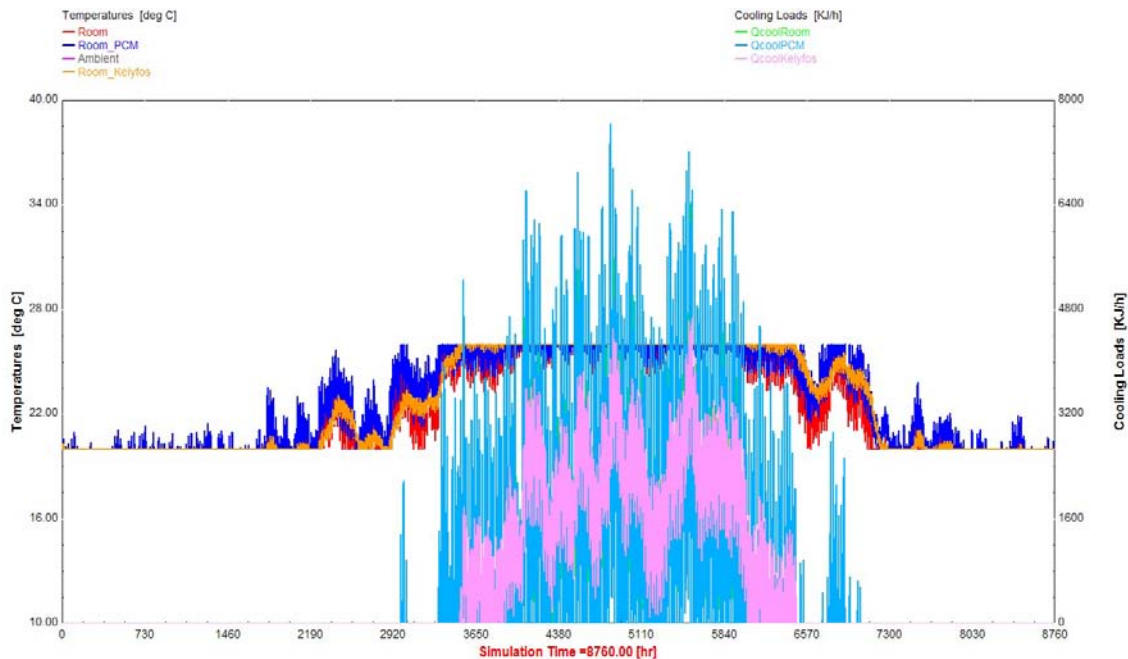
Σημειώνεται ότι για σκοπούς αξιολόγησης της επιτυχίας μιας παρέμβασης με ΥΑΦ στα προκατασκευασμένα κτήρια, διατηρήθηκε η προσομοίωση ζώνης κτηρίου με εφαρμογή συστήματος Kelyfos (πίνακας 4.8). Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσαμε να έχουμε μια εικόνα της ενεργειακής απόδοσης ενός κτηρίου χωρίς θερμική μάζα (συνολικό πάχος 10 cm) σε σχέση με ένα κτήριο μεγάλης θερμικής μάζας (συνολικό πάχος 33 cm).

Η προσομοίωση κτηρίων με πολύ μικρή θερμική μάζα στο TRNSYS παρουσιάζει προβλήματα που οφείλονται στη δυσκολία προσδιορισμού των συντελεστών της συνάρτησης μεταφοράς που περιγράφει τη συμπεριφορά των τοίχων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με την προσθήκη ενός επιπλέον στρώματος σε κάθε τοίχο που είναι χωρίς θερμική μάζα (mass less) με πάχος 0 (TRNSYS-users-Digest). Η τροποποίηση αυτή βρέθηκε απαραίτητη για την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων μαζί με την χρησιμοποίηση μικρού βήματος προσομοίωσης (0.25 h).

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα διαγράμματα 4.31 και 4.32.



Διάγραμμα 4.31. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά εσωτερικά φορτία - απαιτούμενα θερμικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).

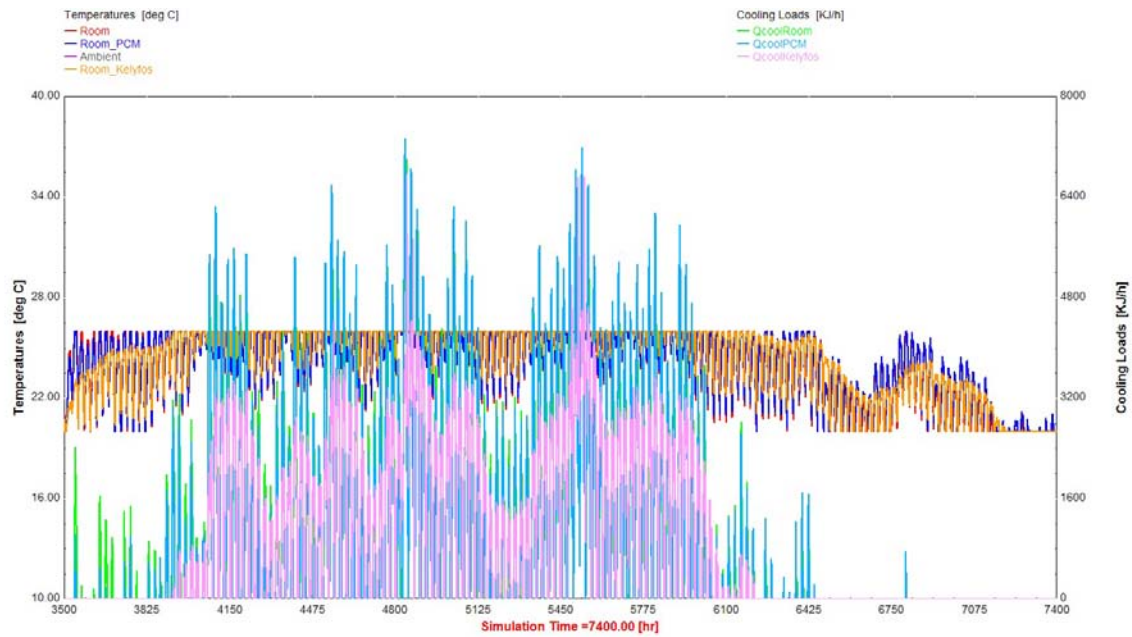


Διάγραμμα 4.32. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά εσωτερικά φορτία και χωρίς τη χρήση νυκτερινού αερισμού - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).

Με βάση τις προσομοιώσεις βλέπουμε ότι η προσθήκη ΥΑΦ έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση στην απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης του κτηρίου. Η μείωση αυτή, που προσεγγίζει το 53%, ανέρχεται σε επίπεδα αντίστοιχα της μείωσης που μπορεί να επιτευχθεί σε ένα συμβατικό και πλήρως μονωμένο κτήριο. Σε ό,τι αφορά την απαιτούμενη ενέργεια θέρμανσης, η απόδοση του κτηρίου με ΥΑΦ ξεπερνά οριακά (2.3%) εκείνης που μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη του συστήματος Kelyfos σε κτήριο μεγάλης θερμικής μάζας.

Η κατάσταση αυτή είναι εντελώς διαφορετική σε ό,τι αφορά την απαιτούμενη ενέργεια ψύξης. Η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται από το συμβατικό κτήριο με την προσθήκη του συστήματος Kelyfos. Η προσθήκη ΥΑΦ δεν βελτιώνει αλλά αντίθετα οριακά (1.7%) χειροτερεύει την ενεργειακή απόδοση του κτηρίου.

Η εφαρμογή νυκτερινού αερισμού κάνει δυνατή τη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας ψύξης κατά 8.3% (διάγραμμα 4.33). Η μείωση αυτή είναι συγκρίσιμη με εκείνη που επιτυγχάνεται από το σύστημα Kelyfos (8.9%).



Διάγραμμα 4.33. Μεταβολή θερμοκρασίας του αέρα στις τρεις ζώνες με ενεργοποιημένο το σύστημα ψύξης-θέρμανσης, οικιακά εσωτερικά φορτία και τη χρήση νυκτερινού αερισμού - απαιτούμενα ψυκτικά φορτία (Πάχος ΥΑΦ 3 cm).

5. Συμπεράσματα

Η μελέτη αυτή είχε ως στόχο τη διερεύνηση της θερμικής απόκρισης κτηρίων με ενσωμάτωση υλικών ΥΑΦ στη δομή τους και χρήση ενεργού κλιματισμού. Τρία διαφορετικά είδη κτηρίων μελετήθηκαν που ανταποκρίνονται στην Ελληνική πραγματικότητα και εξετάστηκε μέσω προσομοιώσεων η εξοικονόμηση ενέργειας, τόσο σε ότι αφορά την θέρμανση όσο και την ψύξη, που μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση των υλικών ΥΑΦ.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι ανεξάρτητα με το είδος του κτηρίου, η κατάλληλη ενσωμάτωση υλικών ΥΑΦ στη δομή του παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα από την σκοπιά της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Η μελέτη αφορά τις κλιματικές συνθήκες της Ελλάδας (Αθήνα).

Σε ότι αφορά κτήρια σύγχρονης κατασκευής εξετάστηκε η αντικατάσταση του εσωτερικού επιχρίσματος από επίχρισμα που περιέχει ΥΑΦ. Η παρέμβαση αυτή έχει σημαντική συμβολή στον περιορισμό της απαιτούμενης ενέργειας για την θέρμανση του κτηρίου. Η βελτίωση που επιτυγχάνεται μεγιστοποιείται για πάχος εφαρμοζόμενου ΥΑΦ ίσο με 3cm ενώ αυξάνεται με την αύξηση των εσωτερικών θερμικών φορτίων. Για οικιακά εσωτερικά φορτία η βελτίωση προσεγγίζει το 57% της αρχικής απαιτούμενης ενέργειας θέρμανσης ενώ παράλληλα παρατηρείται και μια μείωση κατά 31% στη διαστασιολόγηση του συστήματος θέρμανσης.

Αντίθετα, η απαιτούμενη ενέργεια ψύξης με την απλή προσθήκη ΥΑΦ παρουσιάζει πολύ μικρή βελτίωση που σχεδόν μηδενίζεται με την αύξηση των εσωτερικών θερμικών φορτίων. Η βελτίωση της συμπεριφοράς του κτηρίου σε ότι αφορά την ψύξη προϋποθέτει τη χρήση ενός μηχανισμού αποφόρτισης του ΥΑΦ. Η χρήση νυχτερινού αερισμού μπορεί να αποτελέσει έναν τέτοιο μηχανισμό, η απόδοσή του ωστόσο εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Για τις συνθήκες της Ελλάδας βρέθηκε ότι η χρήση νυχτερινού αερισμού μπορεί να μειώσει κατά σχεδόν 20% την απαιτούμενη ενέργεια ψύξης για οικιακά εσωτερικά φορτία. Ταυτόχρονα μπορεί να επιτευχθεί μείωση κατά 5% της διάστασης του συστήματος ψύξης. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός αερισμού που επιλέχθηκε (5 ac/h) μπορεί να επιτευχθεί μόνο με εξαναγκασμένο αερισμό (ανεμιστήρες), ωστόσο η ενέργεια που καταναλώνεται είναι πολύ μικρή. Η αύξηση του εφαρμοζόμενου πάχους του ΥΑΦ δεν βρέθηκε να βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του κτηρίου στην ψύξη λόγω του περιορισμού στην ποσότητα του ΥΑΦ που μπορεί να αποφορτιστεί κατά τη διάρκεια του νυχτερινού αερισμού. Ικανοποιητική απόδοση επιτυγχάνεται για πάχος εφαρμοζόμενου ΥΑΦ ίσο με 3 cm.

Επιπρόσθετα, διερευνήθηκε μια κρίσιμη ιδιότητα του ΥΑΦ όπως η θερμοκρασία αλλαγής φάσης και βρέθηκε ότι η επιλογή της είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση των ωφελειών από την προσθήκη ΥΑΦ. Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης θα πρέπει να επιλεχθεί μέσα στη ζώνη θερμικής άνεσης. Η βελτιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας θέρμανσης γίνεται για θερμοκρασία αλλαγής φάσης 2°C πάνω από την θερμοκρασία ενεργοποίησης του συστήματος

θέρμανσης. Σε ότι αφορά την ψύξη αντίθετα, η επιλογή υψηλότερης θερμοκρασίας (κοντά στη θερμοκρασία ενεργοποίησης του συστήματος ψύξης) φαίνεται να μπορεί να εκμεταλλευτεί καλύτερα το μηχανισμό του νυχτερινού αερισμού. Συνολικά βρέθηκε ότι για τις συνθήκες της Ελλάδας βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται για θερμοκρασία αλλαγής φάσης στο εύρος 22-25°C. Η βελτίωση αυτή προσεγγίζει το 42% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνει το κτήριο για ψύξη και θέρμανση.

Σε ότι αφορά κτήρια παλαιότερης κατασκευής, διερευνήθηκε η βελτίωση που μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη εσωτερικού επιχρίσματος με ΥΑΦ. Βρέθηκε ότι η απλή προσθήκη ΥΑΦ δεν παρουσιάζει την αναμενόμενη βελτίωση αφού η έλλειψη μόνωσης στα κτήρια αυτά εμποδίζει την πλήρη λειτουργία του. Σημαντική βελτίωση ωστόσο παρουσιάζεται με την προσθήκη μόνωσης εσωτερικά κάτω από το στρώμα του ΥΑΦ. Η συγκεκριμένη παρέμβαση βρέθηκε να μειώνει δραστικά τις απαιτήσεις του κτηρίου σε ενέργεια κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται από 50-58% για οικιακά κέρδη. Η χρήση νυχτερινού αερισμού είναι και εδώ απαραίτητη για την σημαντική μείωση της απαιτούμενης ενέργειας ψύξης. Η προσθήκη εσωτερικής μόνωσης και ΥΑΦ φαίνεται να μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση σε σχέση με την προσθήκη εξωτερικής μόνωσης (σύστημα Kelyfos) αφού παρουσιάζει ισοδύναμη ή και καλύτερη απόδοση (8%). Η βιωσιμότητα βέβαια της λύσης αυτής εξαρτάται τόσο από το ίδιο το κτήριο (περίπτωση αδυναμίας εφαρμογής εξωτερικής μόνωσης) όσο και από το κόστος των δύο λύσεων, κάτι που δεν αποτέλεσε αντικείμενο της μελέτης μας.

Τέλος, η προσθήκη ΥΑΦ σε κτήρια με πολύ μικρή θερμική μάζα μέσω γυψοσανίδων μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή τους απόδοση κυρίως σε ότι αφορά την ενέργεια θέρμανσης. Στην περίπτωση αυτή η απόδοση του κτηρίου μπορεί να προσεγγίσει (και οριακά να περάσει) την απόδοση ενός συμβατικού κτηρίου στο οποίο έχει γίνει προσθήκη εξωτερικής μόνωσης (σύστημα Kelyfos). Η μείωση της απαιτούμενης ενέργειας ψύξης δεν μπορεί να επιτευχθεί με την απλή προσθήκη ΥΑΦ. Η χρήση νυχτερινού αερισμού βελτιώνει την απόδοση του κτηρίου (κατά 8.3%), ωστόσο η βελτίωση αυτή είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με εκείνη που μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση ενός συμβατικού (πλήρως μονωμένου) κτηρίου (20%).

Συνοψίζοντας η μελέτη αυτή έδειξε ότι:

(α) μέσω της ενσωμάτωσης ΥΑΦ στη δομή του κτηρίου είναι δυνατή η επίτευξη σημαντικής βελτίωσης στην ενεργειακή του απόδοση.

(β) η βελτίωση αυτή προϋποθέτει την κατάλληλη επιλογή του ΥΑΦ (εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης- λανθάνουσα ενέργεια κ.α.), της στρατηγικής αποφόρτισής του κατά την καλοκαιρινή περίοδο (νυχτερινός αερισμός, σωλήνες ψυχρού νερού κ.α.) αλλά και του τρόπου εφαρμογής του (π.χ. ανάγκη προσθήκης μόνωσης σε παλαιότερα κτήρια).

(γ) οι ανωτέρω παράγοντες επηρεάζονται σημαντικά από το κλίμα της περιοχής όπου βρίσκεται το κτήριο

(δ) προκειμένου να γίνουν οι ανωτέρω επιλογές θα πρέπει να διεξαχθούν παραμετρικές μελέτες μέσω δυναμικής προσομοίωσης της θερμικής

απόκρισης του κτηρίου. Η προσομοίωση αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη μοντέλων για την απόκριση του ΥΑΦ με επαρκή ακρίβεια.

Θα πρέπει να σημειώσουμε επίσης ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της απόκρισης του ΥΑΦ είναι σε γενικές γραμμές πολύ πολύπλοκο σε σχέση με την φιλοσοφία της προσομοίωσης κτηρίων μέσω TRNSYS. Πράγματι ενώ για κάθε ζώνη η απόκριση του κτηρίου υπολογίζεται μέσω μιας συνάρτησης μεταφοράς, η απόκριση του ΥΑΦ υπολογίζεται μέσα από ένα μοντέλο τριών διαστάσεων. Αυτό έχει σαν συνέπεια την ανάγκη χρήσης μικρού βήματος προσομοίωσης αλλά και την σημαντική επιμήκυνση της απαιτούμενης διάρκειας των προσομοιώσεων, κάποιες από τις οποίες απαιτούσαν μία ή και δύο εβδομάδες σε υπολογιστή με επεξεργαστή Pentium 4 (3 GHz).

6. Προτάσεις για περαιτέρω αξιοποίηση της μελέτης

Όπως έδειξαν οι προσομοιώσεις το υφιστάμενο μοντέλο ΥΑΦ είναι πολύ πολύπλοκο και η ανάπτυξη ενός πιο απλού μοντέλου (μίας διάστασης), το οποίο θα προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα ενώ ταυτόχρονα η εφαρμογή του θα είναι εύκολη και γρήγορη είναι πολύ σημαντική δεδομένου ότι η εφαρμογή των ΥΑΦ απαιτεί τη διεξαγωγή παραμετρικών μελετών με βάση τα χαρακτηριστικά τους και τον τρόπο εφαρμογής τους.

Επίσης προκειμένου να έχουμε μια πιο καλή εκτίμηση για τη ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν στην παρούσα εργασία θα έπρεπε να γίνει σύγκρισή τους με εκείνα άλλων μοντέλων. Παρά το γεγονός ότι το TRNSYS είναι ένα πολύ εύχρηστο πρόγραμμα η χρήση ενός άλλου προγράμματος για τον σκοπό αυτό (όπως το BSim) που να μη χρησιμοποιεί συναρτήσεις μεταφοράς θα έπρεπε να γίνει ώστε να ανιχνευθούν αποκλίσεις που οφείλονται στις προσεγγίσεις του προγράμματος.

Η μελέτη της απόκρισης συστημάτων μέσω προσομοιώσεων μπορεί να μας δώσει συχνά μια ικανοποιητική εικόνα για την συμπεριφορά ενός συστήματος που στην περίπτωση μας είναι ένα κτήριο. Δεν μπορεί ωστόσο σε καμία περίπτωση να αντικαταστήσει τις πειραματικές μετρήσεις. Η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης πειραματικά μέσω παρέμβασης σε ένα ήδη υπάρχον κτήριο θα αποτελούσε ένα σημαντικό βήμα για την πλήρη κατανόηση της βελτίωσης που η ενσωμάτωση ΥΑΦ μπορεί να έχει στην ενεργειακή απόδοση κτηρίων. Ταυτόχρονα τα πειραματικά δεδομένα που θα μπορούσαν να καταγραφούν σε σχέση με την απόκριση του ΥΑΦ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου.

Τέλος, στην παρούσα εργασία δεν λάβαμε υπόψη σημαντικούς παράγοντες στην ενεργειακή απόδοση ενός κτηρίου όπως ο προσανατολισμός, η (κινητή ή σταθερή) σκίαση κ.α. Η επίδραση των παραμέτρων αυτών στην απόδοση του προστιθέμενου ΥΑΦ θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να διερευνηθεί.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διεκπεραίωση της έρευνας δεν θα ήταν εφικτή αν δεν υπήρχε η συμπαράσταση και η βοήθεια από τα παρακάτω άτομα, τα οποία κάθε ένα συμμετείχε με τον τρόπο του στην προσαρμογή και χρήση του μοντέλου ΥΑΦ, στη διεξαγωγή των προσομοιώσεων και στην ανάλυση των μετρήσεων.

Ευχαριστώ πολύ :

- τον επίκ. καθ. Θεοχάρη Τσούτσο
- τον υποψ. Διδάκτορα Άρη Γκούσκο
- τον Δρ. Albert Castell του πανεπιστημίου της Lleida
- τον Δρ. Hermann Schranzhofer, επιστημονικό συνεργάτη του Ινστιτούτου Θερμικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου του Graz

για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Ευχαριστώ επίσης την γυναίκα μου καθώς και τα παιδιά μου για την υπομονή και συμπαράσταση που μου έδειξαν.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Clarke (2001). "Energy Simulation in Building Design", *second edition, Butterworth-Heinemann*
- [2] U.S Department of Energy Building Technologies Program, www1.eere.energy.gov/buildings/.
- [3] Heim D. & Clarke J (2004). "Numerical modeling and thermal simulation of Phase Change Materials with ESP-r", *Energy and Buildings, vol 36, pp.795-805*.
- [4] Heim D (2005). "Two solution methods of heat transfer with Phase Change within whole building dynamic simulation", *9th International IBPSA Conference, Montreal Canada..*
- [5] Markopoulos A (2008). "PCM performance optimization in buildings using active cooling systems", *Msc thesis, University of Strathclyde*.
- [6] Ahmad M et al (2006a). Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material, *Energy and Buildings vol. 38 pp. 673-681*.
- [7] Ahmad M et al (2006b). Experimental investigation and computer simulation of thermal behavior of wallboards containing a phase change material, *Energy and Building vol 38 pp.357-366*.
- [8] Mehling, Cabeza (2008). Heat and Cold storage with PCM. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- [9] Jokisalo J., Lamperg P, Siren K (2000). Suitability of Building construction materials in short-term energy storage-office room simulations., *Helsinki University of Technology, HVAC Laboratory, Report B56 (in Finnish)*.
- [10] TRNSYS, A transient system simulation program (University of Wisconsin) (<http://www.trnsys.com>)
- [11] Jokisalo J., Lamperg P, Siren K (2000). Thermal simulation of PCM structures with TRNSYS. *8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany*.
- [12] Kuznik F. et al (2007). Full-scale experimental investigation of room wall containing phase change material wallboard. *Energy and Building vol 40, pp.148-156*.

- [13] Schranzhofer H., Pusching P., Heinz A. & Streicher W. (2006). Validation of a TRNSYS simulation model for PCM energy storages and PCM wall construction elements, *ECOSTOC conference, 31 May- 2 June, Poloma USA*.
- [15] Zhang YP., Zhou G., Lin KP., Zhang QL. & Di HF. (2007). “ Application of latent heat thermal energy storage in buildings: Sate-of the-art and outlook”, *Building and Environment, vol 42, pp. 2197-2209*.
- [16] Zhang YP., Lin KP., Zhang QL. & Di HF. (2006). “Ideal thermo-physical properties for free-cooling (or heating) buildings with constant thermal physical property material, *Energy and Buildings, vol 38, pp.1164-1170*.
- [17] Regin A F. et al [2008]. “Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews vol 12, pp.2438-2451*.
- [18] Sharma A. et al [2009]. “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 13, pp.318-345*
- [19] Tyagi et al [2007]. “PCM thermal storage in buildings: A state of art”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 11, pp.1146-1166*.
- [20] Kenisarin M. & Mahkamov K. [2007], “Solar energy storage using phase change materials”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 11, pp. 1913-1965*.
- [21] Zalba et al [2003]. “Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications”, *Applied Thermal Engineering, vol23 pp.251-283* .
- [22] Pincemin et al [2008]. “Highly conductive composites made of phase change material and graphite for thermal storage”, *Solar Energy Materials and Solar Cells, vol 92, pp.603-613*.
- [23] Streicher W., Cabeza L. & Heinz A. [2005]. “Inventory of Phase Change Materials”, *Report C2 of Subtask C, Task 32 “Advanced storage concepts for solar and low energy buildings”*.
- [24] Khudhair A., Farid M. [2004]. “A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials”, *Energy Conversion and Management, vol 45, pp.263-275*.
- [25] Farid et al [2004]. “A review on phase change energy storage: materials and applications”, *Energy Conversion and Management, vol 45, pp. 1597-1615*.

- [26] Cabeza et al [2007]. "Thermal energy storage with phase change materials in building envelopes", *Contributions to Science*
- [27] Atheinitis et al [1997]. "Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage", *Build Environment*, vol 32, pp.405-410.
- [28] Kuznik F. [2007]. "Full-scale experimental investigation of room wall containing phase change material wallboard", *Proceedings of Clima 2007*.
- [29] Neeper D. [2000]. "Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage", *Solar Energy*, vol 68, pp.393-403.
- [30] Pasupathy A. et al [2008]. "Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management", *Applied Thermal Engineering*, vol 28, pp. 556-565.
- [31] Arkar et al [2007]. "Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building", *International Journal of Refrigeration*, vol 30, pp.134-143.
- [32] Stetiu C., Feustel HE., [1998]. "Phase-change wallboard and mechanical night ventilation in commercial buildings", *Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California*, <http://epb.lbl.gov/thermal/docs/YAΦ2.pdf>.
- [33] Mehling H. [2004]. "Strategic concept: Innovative PCM-technology-results and future perspectives", *8th expert meeting and workshop Kizkalesi, Turkey*.
- [34] Ismail et al [2001]. "Thermally effective windows with moving phase change material curtains", *Applied Thermal Engineering*, vol 21, pp. 1909-1923.
- [35] Yamaha M.& Misaki S. [2006]. "The evaluation of peak shaving by a thermal storage system using phase change materials in air distribution systems", *HVAC&Rres*, vol 12, pp.861-869.
- [35] Lin k. et al [2004]. "Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates", *Energy and Building* vol 37, pp.215-220.
- [36] Saman et al [2005]. "Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system", *Solar energy* vol 78, pp. 341-349.

- [37] Koschenz M. & Lehmann B. [2004]. "Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings", *Energy and Buildings*, vol36, pp.567-578 .
- [38] Ibanez M. et al [2005]. "An approach to the simulation of PCM in building applications using TRNSYS", *Applied Thermal Engineering*, pp. 1796-1807.
- [39] Jorgen R. et al [2009]. "Numerical method for calculating latent heat storage in constructions containing phase change material", *Building Simulation* pp400-407.
- [40] Pedersen et al. [2007]. "Advanced zone simulation in EnergyPlus: Incorporation of variable properties and phase change material (PCM) capability", *Building Simulation* pp.1341-1345.
- [41] Alisetti E.L. & Roy K. [2000]. "Forced convection heat transfer to phase change material slurries in circular ducts", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* pp115-118.
- [42] <http://www.micronal.de/>
- [43] <http://www.kelyfos.eu/>
- [44] Zhu et al. [2009]. "Dynamic Characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review", *Energy Conversion and Management* vol 50, pp3169-3181.